

УДК 621.18:536.24(045)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И МОДЕРНИЗАЦИЯ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ КОТЛА П-67 БЛОКА 800 МВт

В.В. БЕЛЫЙ¹, С.В. ПОРОЗОВ¹, В.В. ВАСИЛЬЕВ², А.А. ДЕКТЕРЕВ³, Е.С. ТЭПФЕР⁴

¹*Березовская ГРЭС-1, Шарыпово,*

²*СибВТИ (“Сибирский теплотехнический научно-исследовательский институт ВТИ” Красноярского филиала ОАО “Сибирский энергетический научно-технический центр”), Красноярск,*

³*Институт теплофизики СО РАН, Красноярск,*

⁴*Красноярский государственный технический университет*

С целью разработки и внедрения мероприятий, направленных на повышение беспылевочной мощности, экономичности и надежности котла П-67 блока 800 МВт Березовской ГРЭС-1, изучалось изменение теплотехнических характеристик угля разреза “Березовский-1” и его шлакующих свойств, математически моделировались аэродинамика, теплообмен, образование оксидов азота и интенсивность локального шлакования для различных режимов эксплуатации и вариантов реконструкции топочно-горелочного устройства, экспериментально исследовалась тепловая эффективность топочных экранов котла в длительной эксплуатации, в том числе после механической очистки, модернизации системы водяной обдувки, при сниженных избытках воздуха, угрублении угольной пыли, загрузке нижних ярусов горелок и нижнем дутье.

Энергетическая стратегия России на период до 2020 г. предполагает рост электропотребления 1,8–2,5 % в год. До 15 ГВт генерирующих мощностей планируется ввести на тепловых электростанциях Сибири. Растущая потребность электростанций в угле может быть обеспечена в значительной степени за счет Канско-Ачинского бассейна, где в эксплуатации находятся 3 крупных (Бородинский, Назаровский, Березовский) и ряд небольших разрезов. В отношении наращивания открытой добычи одним из перспективных является Березовское месторождение, характеризующееся низкой зольностью и содержанием серы, однако шлакующие свойства березовского угля сдерживают расширение его поставок на действующие ТЭС, где, как правило, снижается максимальная мощность котлов и длительность их непрерывной кампании.

На котлах П-67 блоков мощностью 800 МВт Березовской ГРЭС-1 [1], специально спроектированных для сжигания березовского угля, за более чем 10 лет эксплуатации не удалось решить эти проблемы, несмотря на то, что в разработке котла, испытаниях, моделировании его узлов, проектировании, проведении опытных сжиганий, освоении и исследованиях принимали участие несколько институтов, ЗиО (Завод им. Орджоникидзе, г. Подольск) и ряд других машиностроительных заводов. Запаздывание ввода угольного разреза “Березовский-1” в 80-х годах прошлого века и опытно-промышленного котла Е-500 привело к тому, что проектирование котла П-67 велось без необходимого длительного опыта работы энергетических котлов на березовском угле.

Первый блок Березовской ГРЭС-1 был пущен в эксплуатацию в марте 1988 г., второй — в апреле 1991 г. Рост на топочных экранах прочных наружных отложений без стабилизации продолжался несколько лет. Это обесценило результаты

предпроектных кратковременных опытных сжиганий. Кроме того, при подаче березовского угля ухудшенного качества ($Q_f' < 3500$ ккал/кг), работе семи мельниц-вентиляторов МВ 3300/800/490 и среднеэксплуатационном износе рабочих лопаток возникали ограничения нагрузки блока на 10–15 % в связи с недостаточной размольной производительностью мельниц.

В ходе эксплуатации котлов П-67 при нагрузках, близких к номинальной, проектная температура газов на выходе из топки (1032 °С) превышалась более чем на 100 °С. Не удалось снизить максимальную температуру факела до рекомендуемой (1250 °С) в известной концепции “низкотемпературного” сжигания. Испытания не подтвердили расчеты разработчиков котла, что тангенциальная топочная камера в сочетании с газовой сушкой топлива обеспечат образование небольшого количества оксидов азота, допустимого для мощных блоков (370 мг/нм³).

На основании результатов балансовых испытаний котлов было подтверждено снижение беспыльчатой мощности котлов и тепловой эффективности топочных экранов за длительный период эксплуатации. Этот процесс продолжался, несмотря на модернизацию горелок с установкой рассекателей, наладку и увеличение числа маловыдвижных аппаратов водяной обдувки типа ОВМ, сокращение межобдучного периода, повышение ремонтных и эксплуатационных затрат на систему очистки [2–4]. Поэтому в 2000 г. энергоблоки были перемаркированы на 700 МВт. Основаниями для ограничения мощности энергоблоков явились низкая интенсивность теплообмена в топке, прогрессирующее шлакование топочной камеры, сопровождающееся ростом максимальных температур газов в поворотной камере, образование глыб шлака, которые при падении повреждали шнеки и комоды холодной воронки. Локальное шлакование скатов холодной воронки приводило к перекрытию шнеков и вынужденным остановам котлов.

Высокие температурные напряжения в зоне лючков цельносварных экранов, наличие исходных дефектов (трещин), неравномерность локального шлакования и частая, не всегда обоснованная водяная обдувка, в том числе при низких нагрузках, привели к интенсификации повреждений труб НРЧ (нижняя радиационная часть топочных экранов) с образованием сквозных коррозионно-усталостных трещин, чего ранее не наблюдалось на других мощных блоках при очистке водой за более длительный период эксплуатации (блоки 300 МВт Рязанской ГРЭС). Это противоречило известным выводам о стабилизации глубины трещин в поверхностном слое металла труб при автоматизированной водяной обдувке.

Таким образом, анализ результатов исследований и длительной эксплуатации показал, что основными причинами ошибочных расчетов суммарного теплообмена в топке котла П-67 с тангенциальным многоярусным расположением горелок явились:

- завышенный расчетный коэффициент тепловой эффективности топки, поскольку при проектировании кроме норм теплового расчета специалисты опирались только на результаты стендовых исследований и недостаточных по длительности опытных сжиганий березовского угля на котлах малой мощности; не было данных о медленной (в течение нескольких лет) стабилизации прочных отложений на топочных экранах; значительную роль также сыграл масштабный фактор;
- неравномерное шлакование экранов, отсутствие эффективной системы водяной обдувки и наличие значительных по площади неочищаемых зон.

Кроме того, неожиданным оказалось шлакование в низкотемпературных неочищаемых зонах на выходе из топки (ВРЧ — верхняя радиационная часть топочных экранов), т. к. локальные коэффициенты тепловой эффективности снизились до 0,1. Это опровергало часто применяемое понятие “критическое” по условиям шлакования падающего теплового потока для березовского угля.

Не оправдались надежды на частичную саморасшлаковку экранов в период сброса нагрузок и остановов котлов, что обычно наблюдается при сжигании других углей Канско-Ачинского бассейна (бородинского, назаровского и др.).

С развитием оптового рынка электроэнергии, созданием генерирующих компаний и повышением конкуренции решающими факторами успешного развития ГРЭС становится повышение максимальной базовой бесшлаковочной мощности и экономичности котлов, снижение издержек, связанное с сокращением числа и длительности вынужденных остановов.

При выполнении комплексных научно-исследовательских, реконструктивных и наладочных работ за последние несколько лет решались следующие задачи, связанные с повышением интенсивности теплообмена в топочной камере котла П-67:

1. Изучение изменения и прогнозирование теплотехнических характеристик угля разреза “Березовский-1” и его шлакующих свойств.

2. Математическое моделирование аэродинамики, теплообмена, образования оксидов азота и интенсивности локального шлакования для различных режимов эксплуатации и вариантов реконструкции топочно-горелочного устройства.

3. Экспериментальные исследования тепловой эффективности топочных экранов котла в длительной эксплуатации, в том числе после механической очистки, модернизации системы водяной обдувки (по контракту с фирмой Clyde-Bergemann GmbH), при сниженных избытках воздуха, “угрублении” угольной пыли, загрузке нижних ярусов горелок и нижнем дутье.

4. Исследование и оптимизация системы диагностики шлакования топочных экранов и пирометрического комплекса топки.

5. Техничко-экономическая оценка внедряемых мероприятий по повышению тепловой эффективности топочных экранов и бесшлаковочной мощности котлов.

Расчетный анализ изменения шлакующих свойств топлива выполнялся с использованием компьютерной программы «CORAL» (ВТИ*–УралВТИ). Численные эксперименты топочного процесса проводились с использованием пакета компьютерных программ «σFlow» [5, 6], позволяющих рассчитывать пространственные стационарные и нестационарные ламинарные и турбулентные течения, процессы смешения и диффузии неоднородных газовых смесей, химические реакции в потоке, горение газообразного, жидкого и твердого топлива, конвективный, радиационный теплообмен и процессы теплопроводности, движение дисперсной фазы (твердые частицы, капли) в потоке газа, процессы сушки, пиролиза и горения частиц дисперсной фазы. Математическая модель топочной камеры включала в себя подмодели аэродинамики, сложного теплообмена, движения и горения угольных частиц, образования окислов азота.

Новое программное обеспечение для визуализационного экспресс-анализа результатов вычислительного эксперимента позволило оптимально представить графический материал. Экспериментальные промышленные исследования проводились с учетом требований к теплотехническим испытаниям котельных установок. Для сбора и анализа результатов испытаний впервые использовались данные архива аналоговых сигналов новой информационной системы АСУ ТП ЗАО “Интеравтоматика”, внедренной на Березовской ГРЭС-1. Для обработки опытов применялись программы теплогидравлического расчета «ТРАКТ» (ЗиО), теплового расчета пылеприготовительных установок «STOKER» (ВТИ). Численный анализ термонапряженного состояния металла труб, погрешности измерений температур и тепловых потоков температурными вставками выполнялся по компьютерным программам ВТИ и «ELCUT». Бизнес-план инвестиционного проекта составлялся с использованием рекомендованной РАО «ЕЭС России» программы «ENERGY-INVEST».

* ВТИ — Всесоюзный теплотехнический научно-исследовательский институт, г. Москва.

Обобщение и анализ данных разреза “Березовский-1”, Березовской ГРЭС-1 и СибВТИ по геологическим и товарным пробам угля позволили сделать вывод о том, что среднее качество березовского угля на ближайшую перспективу будет характеризоваться следующими показателями: $Q_i^r = 3750$ ккал/кг при $W_i^r = 34,8$ % и $A^d = 5,7$, $S_i^d = 0,28$, $V^{daf} = 45,7$ %. Основная масса угля (~69 %) разреза “Березовский” имеет зольность $A^d < 6$ %, а количество угля с содержанием серы $S_i^d < 0,3$ % составляет ~80 %. С продвижением добычи сокращается доля угля с повышенной зольностью и высоким содержанием серы, и его шлакующие свойства увеличиваются.

Экспертные рейтинговые оценки этого угля с использованием компьютерной программы «CORAL» подтверждают высокий уровень образования прочных железистых отложений на топочных экранах, эффективность удаления которых низка даже при использовании водяной обдувки, а также сверхвысокий уровень их шлакования (рис. 1).

При выборе и обосновании новых технических решений для снижения температуры газов на выходе из топки, интенсивности локального шлакования топочных экранов и сокращения выбросов оксидов азота выполнялось математическое моделирование топочного процесса.

В качестве математической модели для описания течения в топочной камере была принята модель неизотермического несжимаемого многокомпонентного газа. Для описания турбулентных характеристик течения использовалась $k-\epsilon$ модель турбулентности, адаптированная к высоким числам Рейнольдса.

Высокий температурный уровень топочной среды и поверхностей обуславливает преобладание радиационного теплообмена. Моделирование переноса лучистой энергии основывалось на P1 аппроксимации метода сферических гармоник для серой среды. Достоинством этого метода является его легкая совместимость с методами расчета аэродинамики и теплопереноса, реализованных на криволинейных сетках. Коэффициенты поглощения газа вычислялись по модели суммы серых газов.

Расчет горения летучих компонентов топлива основывался на использовании глобальных необратимых реакций между горючим и окислителем. Скорость горения определялась по модели “обрыва вихря”. Скорость реакции в этой модели ограничивается скоростью турбулентного перемешивания топлива и окислителя.

В настоящей работе для описания процессов движения угольной пыли использовался метод Лагранжа. При моделировании движения частиц основными силами, действующими на частицу, являются сила межфазного взаимодействия (сила аэродинамического сопротивления) и сила тяжести. В процессе движения угольной частицы происходит ее прогрев, сопровождающийся выходом остаточной влаги и летучих, горение летучих и коксового остатка. При описании этих процессов предполагалось, что угольная частица состоит из четырех компонентов: воды, летучих, углерода и золы. Для моделирования процессов горения угольной пыли в настоящей работе была принята модель, основанная на обобщении экспериментальных данных [7].

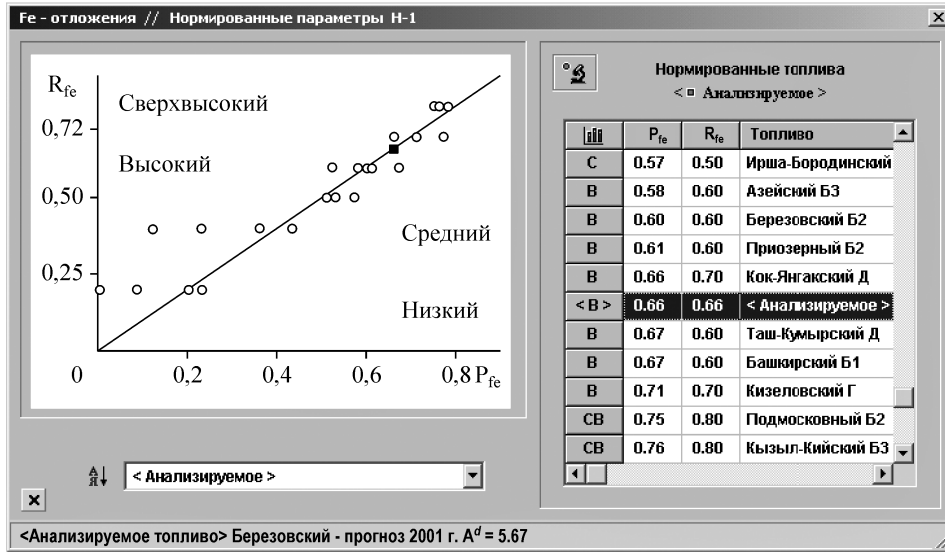
Было принято допущение о тепловом равновесии между газом и частицами и пренебрегалось влиянием частиц на турбулентные свойства газа. Влияние частиц на осредненное движение газа, концентрации газовых компонент и энтальпию учитывалось на основе метода PSI-cell (Particle Source in sell).

В моделировании учитывались три механизма образования окислов азота NO_x : термические NO_x (модель Зельдовича), быстрые NO_x (модель Фенимора) и топливные NO_x .

Эмпирическая модель использовалась для оценки динамики шлакования поверхностей нагрева.

Метод контрольного объема на структурированных криволинейных неортогональных сетках с блочной техникой применен для численной реализации указанных процессов. Для несжимаемых течений связь полей скорости и давления осуществляется применением SIMPLE-C процедуры. Аппроксимация конвективных потоков строится с использованием схем высокого порядка точности. Решение систем линейных алгебраических уравнений достигается эффективными процедурами, основанными на вариационных модификациях метода неполной факторизации Булева.

a



b

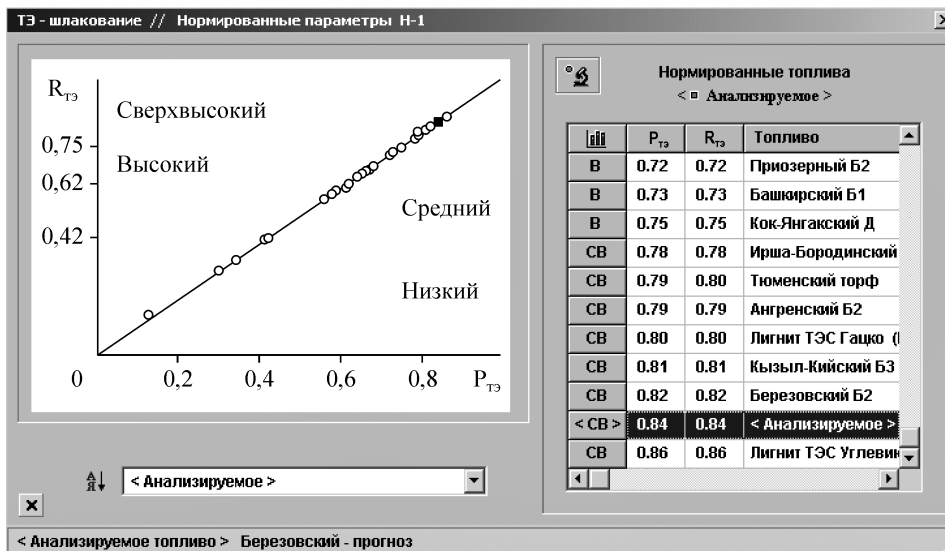


Рис. 1. Результаты экспертной оценки: образования железистых отложений на топочных экранах (a), интенсивности шлакования топочных экранов (b) при сжигании березовского угля.

Выполнялись численные исследования следующих вариантов:

- базовый для “грязного” котла, адаптированный к результатам балансовых опытов 2002 г. при работе восьми мельниц;
- для “эксплуатационно-чистого” котла после предполагаемой механической очистки топочных экранов;
- с малыми избытками воздуха;
- с разворотом четных блоков горелок к центру топки;
- с увеличенным в два раза диаметром крутки факела;
- с воздушными завесами у горелок;
- с двухступенчатым сжиганием по горизонтали (третичное дутье в плоскости горелок, 32 сопла);
- с двухступенчатым сжиганием по вертикали (с одним и двумя ярусами воздушных сопел над зоной активного горения);
- с нижним дутьем (вариант НПО ЦКТИ*);
- с нижним дутьем и соплами третичного дутья у двух верхних ярусов нечетных блоков горелок, в том числе с повышенной загрузкой топливом нижних ярусов горелок;
- с трехступенчатым сжиганием.

Основное внимание уделялось корректному заданию краевых условий, оптимальному сочетанию модельного счета и натурального эксперимента. В качестве исходных данных использовались, кроме достаточно сложных конструктивных параметров горелок и топки, результаты теплогидравлических расчетов котла, адаптированных к базовому опыту. Задавались теплотехнические и гранулометрические характеристики топлива, его элементный состав и расход, расходы и температуры воздуха и рециркулирующих газов, температуры внутренней среды сверхкритического давления и параметры теплообмена в экранных трубах. Термическое сопротивление слоя наружных отложений определялось при адаптации математической модели к базовому опыту по температуре газов на выходе из топки.

Тепловая эффективность топочных экранов до механической очистки принималась равной 0,215 по результатам балансовых испытаний, а после механической очистки предполагалась равной 0,35, что соответствовало результатам испытаний чистого котла после пуска в 1989 г. Варианты 3-10 рассчитывались для “чистого” котла.

Расчетная схема нижнего дутья “перчаточного” типа, предложенная НПО «ЦКТИ», отличается от проектной увеличением размеров сопел в комодах холодной воронки и доли направляемого в них воздуха с 8 до 20 % от теоретически необходимого. Сопла располагаются в устье холодной воронки по встречносмещенной схеме.

Сравнительный анализ расчетных вариантов проводился по таким критериям, как интенсивность наброса факела (максимальная скорость газов по нормали к экрану), интенсивность сепарации частиц на экраны, максимальная температура факела, максимальные объемные и пристенные температуры газов, температура газов на выходе из топки и ее неравномерность, падающие тепловые потоки, выгорание, концентрация оксидов азота, изменение провала в холодную воронку. Расчеты показали, что горелки с рассекателями, по отношению к проектным, обладают более высокой эжекцией на начальном участке факела, что увеличивает наброс частиц на экраны по периметру горелки, но фактическую картину локального шлакования в большей мере определяет общая крутка факела.

Аэродинамическая структура газовых потоков в топочной камере размером 23×23×90 м обладает в базовом варианте высокой неравномерностью. Наблюдается наброс факела в верхней части холодной воронки и между ярусами горелок

* НПО ЦКТИ — Научно-производственное объединение “Центральный котлотурбинный институт” им. И.И. Ползунова, С.-Петербург.

с ростом температур газов в пристенной зоне (рис. 2, *a*). Велики скорости газов (12-20 м/с) в центральной части топки выше зоны активного горения (рис. 2, *b*). Без нижнего дутья малы подъемные скорости в холодной воронке. Избытки кислорода формируются в угловых зонах (рис. 2, *c*), однако выгорание топлива в основном заканчивается до аэродинамического пережима топки (рис. 2, *d*).

Вариант поворота четных блоков горелок к центру несколько снижает интенсивность наброса факела на нечетный блок горелок и скорость роста отложений, но радикально проблема локального шлакования не решается. При повороте только двух верхних ярусов горелок эффект снижается.

Вариант с увеличенным диаметром крутки существенно не меняет исходную картину сепарации частиц на экраны. Скорость роста отложений может возрасти из-за повышения температур газов в пристенной области. Увеличение наклона горелок с целью заполнения холодной воронки и снижения температуры газов на выходе из топки приводит к росту сепарации частиц на скаты холодной воронки. Сокращение или увеличение диаметров крутки третичного воздуха сопл двухступенчатого сжигания по горизонтали снижает эффект защиты от шлакования нечетных блоков горелок.

Для основных вариантов возможной реконструкции на рис. 4–7 представлены изоповерхности интенсивной сепарации (условной скорости роста отложений) для монофракций частиц размером от 100 до 1000 мкм, соударяющихся с топочными экранами. Доля фракций размером 1000 мкм превышает 1,5 %, и они, в силу своих инерционных свойств и химсостава золы, играют существенную роль в процессах локального шлакования скатов холодной воронки, изменении механического недожога КПД котла. Нижнее дутье позволяет углубить помол топлива, чтобы повысить резерв по размольной производительности мельниц-вентиляторов при максимальных нагрузках котла.

Затемненные участки (см. рис. 3) характеризуют зону шлакования с повышенной скоростью сепарации частиц. Для более четкой визуализации и последующего анализа частицы направлялись из одного четного блока горелок в топку. Это допущение достаточно корректно, поскольку известно, что при топочном процессе взаимодействием частиц между собой в факеле можно пренебречь.

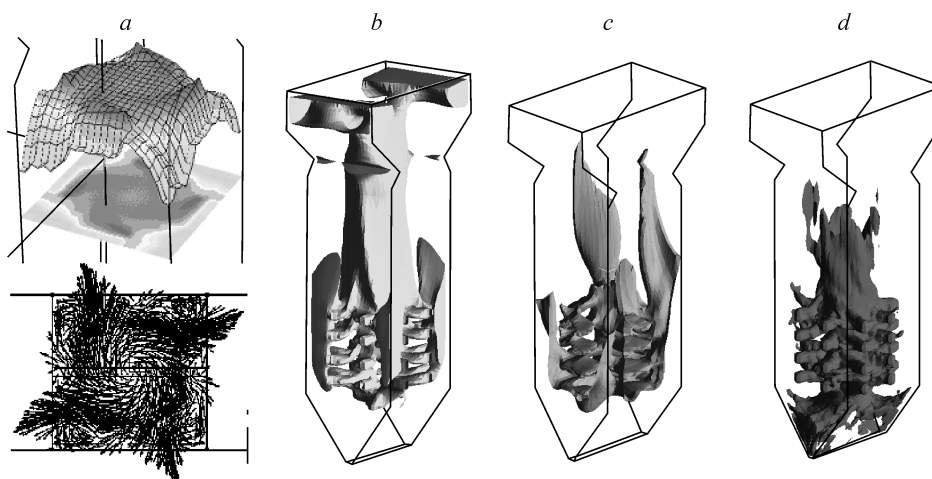


Рис. 2. Результаты математического моделирования топочного процесса.

Поля скоростей (до 12 м/с) и температур газов (до 1400°C) в горизонтальной плоскости зоны активного горения (*a*), изоповерхность скорости газов 12 м/с (*b*), изоповерхность концентрации кислорода 3 % (*c*), границы выгорания топлива (*d*).

Частицы размерами менее 1000 мкм (преобладающие по массе в аэросмеси горелок) в основном следуют по линиям тока и демонстрируют характерную картину шлакования у нечетного блока горелок (рис. 3, *a*, слева). С угрублением пыли увеличивается сепарация в холодную воронку, она также наблюдалась на реальном котле с образованием монолитных отложений, сползающих в шнеки холодной воронки. Разворот горелок нецелесообразен, поскольку не сокращает существенно зоны локального шлакования (рис. 3, *b*). Двухступенчатое сжигание угля по горизонтали исключает шлакование в зоне активного горения, но не решает проблему

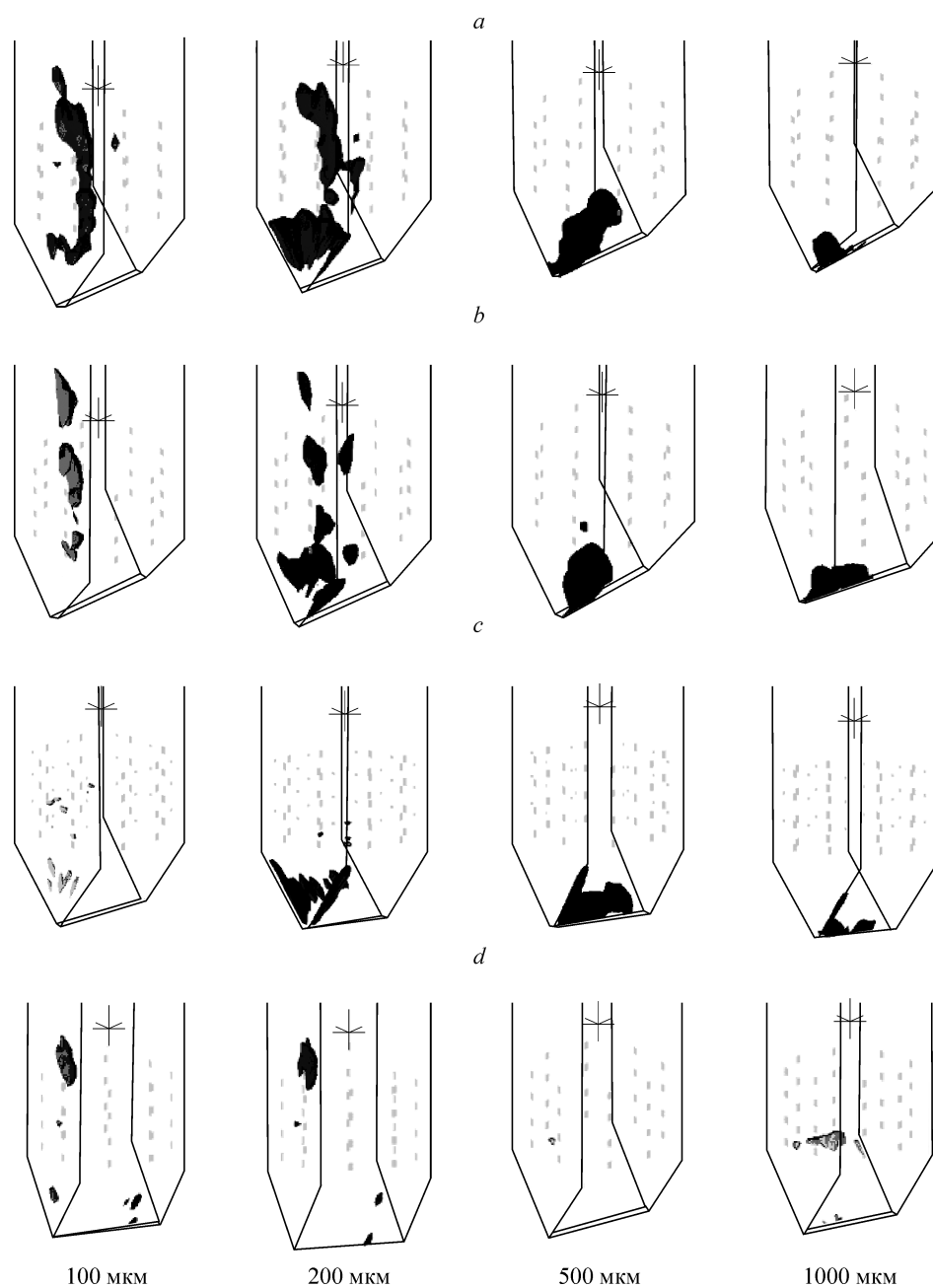


Рис. 3. Зоны максимальной сепарации частиц, варианты: *a* — базовый, *b* — с разворотом четных блоков горелок к центру топки, *c* — с двухступенчатым сжиганием по горизонтали, *d* — с нижним дутьем ЦКТИ.

шлакования холодной воронки (рис. 3, *c*). Нижнее дутье защищает холодную воронку и существенно сокращает наброс частиц в зоне активного горения (рис. 3, *d*), однако неустойчивость факела относительно оси топки приводит к перекосам температур в пристенной области и увеличению неравномерности температур газов на выходе из топки перед ширмами. Увеличение наклона горелок без нижнего дутья с целью заполнения холодной воронки и снижения температуры газов на выходе из топки приводит к росту сепарации частиц на скаты холодной воронки.

Наилучшие результаты по снижению интенсивности локального шлакования могут быть получены с комбинированной схемой нижнего дутья и двухступенчатого сжигания. Достаточно эффективны воздушные завесы, однако при этом не решается проблема снижения выбросов оксидов азота.

Сравнение средних температур газов на выходе из топки показывает, что наибольшим эффектом обладает механическая очистка экранов (рис. 4). Нижнее дутье, в том числе при загрузке нижних ярусов горелок, не дает существенного снижения температур при работе на “тонкой” пыли. Этот эффект проявляется при угрублении помола. После механической очистки максимальный эффект по снижению температуры газов на выходе из топки достигается в варианте сочетания нижнего дутья и двухступенчатого сжигания при загрузке нижних ярусов горелок.

При снижении избытков воздуха на выходе из топки на $\sim 0,1$ получено максимальное расчетное сокращение выбросов NO_x на 30%. При двухступенчатом сжигании (схема “по вертикали”) с двумя ярусами ввода 15 % третичного воздуха (всего 30 %) на отметках 45 и 65 м NO_x снизились на 27 %. При двухступенчатом сжигании (схема по вертикали) с одним ярусом ввода 30% третичного воздуха на отметке 60 м оксиды азота NO_x снижаются на 24 %. Схема концентрического сжигания (16 сопел у двух верхних ярусов горелок с долей третичного воздуха 15 % плюс 8 сопел на отметке 60 м с долей третичного воздуха 15 %) дала расчетное снижение NO_x на 14 %. При двухступенчатом сжигании по горизонтали снижение NO_x не превышало 10 %, а при нижнем дутье уменьшения оксидов азота расчеты не показали.

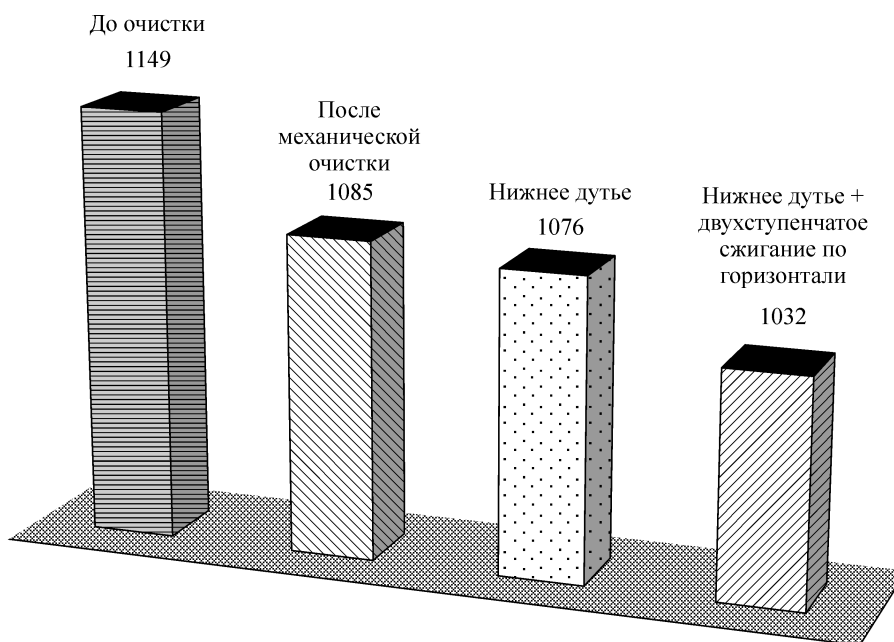


Рис. 4. Сравнение средних температур газов на выходе из топки (отметка 85 м) котла П-67 по результатам математического моделирования.

Таким образом, математическое моделирование позволило сделать вывод о том, что для котлов с тангенциальной топочной камерой и многоярусным расположением горелок одновременно решить проблемы снижения локального шлакования и выбросов оксидов азота в рамках исследованных краевых условий не удастся. Поэтому было принято решение на первом этапе разработать и реализовать систему механической очистки топки, модернизировать систему водяной обдувки топочной камеры, внедрить системы диагностики шлакования с использованием температурных вставок и оптической пирометрии, а также исследовать в длительной эксплуатации режимы с малыми избытками воздуха, “тонким” и “грубым” помолом топлива с загрузкой нижних ярусов горелок. На втором этапе — реализовать двухступенчатое сжигание по вертикали.

Для будущего котла П-67 ст. № 3 с выбросами оксидов азота менее 300 мг/нм^3 (требования ГОСТ к вновь вводимым котлам) на основании результатов математического моделирования рекомендовано трехступенчатое сжигание. Зона восстановления формируется путем подачи в дополнительный пятый ярус горелок 15 % топлива с пониженными избытками воздуха. Пятый ярус горелок располагается на 5 м выше четвертого яруса горелок с круткой, совпадающей с направлением вращения основного потока газов. Подача третичного воздуха в зону дожигания в количестве 15 % осуществляется через специальные сопла, размещенные на 10 м выше пятого яруса горелок по тангенциальной схеме с противокруткой.

Летом 2003 г. на котле ст. № 1 было смонтировано двенадцать дальнобойных аппаратов водяной обдувки типа WLB фирмы Clyde-Bergemann GmbH с системой диагностики шлакования и управления аппаратами (FACOS). На котле ст. № 2 было установлено восемь отечественных дальнобойных аппаратов водяной обдувки типа ОВД, система контроля шлакования с температурными вставками и пирометрический комплекс ПИК-5м. Внедрение ленточных весов с измерительным комплексом «MACON-21» позволило непрерывно контролировать качество поступающего угля.

В период испытаний на нагрузках свыше 700 МВт котлы эксплуатировались при работе восьми пылесистем (роторы мельниц-вентиляторов МВ имели наработку до 2130 ч), двух дымососов рециркуляции газов (ДРГ), трех основных дымососов (ДС) и двух дутьевых вентиляторов (ДВ). Система избыточного воздуха работала без сброса в атмосферу с пропуском сетевой воды через воздуховодяной теплообменник (ВВТО) и работой четырех вентиляторов рециркуляции воздуха (ВРВ). Комбинированная система очистки поверхностей нагрева работала в штатном режиме: газоимпульсная очистка конвективной шахты (с 2003 г. много-сопловые паровые обдувочные аппараты РК-SB и ОКШ), пушечная обдувка ширм ШПП-2 на выходе из топки (с 2004 г. глубоководные аппараты паровой обдувки РК-SL) и водяная обдувка топочных экранов — 2 раза в сутки; паровая обдувка ширм горизонтального газохода глубоководными аппаратами — 1–2 раза в сутки. В последние годы обеспечена высокая надежность всех обдувочных аппаратов вследствие повышения качества их обслуживания и ремонта.

Для создания базы данных каждого опыта была разработана программа “Simens_dek”, позволяющая выполнять преобразование файла с результатами запроса, сформированного в архивном модуле АСУ ТП, в отчеты и графики в удобном для представления виде с возможностью простой навигации по временному диапазону, необходимой выборки данных с усреднением, вводом поправок к показаниям штатных датчиков, с автоматическим построением диаграмм.

При балансовых испытаниях отбирались пробы топлива, золы и шлака. Кроме того, измерялись следующие параметры: содержание кислорода по газовому тракту (присосы), расход и температура «холодных» газов рециркуляции, поля температур газов перед и за воздухоподогревателем; пирометрия топки, температуры газов в пристенном слое. Визуально оценивалась интенсивность локального шлакования.

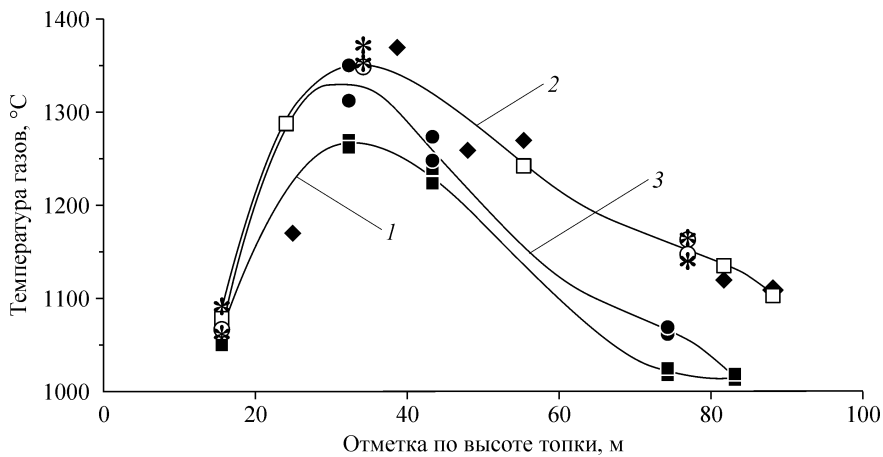


Рис. 5. Изменение температур газов по высоте топочной камеры, (пирометрия). Котел ст. № 1, 771 МВт, 2003 г. (1), котел ст. № 1, 730 МВт, 2002 г. (2), котел ст. № 2, 770 МВт, 2003 г. (3).

Проводились специальные опыты по определению доли провала шлака в холодную воронку. Тепловая эффективность поверхностей нагрева (ψ) определялась путем вариантных теплогидравлических расчетов по программе "ТРАКТ". Расчеты адаптировались с возможной степенью приближения к результатам экспериментальных данных по основным опытам. Для температур газов в поворотной камере вводились поправки на излучение и геометрию расположения штатных термомпар.

Испытания показали отсутствие существенных ограничений для увеличения базовой электрической нагрузки блоков с 700 до 770 МВт, а пиковой до 800 МВт. После внедрения мероприятий в 2003 г. было достигнуто существенное снижение пирометрической температуры газов на выходе из топки (рис. 5). Снижение балансовой температуры составляло около 60 °С. Коэффициент тепловой эффективности топки после механической очистки увеличился с 0,22–0,26 до 0,34–0,35 (рис. 6) и удовлетворительно поддерживался в период зимних максимумов нагрузок.

Дальнобойные аппараты водяной обдувки WLB и ОВД при дополнительном выборочном включении маловыдвижных аппаратов ОВМ и глубоководных — ОВГ обеспечили стабилизацию тепловосприятия экранов и снизили вероятность

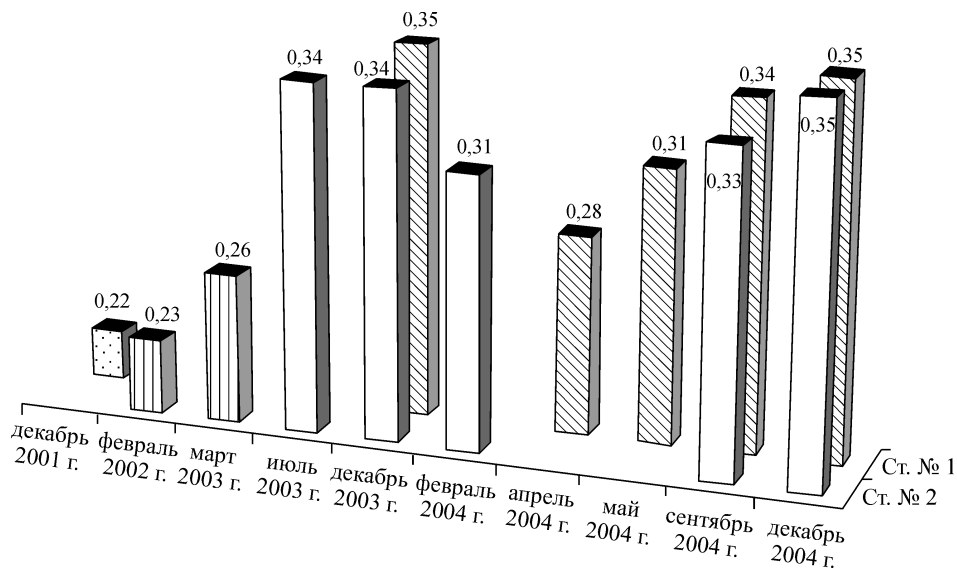


Рис. 6. Изменение коэффициентов тепловой эффективности топок котлов П-67.

образования крупных глыб шлака, опасных для шлаковых комодов и шнеков системы шлакоудаления (рис. 7).

Работа котла с выбросами в дымовых газах, не превышающими нормативной величины — 370 мг/м^3 , обеспечивается в режимах с “тонким” помолом топлива: на семи пылесистемах при коэффициенте избытка воздуха за водяным экономайзером $\alpha''_{вз} = 1,2$ и на восьми пылесистемах при $\alpha''_{вз} = 1,16$. При малых избытках зафиксировано некоторое повышение интенсивности шлакования и увеличение механического недожога до 1 %. В расчеты потерь с мехнедожогом (q_4) на основании опытов предложено включать долю провала шлака в холодную воронку 1–1,5 %, а не 5 %, как это рекомендовано нормами теплового расчета.

С целью выявления причин разрывов, связанных с нарушением гидродинамики внутренней среды и коррозионно-усталостными трещинами, были проведены исследования нестационарного температурного режима тыльного экрана НРЧ-2, в том числе на малых нагрузках при включении аппаратов водяной обдувки ОВМ и ОВГ, а также в периоды пуска и останова котла.

В результате были зафиксированы опасные “выбеги” температур металла до 600°C в период обдувки глубоководным аппаратом ОВГ при нагрузках блока менее 660 МВт.

Для подтверждения причин коррозионно-усталостных повреждений НРЧ были выполнены расчетно-аналитические исследования термонапряженного состояния чистых труб диаметром 32 мм и толщиной стенки 6 мм в период водяной обдувки аппаратом ОВГ. Длительность контакта струи с точкой поверхности трубы по результатам измерений составляла 0,14 с, а число “термошоков” достигало 10, в то время как для маловыдвижных и дальнобойных аппаратов их получено не более 4-х. Замена двух наиболее поврежденных участков НРЧ, увеличение межобдувочного периода до 12 ч и монтаж новых аппаратов ОВМ с регуляторами давления, выравнивающими расход воды на единицу площади в зоне очистки, позволили

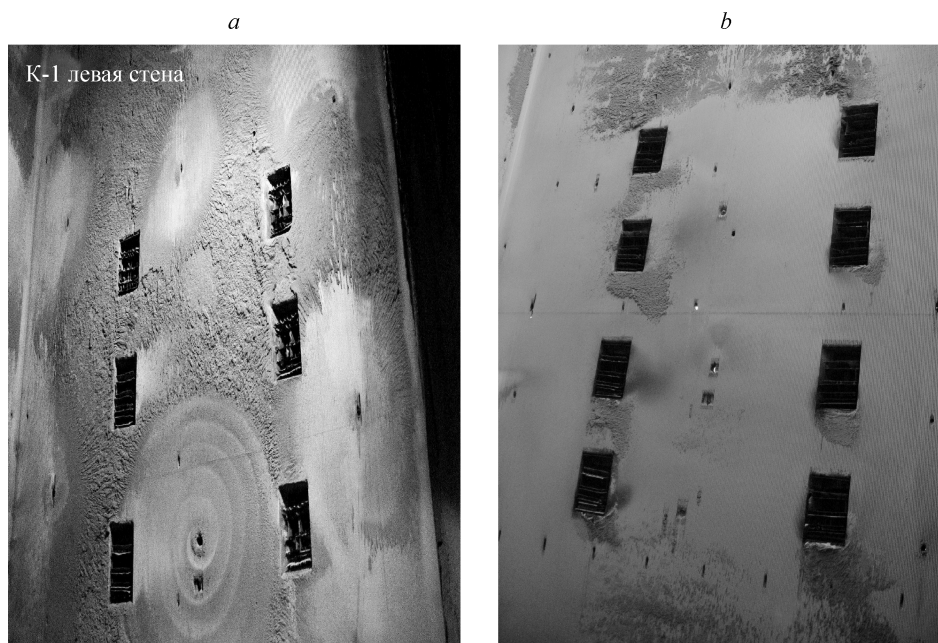


Рис. 7. Характерное шлакование топочных экранов в зоне активного горения котла П-67.

существенно сократить число повреждений труб НРЧ. На новых котлах рекомендовано не устанавливать глубоковыдвижные аппараты ОВГ. Предпочтение отдается дальнобойным аппаратам и маловыдвижным с механическим приводом клапана и регулятором давления.

Основными целями внедрения системы контроля и диагностики шлакования топочных экранов является повышение надежности и экономичности работы котла, предупреждение аварийных остановов, повышение бесшлаковочной мощности, сокращение объемов и сроков ремонта, разработка мероприятий по управлению топочным процессом и аппаратами очистки. Система исключает воздействие струи на чистые экраны и опасность роста термоусталостных трещин, приводящих к вынужденной замене ряда участков НРЧ. В месте установки каждой из основных температурных вставок на экране указывается удельный воспринятый тепловой поток и число часов от момента последнего включения аппарата. Обеспечивается вызов на экран графиков изменения во времени удельных тепловых потоков, температур стенки и тепловой эффективности каждой вставки. Испытания показали необходимость увеличения количества обрабатываемых фигур для аппаратов WLB для очистки локальных зон шлакования. В архив текущих состояний необходимо включить информацию о номере текущей очищаемой зоны с контролем числа термошоков. Требуется установка дополнительных вставок SMART FLUX для более точной диагностики состояния поверхностей нагрева топочных экранов и изучение термонапряженного состояния труб НРЧ в зонах замедления струй воды. Зашлакованные вставки должны исключаться из системы управления аппаратами WLB. Целесообразна интеграция аппаратов ОВМ и ОВГ в систему автоматического управления средствами очистки.

При расчете экономической состоятельности проекта внедрения дополнительного комплекса очистки топки фирмы Clyde-Bergemann GmbH с системой диагностики шлакования и автоматического управления дальнобойными аппаратами водяной обдувки принят вариант модернизации с увеличением мощности на 70 МВт, уровень дисконтированного дохода от которого с учетом стоимости топлива (франко-ТЭС), издержек эксплуатации, капитальных затрат с прогнозируемыми процентными ставками на заемный капитал и уровнем инфляции, обеспечивающим приемлемые сроки окупаемости и возврата заемного капитала.

Таким образом, комплекс научно-исследовательских, реконструктивных и наладочных работ, связанных с повышением интенсивности теплообмена в топочной камере котла П-67, позволил уточнить причины снижения бесшлаковочной мощности котла, прогнозировать качество березовского угля для проектирования последующих блоков, рекомендовать и внедрить на основе результатов численного эксперимента механическую очистку экранов, “угрубление” помола топлива, загрузку нижних ярусов горелок с нижним дутьем горячего воздуха и двухступенчатое сжигание с системой диагностики шлакования экранов и управления аппаратами обдувки. Результаты испытаний после реализации указанных мероприятий позволили практически снять ограничения по бесшлаковочной мощности котла и обеспечить возврат заемного капитала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комаров Н.Ф., Мосеев Г.И., Петросян Р.А и др. Котельные и турбинные установки энергоблоков мощностью 500 и 800 МВт. Создание и освоение / Под общ. ред. Дорошук В.Е. и Рубина В.Б. — М.: Энергия, 1979. — 680 с.
2. Ковалевич И.А., Васильев В.В., Майданик М.Н. Эффективность очистки топочных экранов котла П-67 при сжигании березовского угля // Теплоэнергетика. — 1992, № 4. — С. 58–62.

3. **Васильев В.В., Белов С.Ю., Майданик М.Н.** Тепловая эффективность поверхностей нагрева котла П-67 блока 800 МВт Березовской ГРЭС-1 в условиях комплексной очистки // Электрические станции. — 1993, № 10. — С. 5–10.
4. **Vasiliev V., Belov S., Maidanik M.** Slagging, fouling, and cleaning of a boiler burning kansko-achinsky brown coal // The Impact of Ash Deposition on Coal Fired Plants: Proc. of the Engin. Foundation Conf., Solihull, England, 1993. — Taylor and Francis, 1994. — P. 63–73.
5. **Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Харламов Е.Б., Литвинцев К.Ю.** Использование программы *σFlow* для численного исследования технологических объектов // Вычислительные технологии. Ч. 1. — 2003. — Т. 8. — С. 250–255.
6. **Белый В.В., Васильев В.В., Гаврилов А.А., Дектерев А.А., Тэпфер Е.С., Харламов Е.Б.** Исследование теплообмена в топке котла П-67 // Minsk International Heat & Mass Transfer Forum, секция № 8 “Тепломассобмен в энергетических устройствах”. — Минск, 2004. — 8 с.
7. **Бабий В.И., Куваев Ю.Ф.** Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 208 с.

Статья поступила в редакцию 28 декабря 2005 г.