

На правах рукописи

ГУРЫЛЕВ
Олег Юрьевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ
ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ КОТЛОВ МОЩНЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ
ПРИ ПЕРЕХОДЕ НА СЖИГАНИЕ БЕРЕЗОВСКОГО УГЛЯ
(на примере котлов П-59 Рязанской ГРЭС)**

Специальность 05.14.14 — "Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ — 2004

Работа выполнена в ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Научный руководитель:

— доктор техн. наук, профессор *Ахмедов Джавад Берович*

Официальные оппоненты:

— доктор техн. наук, профессор *Боровков Валерий Михайлович*

— кандидат техн. наук, доцент *Филонов Александр Федорович*

Ведущая организация: *ОАО "Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт" (ВТИ), Москва.*

Защита диссертации состоится 15 июня 2004 г. в 16-00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
в аудитории 411 ПГК

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан "___" мая 2004 г.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, в двух экземплярах просим направить по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Факс: (812)5527684

E-mail: kg@kg1210.spb.edu

Ученый секретарь
диссертационного совета

К.А.Григорьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Преобразования, происходящие в последние десятилетия в России, привели к сложной ситуации в энергетике. Большинство электростанций, по ряду независимых от них причин, были вынуждены перейти на сжигание непроектных углей, что значительно ухудшило технико-экономические показатели. Это же в полной мере относится и к Рязанской ГРЭС, на первой очереди которой в качестве проектного топлива использовался подмосковный бурый уголь, но с 1996 года станция перешла на преимущественное сжигание Канско-Ачинских углей.

Существовавшая технология сжигания в прямоточном пылеугольном факеле была не в состоянии обеспечить установленную мощность котлоагрегата по причине интенсивного шлакования экранов и конвективного пароперегревателя. Назрела необходимость поиска и внедрения новых технологий, позволяющих эффективно эксплуатировать оборудование при сжигании непроектного топлива с минимальными издержками и высокими экологическими показателями.

Работа выполнена на Рязанской ГРЭС и на кафедре «Реакторо- и парогенераторостроение» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета в рамках отраслевой программы РАО ЕЭС «Комплексная программа повышения надёжности работы оборудования и персонала и снижения аварийности в ЕЭС России. Раздел П-2. Повышение эффективности и качества эксплуатационно-ремонтного обслуживания котлоагрегатов ТЭС» и межвузовской программы «Повышение надёжности, экономичности и экологической безопасности энергетической системы РФ».

Цель работы. Выбор эффективного способа сжигания непроектного топлива – березовского бурого угля на котлах П-59 Рязанской ГРЭС, разработка рекомендаций по внедрению низкоэмиссионной вихревой технологии (ВИР-технология) и исследования эффективности проведенной модернизации.

Поставленная цель достигалась путем выполнения следующих задач:

- обобщением опыта сжигания березовского угля в котлах П-59 Рязанской ГРЭС при традиционном методе сжигания;
- проведением анализа различных технологий сжигания углей подобных канско-ачинским и выбором оптимальной технологии для котлов П-59 энергоблоков 260 МВт Рязанской ГРЭС;
- обоснованием модернизации котла П-59 с внедрением низкоэмиссионной вихревой технологии сжигания (ВИР-технологии);
- проведение модернизации котла П-59 ст. №2 Рязанской ГРЭС;
- выявлением характерных особенностей топочного процесса модернизированного котла П-59 при реализации ВИР-технологии;
- исследованием влияния технологии на величину вредных выбросов при сжигании березовских углей;
- определением оптимальных режимных параметров при сжигании березовских углей в котле П-59 Рязанской ГРЭС и достигнутых технико-экономических показателей после модернизации;

Научная новизна работы:

- получены новые экспериментальные данные о работе котлоагрегата П-59 при сжигании пыли угрубленного помола Берёзовского месторождения, при различных режимах;
- проведен анализ особенностей топочного процесса и теплообмена при низкоэмиссионном вихревом сжигании березовского угля в топке котлоагрегата большой мощности;
- выявлены факторы, снижающие интенсивность шлакования радиационных и конвективных поверхностей нагрева котла;
- показано, что шлакующие свойства березовских углей определяются не только их составом, но и технологией сжигания;
- разработано стратегическое направление выбора технологии сжигания березовского бурого угля на котлах П-59 Рязанской ГРЭС;

Практическая ценность и реализация работы в промышленности:

- сняты ограничения мощности блоков 260 МВт Рязанской ГРЭС по условиям шлакования топочных экранов и образования плотных отложений на конвективных поверхностях нагрева;
- повышены экономические показатели работы котлов П-59;
- снижены токсичные выбросы NO_x и SO_2 ;
- доказана экономическая целесообразность проведенной модернизации;
- экспериментально подтверждено, что переход на низкоэмиссионную технологию сжигания расширяет возможность использования березовских углей Канско-Ачинского бассейна по условиям длительной бесшлаковочной работы котлоагрегата;
- по результатам проведенных испытаний котла П-59 ст. № 2 ОАО «Рязанская ГРЭС» на электростанции было принято решение о проведении модернизации ещё одного пылеугольного котла П-59. Решением Правления РАО «ЕЭС России» блок № 2 Рязанской ГРЭС был перемаркирован на большую мощность;
- результаты исследований успешно внедрены на котле ПК-38 (на корпусе с твердым шлакоудалением паропроизводительностью 270 т/ч) Назаровской ГРЭС.

Личный вклад автора заключается:

- в выборе и обосновании стратегического направления развития Рязанской ГРЭС при переходе на сжигание КАУ;
- в выборе технологии сжигания непроектного топлива и внедрении её в промышленную эксплуатацию;
- в организации проведения комплексных научно-промышленных испытаний на реконструированном оборудовании;
- в разработке программ и руководстве исследованиями внутритопочных процессов;
- в проведении анализа и обобщений результатов исследований и формировании выводов.

Достоверность и обоснованность результатов, полученных соискателем, обеспечиваются: проведением расчётных и экспериментальных исследований в соответствии с действующими в России стандартами, методиками и нормативными документами; применением современной контрольно-измерительной аппаратуры и электронно-вычислительной техники; сопоставлением результатов исследований с результатами других авторов; подтверждением положительных результатов модернизации межведомственной комиссией (ОРГРЭС, ВТИ, УралВТИ, СибВТИ, ЗиО).

Автор защищает: Способ повышения беспыльчатой мощности и улучшения технико-экономических и экологических показателей работы мощных колоагрегов при сжигании непроектного топлива – березовского бурого угля – и результаты его применения при модернизации котлов П-59 блоков 260 МВт Рязанской ГРЭС.

Апробация работы и публикации. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на восьмом Всероссийском научно-практическом семинаре "Обеспечение работы энергооборудования ТЭС и АЭС после сверхдлительной эксплуатации" (Санкт-Петербург, 2002 г.) и выездном заседании Секции Тепловых Электростанций и Централизованного теплоснабжения Научно-Технического Совета РАО «ЕЭС России» (г. Новомичуринск, Рязанской обл., 3-4 июня 2003 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 7 статей.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертационной работы: 117 страниц машинописного текста, 36 рисунков, 20 таблиц, 11 страниц списка литературы, включающего 95 наименований. Общий объем диссертации - 171 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, дана общая характеристика проблемы снижения качества проектного угля, его влияние на снижение технико-экономических показателей работы оборудования, сформулированы цель и задачи работы.

В первой главе на примере котлов П-59 Рязанской ГРЭС показано, что с переходом на сжигание непроектного топлива лучшего качества – березовского бурого угля Канско-Ачинского бассейна – из-за интенсивного шлакования топочных экранов и конвективного пароперегревателя и заноса золой остальных конвективных поверхностей нагрева была значительно снижена максимальная паропроизводительность котлоагрегатов и ухудшились их технико-экономические показатели.

На первой очереди Рязанской ГРЭС с 1973...74 гг. находятся в эксплуатации четыре энергоблока, оснащенные котлами П-59 производства ЗиО. Котел паропроизводительностью 275 кг/с, однокорпусной, прямоточный, со сверхкритическими параметрами пара (25,5 МПа, 545/545 °С), Т-образной компонов-

ки, рассчитан на сжигание бурого угля Подмосковного бассейна ($A^r = 22,4 \%$, $W_t^r = 34,0 \%$, $Q_i^r = 10,6$ МДж/кг) с твердым шлакоудалением.

После перехода котлов П-59 (с 1996 г.) на преимущественное сжигание березовского бурого угля, топочный процесс отличался высоким средним пирометрическим уровнем. По данным испытаний температура факела в поясе горелок на нагрузках 0,7...0,75 от номинальной, достигала 1350...1450 °С, на выходе из топки - 1100...1150 °С, что выше значений, рекомендуемых при сжигании Березовского угля (максимальная температура факела ϑ_{\max} не более 1270 °С, температура на выходе из топки ϑ''_T не более 1050 °С).

Максимальная нагрузка котлов была ограничена уровнем 220...240 МВт по условиям шлакования экранов, конвективного пароперегревателя (КПП) и заноса золой остальных конвективных поверхностей нагрева, включая воздухоподогреватель и водяной экономайзер (ВЭК). Однако и в этих условиях котлы останавливались через 2...3 недели эксплуатации для расшлаковки конвективного пароперегревателя.

Эффективность ручной очистки оказалась явно недостаточной и в 2000 году максимальная эксплуатационная нагрузка блоков была снижена до 200...210 МВт, а коэффициент тепловой эффективности топки не превышал 0,25. Пассивные методы очистки экранов и конвективных поверхностей нагрева от отложений – паровая и водяная обдувка – давали незначительный эффект даже при интенсивном режиме их работы

Уровень температур уходящих газов по сравнению с аналогичными показателями при сжигании Подмосковного угля в августе 1996 года повысился на 15...20 °С (205...210 °С) и примерно на столько же превышал расчетные значения.

Концентрация оксидов азота, приведенная к $\alpha = 1,4$, при сжигании Канско-Ачинских углей сохранилась на том же уровне, что и при сжигании Подмосковных углей: выбросы NO_x на уровне 350...600 мг/нм³, т.е. превышала норму, установленную ГОСТ Р50831-95 (300 мг/нм³).

Несмотря на низкое содержание серы в топливе (0,32 % на рабочую массу), концентрация SO_x в дымовых газах находилась в пределах 1200...1800 мг/нм³, что в 5...7 раз ниже значений получаемых при сжигании Подмосковных углей с подсветкой мазутом или газом (8000...12000 мг/нм³), но в два раза выше нормативных значений ГОСТ Р50831-95 (700 мг/нм³).

Переход на сжигание высокореакционных березовских углей усугубил проблемы взрыво-и пожаробезопасности пылесистем. Работа пылесистем с эксплуатационными параметрами по тонине помола $R_{90}=70...75\%$; $R_{1000}=0,6...0,8\%$ привела к увеличению остановов пылесистем из-за «хлопков» до 16 остановов на 100 часов работы котлоагрегата. За счёт усовершенствования конструкции затворов-отсекателей и восстановления схем паро- и водотушения удалось сократить данный показатель до 7,6 остановов.

На основании проведённого анализа работы котлоагрегатов Рязанской ГРЭС на непроектном топливе, встал вопрос о выборе новой технологии сжигания.

Во второй главе проведен обзор и анализ различных технологий сжигания твёрдого топлива, их текущее состояние и возможность применения для организации сжигания Канско-Ачинских углей на котлах Рязанской ГРЭС.

В результате опыта эксплуатации котлоагрегатов П-59 в течение 1997...2000 гг. автором была разработана концепция модернизации котлоагрегатов первой очереди при переходе на сжигание Канско-Ачинских углей, где были определены основные критерии, по которым проводился выбор замещающей технологии:

- аэродинамика топки, обеспечивающая равномерное заполнение факелом топочного объёма и бесшлаковочный режим работы;
- повышение экономических и экологических показателей работы котлоагрегата;
- возможность использования существующего на блоке оборудования пылеприготовления и пылесжигания;
- возможность проведения реконструктивных мероприятий в существующих габаритах котельной ячейки без изменения её размера;
- модернизация топки без изменения паро-водяного тракта котлоагрегата;
- наличие достаточного количества референций и опыта промышленной эксплуатации;
- небольшие удельные капиталовложения и возможность проведения реконструкции в рамках ремонтной кампании;

Невозможность достижения номинальной паропроизводительности при сжигании берёзовского угля в подъёмном факеле при различном расположении горелок (встречно-смещённые, тангенциальные и т.д.) подтверждалась и опытом работы котла П-67 Берёзовской ГРЭС-1.

Опыт эксплуатации мощного котла П-67 к блоку 800 МВт при сжигании Берёзовского угля. Проектированию котла П-67 энергоблока 800 МВт предшествовал большой объём исследований, связанных с изучением свойств угля Берёзовского месторождения, проведением стендовых и опытно-промышленных сжиганий этого угля в действующих котлах различных конструкций. Однако, несмотря на 15-летний опыт эксплуатации и огромное количество проведённых режимных мероприятий на котле не удалось достичь номинальной паропроизводительности по условиям надёжной бесшлаковочной работы. Нагрузка блока была ограничена величиной 700 МВт. Таким образом, длительный опыт эксплуатации котлов П-67 показал, что заранее продуманная и рассчитанная технология сжигания не оправдала себя, и переносить принципы организации сжигания с котла П-67 на котёл П-59 нельзя.

Ниже рассмотрены новые перспективные технологии сжигания твёрдого топлива, которые планируется применять на ТЭС в ближайшем будущем с использованием берёзовского угля.

Двух- и трёхступенчатые методы сжигания топлива последнее время широко внедряются на котлах, сжигающих угли Канско-Ачинского бассейна, в основном для улучшения экологических показателей. Применение двух- и трёхступенчатых (ребёнинг-процесс) методов сжигания позволяет снизить выбросы оксидов азота – для каменных углей это $\text{NO}_x < 470 \text{ мг/м}^3$, для бурых - $\text{NO}_x < 300 \text{ мг/м}^3$. Данный способ сжигания применяется в основном в топках, сечения которых близки к квадратному, т.е. отношение размеров стен $1 \leq a/b \leq 1,2$, с тангенциальным расположением горелок. Его преимущества, по мнению разработчиков, заключаются в равномерном заполнении факелом топочного объема, благодаря чему снижается шлакование стен топки, в низких потерях теплоты от мехнедожога топлива за счёт тщательного перемешивания тонкоизмельчённого топлива и воздуха.

Утонение помола активизирует химические превращения минеральной части с катастрофическими для берёзовского угля последствиями – снижением надёжности работы топочного устройства из-за интенсивного шлакования экранов и заноса конвективных поверхностей нагрева.

Значительная тепловая и температурная неравномерность по ширине, высоте и глубине топочной камеры приводит к снижению тепловой эффективности экранов. Крайне неэффективно используются тепловоспринимающие поверхности холодной воронки и верхней части топки.

Технология сжигания в циркулирующем кипящем слое (ЦКС), нашедшая широкое распространение в энергетике Западной Европы и США, позволяет улучшить экономические и экологические показатели основного оборудования. К концу 90-х годов эта технология использовалась на 606 электростанциях с общей установленной мощностью 58025 МВт.

К преимуществам данной технологии следует отнести:

- возможность эффективного сжигания шлакующих топлив, которая определяется стабильной, низкой (примерно $850 \text{ }^\circ\text{C}$) температурой по всей высоте топки при низком содержании углерода в слое и длительном времени пребывания коксозольного остатка в реакционной зоне;
- высокую эффективность связывания серы и низкие выбросы оксидов азота;
- возможность сжигания топлив различного качества в одном и том же котле, хорошие динамические характеристики;

К недостаткам технологии относятся значительное усложнение конструкции котла (воздухораспределительная решётка, специальные мероприятия для исключения эрозии поверхностей нагрева и др.), наличие большой массы футерованных элементов, усложнение вспомогательных систем котла (дренаж слоя, возврат золы, подвод известняка и т.д.), повышенные расходы на собственные нужды за счёт использования высоконапорных вентиляторов.

По данным компании «КЕМА» (Нидерланды) инвестиционные затраты на проведение реконструкции с внедрением технологии ЦКС составляют:

- для блока 200 МВт – 17 млн. долларов;
- для блока 300 МВт – 22 млн. долларов;

В условиях стабильного роста цен на топливо, при искусственном сдерживании тарифов на электроэнергию, при расчетном КПД проектируемых в России котлов на уровне 87...90%, необходимости капитальных вложений на уровне 300...500 долл./кВт возможность применения технологии ЦКС на котле П-59 Рязанской ГРЭС не рассматривалась.

В последнее время всё более широко применяются различные способы организации низкотемпературного вихревого сжигания.

Технология низкотемпературного вихревого (НТВ) сжигания была разработана в 70-х годах на кафедре «Реакторо- и парогенераторостроение» Ленинградского политехнического института им. М.И. Калинина (ныне СПбГПУ) под руководством профессора В.В. Померанцева. В основу технологии положен принцип сжигания топлива угрубленного помола в условиях многократной циркуляции частиц топлива в топке. Обязательным конструктивным решением при организации такого процесса является расположение горелочных устройств на фронтальной стене топки с осуществлением подвода нижнего дутья (сопловой конструкции) через устье холодной воронки вдоль фронтального ската под горелки. В НТВ-топке создаются две зоны горения: вихревая (занимает нижнюю часть топки) и прямоточная (в надгорелочном объеме топки).

Кроме того, реализуется идея ступенчатого сжигания, что в сочетании с пониженным уровнем температур в камере сгорания позволяет обеспечить нормативные выбросы NO_x и SO_2 . Применение НТВ-процесса упрощает эксплуатацию, повышает надёжность и маневренность котла, обеспечивает взрывобезопасность пылеприготовительных систем за счёт угрубления пыли, снижает затраты на пылеприготовление и повышает технико-экономические показатели котельной установки. Необходимо отметить успешное внедрение НТВ-технологии при энергетическом использовании высоковолажных бурых углей на ТЭЦ г. Кумертау и безмельничном сжигании таких низкосортных и взрывоопасных топлив как торф (котлы БКЗ-210-140 Тюменской ТЭЦ), гидролизный лигнин (котлы Е-75-40К, Е-50-24К) и бурый уголь (котел БКЗ-420-140 Усть-Илимской ТЭЦ) и др. К настоящему времени в промышленной эксплуатации находятся более 30 котельных установок паропроизводительностью от 5 до 117 кг/с.

Но конструктивная особенность топок с НТВ, которая, как правило, предусматривает фронтальное расположение горелок и сопловой вариант подвода нижнего дутья, ограничивает область их применения. В область применения не попадают топки с тангенциальным расположением горелок, топки современных мощных котлов с двухъярусным расположением горелок на боковых стенках топки и др. Сопловой вариант подвода нижнего дутья будет ограничивать степень угрубления помола, так как по мере угрубления топлива потребуется увеличивать скорость нижнего дутья и появится опасность эрозионного износа фронтального экрана.

Применение классической схемы НТВ-сжигания на котле П-59 потребовало бы проведения больших и длительных работ по реконструкции горелочных

устройств, низа «холодной воронки» для установки сопел нижнего дутья и аэродинамического фронтального выступа.

Технология низкоэмиссионного вихревого сжигания (ВИР - технология). В связи с вышеуказанными конструктивными проблемами за основу, при техническом перевооружении первой очереди Рязанской ГРЭС, была принята технология низкоэмиссионного вихревого сжигания (ВИР-технология), разработанная предприятием «Политехэнерго» и реализованная более чем на 20 котлах паропроизводительностью от 14 до 78 кг/с на электростанциях США, Польши и Чехии при различной компоновке горелочных устройств (на боковых экранах, с настенным или тангенциальным расположением).

ВИР-технология является дальнейшим развитием и усовершенствованием НТВ-способа сжигания. Используя все преимущества НТВ-топки ЛПИ, ВИР-технология имеет и существенные отличия. Кроме вихревой низкоэмиссионной зоны горения в нижней части топочной камеры, загруженной топливом и, потому, имеющей избытки воздуха ниже стехиометрического, над ней за счет дополнительного горелочного потока создается зона дожигания с избытком воздуха выше стехиометрического. Кроме того, специально разработанное низкоскоростное дефлекторное устройство нижнего дутья позволяет снизить скорость потока в топке и, тем самым, избежать эрозионного износа экранов при угрублении помола до $R_{1000} = 10...20\%$, работая в беспровальном режиме. Особая организация горелочного потока с разным углом наклона и разной загрузкой по количеству и качеству топлива, с разными расходами воздуха по ярусам горелок (если имеется более одного яруса) позволяет применять новую технологию к топкам с боковым расположением горелок, к тангенциальным топкам и т.д. Проведённые расчёты показали, что затраты на модернизацию котельной установки с использованием ВИР-технологии составляют ориентировочно 3...5 долларов на 1 (один) кВт установленной мощности оборудования и с гарантией окупаются через 1...2 года эксплуатации. Реконструктивные мероприятия не затрагивали тепловой и гидравлической схем котла, объёмы работ не требовали длительных остановов и могли быть проведены в рамках плановой ремонтной компании блока.

В третьей главе рассмотрен проект реконструкции котлов П-59 Рязанской ГРЭС, проведено его технико-экономическое обоснование, просчитаны возможные риски реализации проекта.

В соответствии с вышеописанной концепцией выбора замещающей технологии был разработан проект модернизации котла ст. № 2, с целью обеспечения длительной бесшлаковочной работы блока. Проект выполнялся под руководством и при непосредственном участии автора диссертации. Объем модернизации включал в себя:

- наклон горелочных устройств верхнего и нижнего ярусов горелок;
- для увеличения скорости в пылепроводах и для увеличения загрузки топливом нижней части топки количество работающих горелок верхнего яруса уменьшается вдвое путем отключения от каждой мельницы одного пылепровода, идущего к верхнему ярусу;

- монтаж дефлекторно-соплового устройства нижнего дутья в шлаковых комодах по перекрестной схеме с подводом части вторичного воздуха;
- модернизация на первом этапе сепараторов четырех из восьми мельниц для угрубления помола;
- монтаж воздухопроводов нижнего дутья с установкой дополнительных клапанов с ручным управлением;

Предложенные мероприятия должны были обеспечить следующие эффекты:

- подача пыли грубого помола в топочную камеру снизит активность минеральной части из-за сокращения поверхности реагирования;
- вихревая аэродинамика обеспечит интенсивное перемешивание топочных газов по ширине и глубине топочной камеры, что приведет к снижению и выравниванию температур;
- снижение максимальной температуры в топке на 120...150 °С, а перед КПП на 60...80 °С.
- повышение коэффициента тепловой эффективности топки до $\varphi = 0,4...0,5$.

По проекту модернизация не затрагивает пароводяной тракт котла; не усложняет технические условия эксплуатации и ремонта котла; не ухудшает условия техники безопасности и пожароопасности при обслуживании котельной установки. Эксплуатационные издержки будут сокращены за счет того, что:

- бесшлаковочная мощность блока будет доведена, как минимум, до 250 МВт;
- количество остановов на расшлаковку будет снижено в 3...4 раза;
- к.п.д. котла повысится на 2...3%;
- к.п.д. электрофильтров повысится вследствие уменьшения объемов продуктов сгорания и температуры уходящих газов;
- эмиссия NO_x в уходящих газах не будет превышать установленных норм;
- снизится концентрация SO_2 в дымовых газах.

Результаты теплового расчета котла П-59 показали, что после модернизации основные параметры пароводяного тракта сохраняют заложенные при проектировании величины в диапазоне нагрузок $(0,75...1,0) D_{\text{ном}}$.

Расчет коммерческой эффективности (финансовое обоснование) проекта, определяющий соотношение финансовых затрат и результатов, обеспечивающих требуемую норму доходности для инвесторов, выполнен на основе программного комплекса «ENERGY-INVEST». Программа производства и реализации продукции сформирована на основе плана реализации электро- и теплоэнергии на 2002 г. Тарифы на энергию приняты действующие в тот момент (313,44 руб. за 1 МВт·час, 49726 руб.·мес. за 1 МВт установленной мощности, 242 руб. за 1 Гкал).

По предварительным расчетам модернизация котлоагрегата П-59 приведет к снижению расхода топлива на 4,3 тонны натурального топлива в час (прирост КПД котла 1,5 %), что снизит условно переменные затраты на 11,913 млн. руб. в год. Кроме того, в результате реконструкции произойдет снижение расхода электроэнергии на собственные нужды (за счет вывода из работы 2-х мельниц)

и соответственно увеличится отпуск с шин на 648 000 кВт·час или 0,2 млн. руб. в год. Также на результат повлияет снижение затрат на расшлаковку котлоагрегата, вынужденные пуски-остановы что в свою очередь приведет к увеличению выручки на 0,9 млн.руб.

При финансово-экономическом анализе проведена оценка чувствительности проекта к изменению технических и экономических условий его реализации.

При оценке рисков принималось изменение параметров на 30% в сторону увеличения и уменьшения.

Согласно предварительному прогнозу показателей инфляции до 2004 года, утвержденным Минэкономразвития России, увеличение цены на топливо в период 2002...2004 гг. должно составлять не более 9 %, при этом ожидаемый рост тарифов на электроэнергию не более 26 %. Фактическое отклонение роста цены на топливо от роста цен тарифов не должно превышать 8 %, при этом проект может считаться устойчивым.

Предотвращенный экологический ущерб от загрязнения атмосферного воздуха представляет собой оценку в денежной форме положительных последствий от снижения выбросов загрязняющих веществ в результате реконструкции котла. Расчет предотвращенного ущерба выполнен с соответствии с Методикой определения предотвращенного ущерба, утвержденной председателем Госкомэкологии России 30.11.99 г. Величина предотвращенного ущерба составила 11 184,68 тыс. руб. при реконструкции одного котла, для двух – предотвращенный экологический ущерб составит 22 369,928 тыс. руб.

Таким образом, реконструкция котлов П-59 в целом была признана технически реализуемой и экономически и экологически целесообразной.

В четвёртой главе изложены основные результаты испытаний котла ст. № 2 и последующей промышленной эксплуатации двух реконструированных котлов ст.№№ 2 и 3 после их модернизации на низкоэмиссионное вихревое сжигание.

Перевод котла на сжигание топлива по новой технологии привел к **снижению абсолютных температур газов в топочной камере** и снизил их неравномерность. На рис. 1 представлена зависимость изменения средней температуры газов по высоте топки.

Зона максимальных температур располагается между отметками 9,6 и 20,0 м с максимумом на отметке 15 м. В целом по всей серии проведенных опытов в диапазоне нагрузок 180...280 МВт при работе котла средняя величина максимальных температур в зоне активного горения изменяется в пределах 1300...1350 °С, а локальные значения достигают 1400 °С и располагаются в приосевой области топки. Переход на вихревую технологию сжигания растянул зону активного горения в нижнюю часть топки, о чем свидетельствует достаточно высокая температура в зоне холодной воронки (1250...1290 °С).

Температура газов на выходе из топки при нагрузках 250...289 МВт составляет 1020...1050⁰С. При работе проектных (R₁₀₀₀=1...3 %) пылесистем величина температуры газов на выходе из топки в среднем на 30...40⁰С выше.

Не вполне методически строгий, но наглядный результат получен при измерении температуры газов зондами через лючки $\nabla 52,8$, согласно которому измерена одинаковая температура газов при нагрузке $N_{эл}=180$ МВт на не реконструированном котле ст. №1 и при нагрузке $N_{эл}=280$ МВт на реконструированном котле ст. №2. С привлечением полученных при экспериментальном сжигании данных о зависимости $\vartheta_T'' = f(N_{эл})$ это соответствует снижению температуры ϑ_T'' примерно на 140 °С.

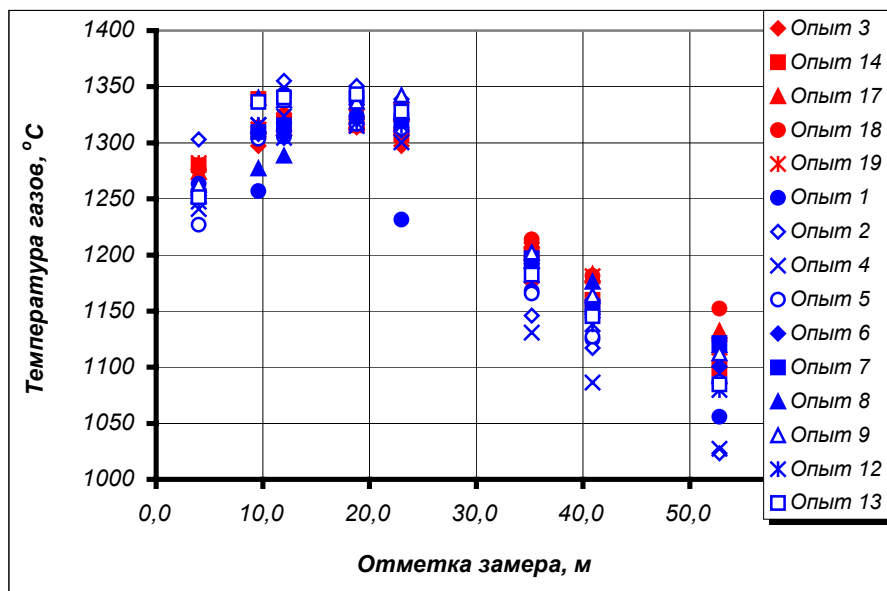


Рис. 1. Зависимость средней температуры газов по высоте топки

Результаты изучения интенсивности роста шлаковых отложений (шлакования) показывают, что в области высоких температур газов (выше 1150 °С) интенсивность шлакования при низкоэмиссионной вихревой технологии сжигания примерно в два раза ниже, чем при традиционном сжигании.

Инструментальное определение прочности проб отложений достаточных размеров (толщина корки > 15 мм) также показало их низкую прочность ($\sigma_{сж}$ составила $\leq 3,0$ кг/см²). Полученные результаты позволяют классифицировать образующиеся шлаковые отложения как рыхлые (по классификации ВТИ к этому типу отложений относятся имеющие прочность на сжатие < 10 кг/см², легко растирающиеся пальцами).

Определяющим фактором уменьшения шлакования экранов при вихревой технологии сжигания является снижение тепловой нагрузки в зоне активного горения. Влияние этого фактора хорошо известно, и как основное мероприятие по предотвращению шлакования он лимитируется в виде теплового напряжения зоны активного горения ($q_{лг}$). Причем определяющим является не абсолютный уровень этой характеристики котла, а её соответствие сжигаемому углю и конструкции топки. При превышении $q_{лг}$ допустимого для каждого угля значения (что имеет место, например, на котлах П-64, П-67) наблюдается интенсивное шлакование экранов и значительный (до 170 °С) рост температур на выходе из топки.

В отличие от традиционной схемы сжигания, где основное выгорание топлива происходит в поясе горелок и примыкающих к нему областях, при применении новой технологии горение сосредоточено по всей топке, что ведет к снижению удельной тепловой нагрузки на поверхности нагрева в зоне горения. Определяющим фактором в снятии ограничений по шлакованию при переходе на ВИР-технологии, является не просто увеличение активно работающей лучевоспринимающей поверхности, а уменьшение тепловых нагрузок на нее в зоне горения и, соответственно, шлакования.

Принципиальным вопросом при проведении опытных сжиганий непроектных углей является возможность перенесения полученных в ограниченный период времени результатов на перспективу длительной или постоянной работы оборудования на этих углях. Для углей, не образующих на поверхности нагрева прочных первичных (железистых, сульфатно-кальциевых) отложений стабилизация уровня шлакования и загрязнения достигается достаточно быстро, и полученные при опытных сжиганиях результаты могут уверенно переноситься на условия длительного использования этого топлива.

Тепловая эффективность топочной камеры за период опытного сжигания оставалась практически стабильной ($\psi_T = 0,37...0,38$) и существенно выше, чем до проведенной реконструкции (в основном за счёт обеспечения высокой тепловой эффективности нижней радиационной части (НРЧ), $\psi_{НРЧ}=0,50...0,55$) (рис. 2).

Тепловая эффективность средней радиационной части (СРЧ) и верхней радиационной части (ВРЧ) осталась на прежнем уровне и даже несколько снизилась за счёт снижения общего пирометрического уровня в топке ($\psi_{СРЧ} = 0,26...0,28$; $\psi_{ВРЧ} = 0,3...0,38$).

П-59 16.04.02

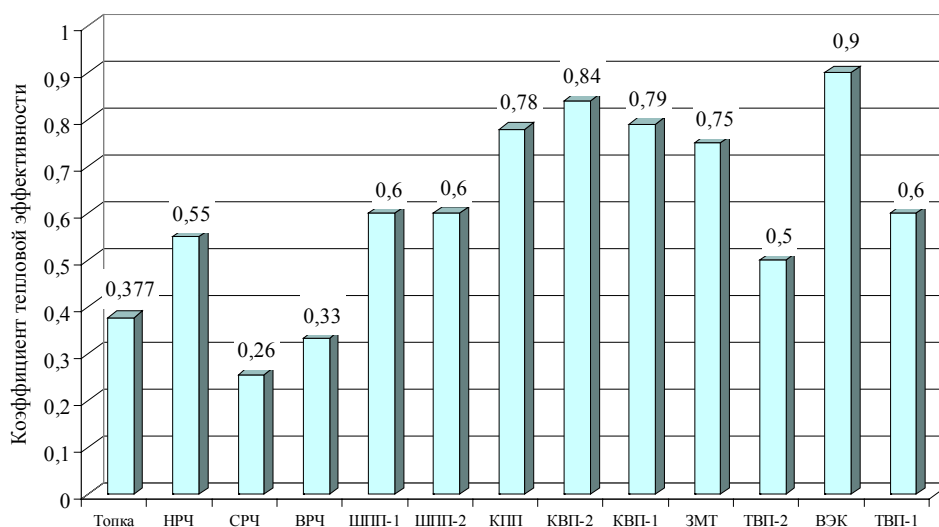


Рис. 2. Коэффициенты тепловой эффективности (использования) поверхностей нагрева котла П-59 ст. № 2 в опыте 16.04.02

Новая технология сжигания обеспечила наибольшую тепловую эффективность конвективных поверхностей нагрева по сравнению с котлами, сжигающими Канско-Ачинские угли.

Таким образом, опыт эксплуатации котла после модернизации и результаты комплексных испытаний показали, что в результате реконструкции бесшлаковочная мощность блока была увеличена с 200 до 280 МВт.

Как показали испытания, при поддержании оптимального расхода и распределения организованного воздуха в диапазоне нагрузок блока 185...275 МВт концентрация NO_x не превышает нормативных удельных выбросов в атмосферу – 300 мг/нм^3 ($\alpha = 1,4$) (рис. 3).

Минимально достигнутые значения концентраций NO_x составили 177 мг/нм^3 . Оптимальные значения NO_x получены при значениях $\text{CO} < 60 \text{ мг/нм}^3$ ($\alpha = 1,4$). Таким образом, после модернизации выбросы NO_x снизились на 30...40 % и не превышают нормативов удельных выбросов в диапазоне нагрузок блока 180...275 МВт. Снижение концентрации NO_x стало возможным благодаря реализации идеи ступенчатого сжигания, как способа создания восстановительных зон, в которых происходит разложение «топливных» оксидов азота с реакцией восстановления до N_2 , в сочетании с пониженным температурным уровнем в нижней части топки, максимально сокращающим уровень образования «термических» оксидов азота.

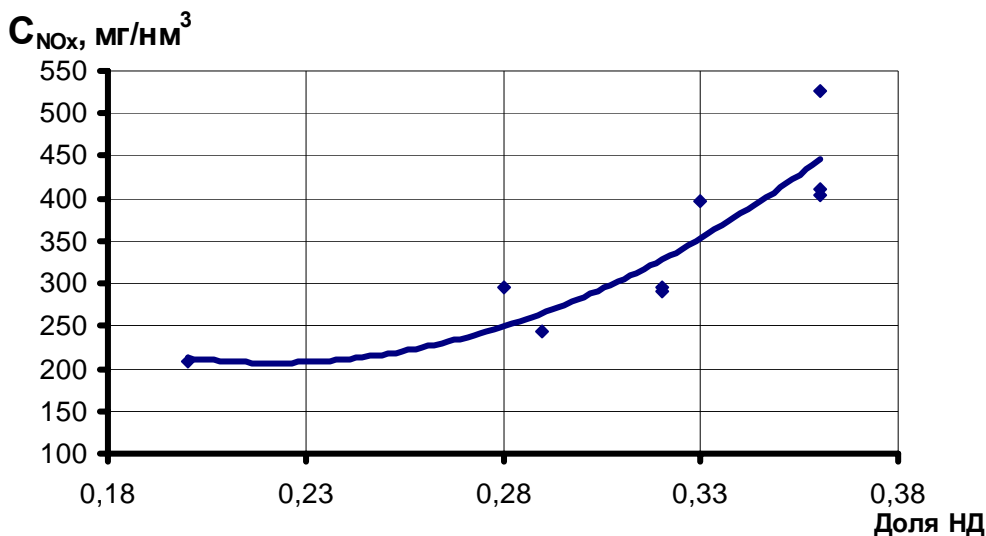


Рис. 3. Зависимость средней концентрации NO_x от доли воздуха на нижнее дутьё

Выбросы SO_2 . Концентрация оксида серы в уходящих газах в период испытаний изменялась в диапазоне $600...840 \text{ мг/нм}^3$ ($\alpha = 1,4$) ($1200 - 1800 \text{ мг/нм}^3$ при сжигании в 1997 г.) и зависела, главным образом, от максимальной температуры факела (рис. 4).

Уменьшение температуры с 1400 до $1350 \text{ }^\circ\text{C}$, т.е. на $50 \text{ }^\circ\text{C}$, приводит к снижению концентрации SO_2 на 25...30 %. По данным ВТИ и УралВТИ, в силу бо-

лее низкой температуры топочных газов при ВИР-технологии наблюдается более высокая степень сульфатизации летучей золы и, соответственно, эффективность связывания серы по сравнению с традиционным сжиганием примерно на 20...25 %.

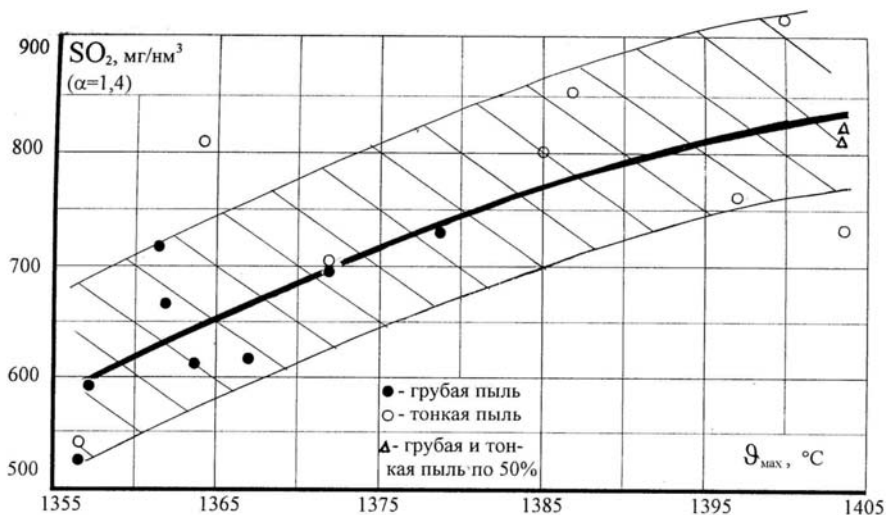


Рис. 4. Концентрация оксидов серы

Экономические показатели работы котлоагрегата. После модернизации за счет снижения загрязнений и улучшения тепловой эффективности поверхностей нагрева котла температура уходящих газов за дымососом снизилась на 20...30 °C и при $N_{эл} = 270...280$ МВт находилась в пределах 170...185 °C при величине $\alpha_{ух} = 1,8...1,85$. Величина потерь с уходящими газами (q_2) была равна 11,9...12,5 %.

Во время испытаний 1997 г. (до модернизации) при меньших нагрузках (240...250 МВт) и практически таких же $\alpha_{ух} = 1,73...1,85$, температура уходящих газов за дымососом была равна 200 °C, а величина q_2 составляла 14,0...17,0 %.

Несмотря на то, что средние потери тепла от механической неполноты сгорания превысили величину соответствующих потерь до модернизации на 1,5...2,5%, в целом можно констатировать, что после модернизации к.п.д. «брутто» котлоагрегата ст. № 2 вырос на величину порядка 1...2 %.

Кроме того, по утвержденным нормативным характеристикам повышение беспыльчатой мощности блока с 200 до 260...280 МВт обеспечивает снижение удельных расходов условного топлива на 12...15 г/кВт·час, что равнозначно увеличению к.п.д. котла еще на 3...4 %.

Среднеэксплуатационное угрубление пыли на выходе из пылесистем привело к заметному увеличению кампании работы бил и сокращению удельных расходов электроэнергии на размол. По данным проведенных опытов, произошло снижение удельных расходов электроэнергии на размол на 20...30% с 8...10 кВтч до 6...7 кВтч на тонну размолотого топлива, за счет суммарного

эффекта от угрубления пыли и увеличения среднеэксплуатационной производительности пылесистем.

Во всех режимах параметры первичного и промежуточного пара (давление и температура) имели значения близкие к расчетным, причем в большинстве режимов сохранялся запас по регулированию температуры первичного $T_{оп}$ и промежуточного пара $T_{пп}$.

Таким образом, можно считать, что результаты испытаний подтвердили приведенные выше экономические расчеты и теоретические положения.

В течение подконтрольной эксплуатации в 2002 – 2003 годах на модернизированном котлоагрегате ст.№ 2 проводились периодические экспресс-испытания с целью определения технико-экономических показателей работы котла и, в первую очередь, в плане снижения потерь с механической неполнотой сгорания.

С мая 2002 года энергоблок ст. № 2 отработал 6572 часа при средней эксплуатационной нагрузке 220...240 МВт (с учетом ночных разгрузок). За весь указанный промежуток времени остановов котла для расшлаковки не проводилось ни разу. Периодические осмотры конвективных шахт котла свидетельствуют об отсутствии каких-либо золовых отложений на конвективных поверхностях нагрева котла.

По результатам проведённых испытаний было принято решение о реконструкции ещё одного котла П-59 Рязанской ГРЭС (ст. № 3) с переводом его на низкоэмиссионное вихревое сжигание угля. Для возможности определения путей совершенствования внедрённой технологии, на котле была применена отличная от котла ст.№ 2 схема подачи пыли в горелки котла. На нижний ярус горелок подавалась более угрублённая пыль с $R_{1000} = 18...25\%$, на верхний ярус более тонкая пыль, со значением соответствующим проектному $R_{1000}=1...3\%$. Расход вторичного воздуха на нижнее дутьё изменялся в пределах 0,2...0,3 общего расхода воздуха.

Проведённые испытания на котле ст.№ 3 позволили сформировать основные положения и требования при проведении модернизации котлов на низкоэмиссионное вихревое сжигание:

- Была определена оптимальная, по условиям надёжной и экономичной работы котла, тонина помола с $R_{1000}=10...12\%$.
- выявлено оптимальное соотношение топлива и воздуха по всему диапазону нагрузок (загрузка пылесистем и их оптимальное количество).
- определены основные параметры нижнего дутья, позволяющие обеспечить высокую равномерность топочного режима и нормативные экономические показатели работы котла ($W_{нд}=50...70\text{м/с}$)
- определены направления работы по дальнейшему конструктивному совершенствованию технологии (низко-скоростное дефлекторное устройство, оптимизация схемы подогрева воздуха).

За всё время работы после реконструкции котлов энергоблоки ст. № 2 и 3 ни разу не останавливались из-за появления свищей в трубах нижней радиационной части котла. После более чем двухгодичного опыта эксплуатации так и не

нашло подтверждения предположение о повышенном абразивном износе труб в нижней части топки. Замеры, проводимые специалистами Лаборатории металлов и сварки ОАО «Рязанская ГРЭС» во время ремонтных кампаний и периодических остановов блока, ни разу не зафиксировали какого-либо утонения труб «холодной воронки».

Тем не менее, на реконструированных котлах проводятся дальнейшие работы по оптимизации внедрённой технологии в плане повышения экономических показателей и возможности сжигания более широкого спектра углей, включая каменные.

В заключении приведены основные выводы по работе, главные из которых следующие:

1. Изменения в политико-экономической ситуации в стране ставит перед руководством большого числа электростанций задачи, связанные с необходимостью продления паркового ресурса оборудования и поисками альтернативных источников топливоснабжения. При этом крайне важным становится вопрос разработки стратегической концепции технического перевооружения электростанции.
2. Анализ работы котлов П-59 после перевода с проектного (подмосковный бурый уголь) на другое, даже более калорийное топливо (березовский бурый уголь) показал, что при сохранении традиционной технологии сжигания не удается обеспечить соответствие оборудования современным требованиям по надежности, экономичности и экологической безопасности.
3. Анализ существующих технологий сжигания топлив позволил выбрать современную многократно апробированную технологию, позволяющую при минимальных затратах (не затрагивается тепловая схема котла) комплексно повысить надежность и экономическую эффективность работы котельного агрегата при обеспечении существующих норм по уровню вредных выбросов.
4. Разработаны и практически подтверждены основные конструктивные и режимные параметры по внедрению низкоэмиссионной вихревой технологии сжигания на пылеугольных котлах Рязанской ГРЭС.
5. Экспериментально проверено и подробно проанализировано влияние процесса подготовки и сжигания топлива на поведение его минеральной части, интенсивность шлакования экранов и загрязнение конвективных поверхностей нагрева в котлоагрегате мощного энергоблока при энергетическом использовании березовского угля.
6. Впервые получен совокупный научный результат по обеспечению бесшлаковочной мощности, повышению экономичности и значительному снижению вредных выбросов при сжигании Березовских углей на энергоблоках Рязанской ГРЭС.
7. Выявлено и экспериментально доказано, что Березовские угли Канско-Ачинского бассейна при правильном выборе технологии сжигания не являются шлакующими, что расширяет возможность использования на отечественных электростанциях углей указанного бассейна, который является без-

условным лидером в России по запасам, соответствующим мировым условиям, и наряду с Кузбассом является основой энергетической безопасности России.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Гурылёв О.Ю. Повышение эффективности пылеугольного котла при переходе на сжигание непроектного угля на примере котлов П-59 ОАО «Рязанская ГРЭС» // Промышленная политика в Российской Федерации. 2004. № 3 – 0,44 п.л.
2. Гурылёв О.Ю. Внедрение малозатратных технологий, как один из механизмов снижения издержек производства электроэнергии // Экономика и финансы электроэнергетики. 2004. № 4 – 0,44 п.л.
3. Повышение надежности и экологической безопасности котлов при сжигании непроектных топлив после сверхдлительной эксплуатации /Ахмедов Д.Б., Финкер Ф.З., Гурылев О.Ю. и др. // Обеспечение работы оборудования ТЭС и АЭС после сверхдлительной эксплуатации. СПб. 2002. – 0,4 п.л. (авт. – 0,1 п.л.)
4. Модернизация котлов Рязанской ГРЭС на низкоэмиссионное вихревое сжигание канско-ачинских углей / Ф.З.Финкер, О.Ю.Гурылёв, Д.Б.Ахмедов и др. // Энергетик. 2003. № 2. – 0,53 п.л. (авт. – 0,2 п.л.)
5. Гурылев О.Ю., Поликарпов И.В., Финкер Ф.З. Опыт внедрения ВИР-технологии сжигания угля на Рязанской ГРЭС // Электрические станции. 2003. № 12. – 0,71 п.л. (авт. – 0,4 п.л.)
6. Gurylev O.Yu., Polikarpov I.V., Finker F.Z. VIR-Process of Coal Firing at the Ryazanskaya State Regional Power Plant // Power Technology and Engineering. 2003. № 37(6) – 0,31 п.л. (авт. – 0,2 п.л.)
7. Гурылёв О.Ю., Морозов В.В. Основные направления повышения эффективности Программы управления издержками ОАО «Рязанская ГРЭС» // Промышленная политика в Российской Федерации. 2003. № 5 – 0,94 п.л. (авт. – 0,6 п.л.)

Лицензия ЛР № 020593 от 7.08.97

Подписано в печать 27.04.2004
Тираж 120 экз.

Объем в п.л. ____
Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета,
предоставленного автором,
в типографии Издательства СПбГПУ
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

Отпечатано на ризографе RN-2000 FP
Поставщик оборудования — фирма “Р-ПРИНТ”
Телефон: (812) 110-65-09
Факс: (812) 315-23-04