Библиотечка электротехника. 2013. № 8

А. Н. Алехнович

ШЛАКОВАНИЕ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ

ПРИЛОЖЕНИЕ К ЖУРНАЛУ
ЭНЕРГЕТИК

Вниманию специалистов

Вышли в свет следующие выпуски

«Библиотечки электротехника»:

Каргин С. В., Краснова А. Н., Бекбулатов Р. Р. **Управление качеством электроэнергии в распределительных сетях общего назначения**

Анчарова Т. В., Рашевская М. А. **Электроснабжение зданий (части 1 и 2)**

Ростик Г. В. **Поддержание живучести турбогенераторов**

Николаев В. Г., Ганага С. В., Перминов Э. М. **Состояние и перспективы развития мировой и отечественной ветроэнергетики (части 1 – 3)**

Алехнович А. Н. **Топочно-горелочные устройства пылеугольных котлов**

Захаров О. Г. **Цифровые устройства релейной защиты электродвигателей. Алгоритмы и уставки (части 1 и 2)**

Хромченко Ф. А. , Калугин Р. Н. **Расчет на прочность сварных соединений трубопроводов с дефектами в металле шва: Справочные материалы**

Гладштейн В. И. **Диагностика микроповрежденности металла деталей энергооборудования, работающих в условиях ползучести (части 1 – 3)**

Самородов Ю. Н. **Парадоксальные свойства скользящего контакта в ЩКА**

Сучков С. И. **Разработка отечественной технологии газификации твердого топлива для парогазовых установок**

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи по объединенному каталогу **«ПРЕССА РОССИИ». Том 1. Российские и зарубежные газеты и журналы**, а также в РЕДАКЦИИ.

Подписной индекс «Библиотечки электротехника» — *приложения к журналу «Энергетик»*

88983

Адрес редакции
журнала «Энергетик»:
115280, Москва, ул. Автозаводская, д. 14.
Телефон (495) 675-19-06.
E-mail: energetick@mail.ru

Библиотечка электротехника

Приложение к журналу «Энергетик»

Основана в июне 1998 г.

Выпуск 8 (176)

А. Н. Алехнович

ШЛАКОВАНИЕ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ

Москва

НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик»

2013

УДК 621.182.4
ББК 31.361
А 49

Главный редактор журнала «Энергетик» А. Ф. ДЬЯКОВ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

«Библиотечки электротехника»

И. И. Батюк (*зам. председателя*), К. М. Антипов, Г. А. Безчастнов, А. Н. Жулев, В. А. Забегалов, Ф. Л. Коган, В. И. Кочкарев, Н. В. Лисицын, В. И. Пуляев, А. И. Таджибаев

А. Н. Алехнович

А 49 Шлакование пылеугольных энергетических котлов. — М.: НТФ «Энергопрогресс», 2013. — 112 с.: ил. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып. 8 (176)].

Приводятся сведения о ситуациях по шлакованию и загрязнению пылеугольных энергетических котлов, минеральной части углей, типах отложений и условиях их формирования. Рассмотрено влияние различных режимных и конструктивных факторов на шлакование. Излагаются методы прогнозирования шлакующих свойств углей и шлакования котлов. Рассмотрены вопросы контроля шлакования и очистки поверхностей нагрева.

Брошюра базируется на разработках, результатах наладки и исследований, выполненных в Лаборатории обеспечения бесшлаковочных режимов УралВТИ и в Уральской теплотехнической лаборатории, с привлечением отечественных и зарубежных публикаций по теме.

Предназначена для специалистов, занимающихся вопросами конструирования, наладки и эксплуатации пылеугольных энергетических котлов.

ISSN 0013-7278 © НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2013

Предисловие

Вопросы состава минеральной части энергетических топлив, ее преобразования при сжигании в топках и шлакования котлов исследуются более столетия. За это время накоплено значительное количество знаний и опыта создания успешно работающего в этом аспекте оборудования. Тем не менее, вопросы шлакования и загрязнения котлов сохраняют высокую актуальность в силу большого экономического ущерба в результате этих явлений, перестройки топливного баланса ТЭС, постановки и решения новых задач [1].

Среди новых задач наиболее актуальны: освоение нетрадиционных технологий (ступенчатое и нестехиометрическое сжигание, схемы с восстановлением оксидов азота «reburning»), улучшение экологических показателей путем изменения топлива, применение добавок, угольных смесей.

В нашей стране актуальность вопросов шлакования и загрязнения котлов сохраняется, несмотря на спад производства. Острота проблемы для некоторых электростанций из-за резерва и неполной загрузки оборудования снимается, но возрастает для других электростанций в силу изношенности оборудования, его реконструкции с минимальными затратами при технически неоптимальных вариантах. Неопределенность и переменность топливного баланса, сращивание или более тесные коммерческие и финансовые связи угледобывающих компаний и ТЭС повысили долю сжигания непроектного топлива и, чаще всего, проблемы шлакования.

Эффективное решение проблемы шлакования возможно только на базе знаний шлакующих свойств углей и влияния на этот процесс конструкции и режимов работы котлов. В данной брошюре эти вопросы рассмотрены с использованием обширного экспериментального материала и разработок УралВТИ и Уральской теплотехнической лаборатории с привлечением литературных данных.

Замечания и пожелания по брошюре просим направлять по адресу:
115280, Москва, ул. Автозаводская, 14.
Редакция журнала «Энергетик».

Автор

ГЛАВА ПЕРВАЯ

Примеры шлакования и загрязнения энергетических котлов

Образование отложений в котлах наносит экономический ущерб, снижает безопасность эксплуатации и ухудшает условия труда. Экономический ущерб может быть связан:

- с ограничением мощности и уменьшением выработки электроэнергии и тепла;
- с остановом котлов на проведение расшлаковки и очистки;
- с ростом температуры уходящих газов и снижением экономичности;
- с затратами на проведение стояночной расшлаковки и аппаратами очистки в процессе работы;
- с повреждением поверхностей нагрева при работе аппаратов очистки (термошок, эрозионный износ) и падающими шлаковыми образованиями;
- с ограничением круга допустимых углей, и, как следствие, более высокими затратами на топливо.

Используемая на многих станциях ручная расшлаковка трудоемка и опасна.

В процессе пылеугольного сжигания в топке могут образовываться отложения, различающиеся по структуре, площади распространения и размерам.

Эксплуатационно чистое состояние топочных экранов. При наличии на экранах налета мелкодисперсной неспекшейся золы, небольших саморазрушающихся по мере роста гребешков шлака ситуация по шлакованию классифицируется как эксплуатационно чистое состояние, и средства очистки в отечественной практике не используются. Средства очистки также не применяются при наличии на экранах прочных первичных и шлаковых отложений, не объединенных в сплошное покрытие, или локальных образований, не ведущих с течением времени к снижению тепловосприятия топки и недопустимому повышению температуры газов на ее выходе $\vartheta_т''$.

а) *б*)

Рис. 1.1. **Шлакование топки котлов П-59 и П-67:**

а — фотография НРЧ котла П-59; *б* — фотография левого бокового экрана котла П-67

Общее шлакование топки из-за несоответствия оборудования и/или режимов его работы шлакующим свойствам топлива. Наиболее сложный с позиций предотвращения случай шлакования – это образование прочно связанных с экранными трубами отложений на значительной площади экранов, которые не самораспшлаковываются по мере роста отложений. При такой ситуации для ограничения роста отложений используется очистка поверхностей нагрева с соответствующим снижением надежности и расходами.

При отсутствии эффективной и своевременной очистки тепловосприятие экранов снижается настолько, что достигается недопустимая температура газов перед ширмовыми и конвективными поверхностями. Такая ситуация при исчерпании возможностей режимного воздействия ведет к снижению нагрузки или к останову котла для стояночной расшлаковки. Общее шлакование на примере топок котлов П-59 и П-67 с учетом очистки аппаратами водяной и паровой очистки показано на рис. 1.1.

Локальное шлакование экранов преимущественно из-за конструктивных недостатков. Локальное шлакование поверхностей нагрева в значительной мере зависит от равномерности распределения топлива и воздуха по горелкам, а также от температуры поверхности и динамики ее омывания газовым потоком. Локальные очаги шлакования обычно образуются:

- на участках «наброса» факела и/или в зонах активного омывания газовым потоком при наличии на трубах прочного первичного слоя;

Рис. 1.2. **Шлакование горелок котла ТП-87 с жидким шлакоудалением**

- на неэкранированных или утепленных участках (лазы, кладка у горелок, зажигательные участки), рис. 1.2;
- на разводке труб в сторону топочного объема и трубах вышедших из ранжира в топочный объем;
- на наклонных участках, где самораспшлаковка под действием силы тяжести затруднена.

Одно из последствий локального шлакования – падение глыб шлака, которые могут повреждать экранную систему и устройства шлакоудаления. При этом при неудачной конструкции креплений экранной системы аварийный останов котла может быть вызван обычно не характерными, единичными случаями шлакования, как это имело место до реконструкции экранной системы на котлах ПК-24 Иркутской ТЭЦ-10.

Образование отложений у горелок и над горелками ведет к перекрытию части их сечения и нарушению факела (сепарация пыли на под, изменение условий смесеобразования и выгорания). Особенно недопустимо шлакование горелок с низкими выбросами оксидов азота, поскольку при этом нарушается механизм, обеспечивающий снижение выбросов.

Ситуация, вплоть до аварийного останова и последующей трудоемкой ручной расшлаковки, наблюдается при накоплении отложений в холодной воронке и перекрытии ее выходного отверстия. На котлах, в том числе сжигающих малошлакующие угли, это имеет место при близком расположении скатов холодной воронки (ПК-39) или ее рассекателей (П-64) к уровню горелок и неоптимальности самой конструкции холодной во-

Рис. 1.3. **Шлакование потолка над свободным объемом топки котла с Т-образной компоновкой газоходов**

ронки (наличие четырех скатов, горизонтальная навивка экранной системы, недостаточный угол наклона скатов).

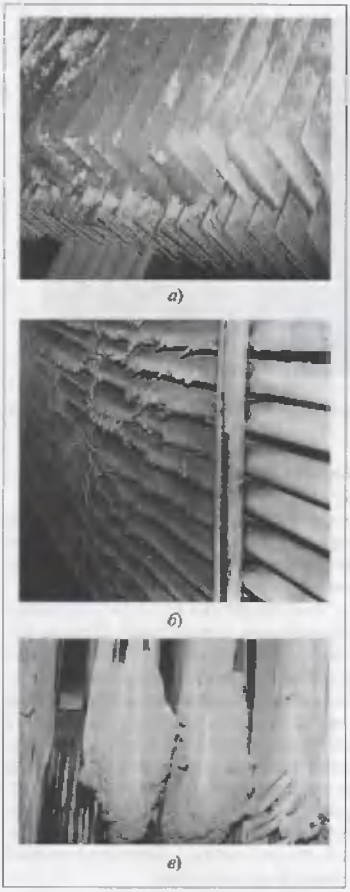
В верхней части топки шлакуются активно омываемые дымовыми газами нижние скаты пережимов и аэродинамических выступов. Падение образующихся здесь крупных шлаковых образований повреждает экранную систему холодной воронки и систему шлакоудаления.

В характерных для отечественного котлостроения котлах с Т-образной компоновкой также наблюдается шлакование потолочных экранов над свободным объемом центральной части топки (рис. 1.3), который при развитии процесса может распространяться вплоть до поворотных камер.

Шлакование ширм, фестонов, вертикальных пакетов пароперегревателя. Ширмовые поверхности нагрева располагаются в зоне шлакования и предназначены для снижения температуры газового потока до уровня, допустимого по условиям шлакования плотных конвективных пакетов. Образование отложений на лобовых поверхностях ширм является естественным характерным режимом их работы (рис. 1.4, *а*, *б*). При расположении ширм над свободным объемом топки такое шлакование до определенных размеров и прочности (что обеспечивается их самораспшлаковкой или внешней очисткой) не создает аварийных ситуаций.

Аварийная ситуация создается при образовании и падении шлаковых образований (глыб) недопустимых размеров или при перекрытии межширмового пространства (рис. 1.4, *в* [2]) и объединении шлакования отдельных ширм в сплошное (котлы П-49, П-50).

При расположении ширм за поверхностями нагрева с меньшим шагом, например фестоном (котел П-57), к допустимому уровню шлакования предъявляются гораздо более жесткие требования по размерам и



а)

б)

в)

Рис. 1.4. **Шлакование ширм, не вызывающее затруднений в работе (*а*, *б*), и шлакование с перекрытием межширмового пространства [2] (*в*):**

а — шлакование вертикальных ширм при сжигании березовского угля (П-67); *б* — шлакование горизонтальных ширм при сжигании азейского угля (ПК-24)

Рис. 1.5. **Образование золошлакового завала за фестоном при шлаковании ширм**

прочности. В противном случае, происходит накопление золошлаковых завалов за предшествующей поверхностью нагрева (рис. 1.5).

Многорядные фестоны котлов старых конструкций с «корзинкой» из разводки труб в нижней части сами по себе неоптимальны с позиций шлакования и являются очагами локального шлакования и накопления отложений, падающих с расположенных выше поверхностей.

Неоптимально также наличие горизонтального неохлаждаемого участка в нижней части поворотного газохода при расположении над ним шлакуемой поверхности. Этот участок может являться источником образования золошлаковых завалов даже при отсутствии в выходном окне топки фестона или иных поверхностей нагрева с недостаточным поперечным шагом (рис. 1.6).

Рис. 1.6. **Иллюстрация образования золошлакового завала на нижней горизонтальной полке поворотного газохода (котел П-59, березовский уголь)**

Рис. 1.7. **Вид на первые трубы III ступени пароперегревателя котла ТП-170 при сжигании кызылкийского угля**

а)

б)

Рис. 1.8. **Шлакование горизонтальных пакетов конвективного пароперегревателя:**

а — П-64, ангренский уголь, югославские лигниты; *б* — П-59, подмосковный, березовский угли

Проблемой шлакования ряда котлов является образование отложений на трубах и внутри пакетов вертикальных ступеней конвективного пароперегревателя. Из-за относительно небольшого поперечного шага между змеевиками шлакование входного участка и внутри пакетов ведет к значительному уменьшению проходного сечения для газов, вплоть до полного его перекрытия в локальных зонах. В силу специфики компоновки и процесса шлакования этих поверхностей нагрева затруднены контроль их состояния и расшлаковка, особенно при неоптимальной завышенной глубине пакетов (рис. 1.7).

Шлакование и загрязнение горизонтальных конвективных пакетов. При температурах, превышающих в локальных зонах температуру начала шлакования (см. гл. 3) на неохлаждаемых элементах крепления труб и трубах, покрытых прочными отложениями, образуются локальные очаги шлакования, которые в течение относительно короткого времени могут разрастаться до значительных размеров и перекрывать до аварийной ситуации сечение газоходов (рис. 1.8).

Очагами шлакования также являются куски отложений, попавшие на горизонтальный пакет с предыдущих по ходу газа поверхностей (перевал, вертикальный пароперегреватель, потолок при Т-образной компоновке газоходов). Стояночная и в процессе работы расшлаковка этих отложений неэффективна из-за их развития на плотных пакетах. Кроме того, отечественные котлы обычно имеют неоптимальное с позиций расшлаковки и саморасшлаковки изменение поперечного шага по ходу газов.

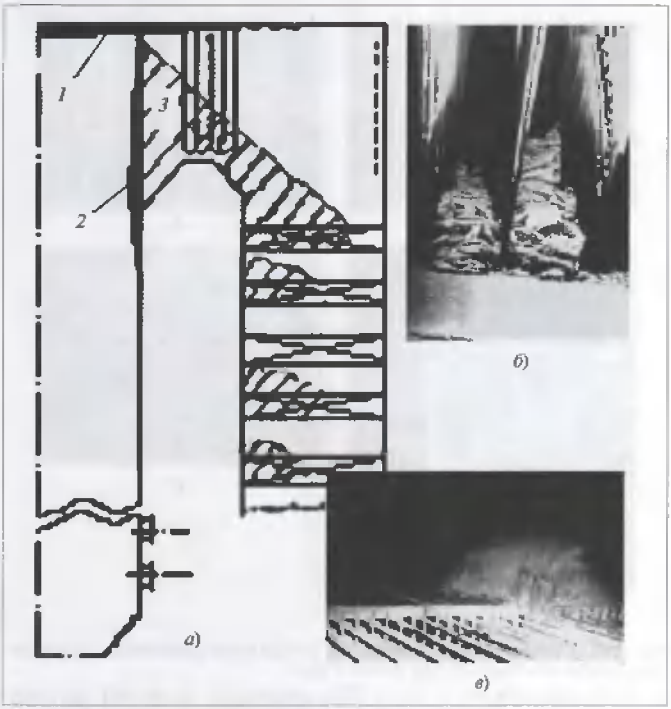


Рис. 1.9. **Золошлаковый завал на котле П-57:**

а — схема интенсивного завала; *б* — «каркас» завала, куски шлаковых отложений в завале оставшиеся после смыва неспекшейся золы; *в* — фотография лобового завала по центру газохода; *1* — шлакование потолочного экрана; *2* — шлакование лобовой части труб фестона и рост отложений от золошлакового завала в топочный объем; *3* — образование завала за фестоном, шаг которого меньше, чем ширм

Разрушенные на верхних конвективных пакетах куски отложений задерживаются на расположенных ниже с меньшим поперечным шагом поверхностях нагрева и являются основой формирования здесь золошлаковых завалов (рис. 1.9).

Для котлов, сжигающих угли с повышенным содержанием в минеральной части кальция и склонных к образованию сульфатно-кальциевых отложений, образование отложений на лобовых трубах и креплениях

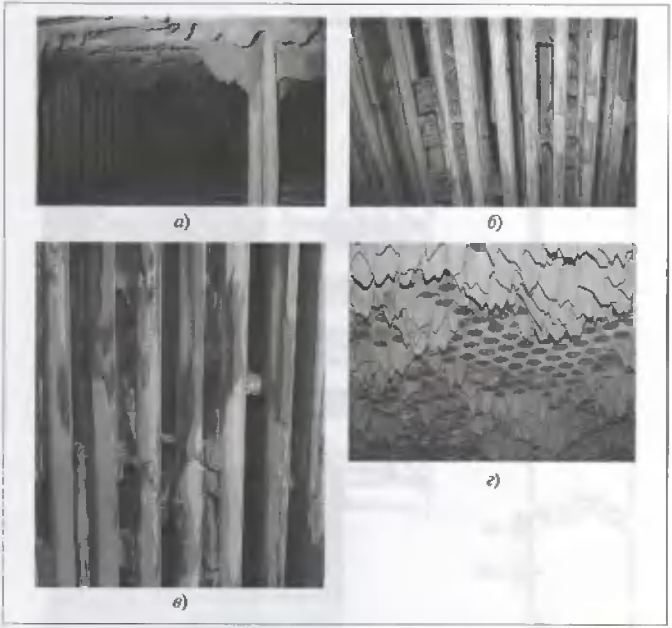


Рис. 1.10. **Отложения внутри пакетов и в нижней части конвективных поверхностей нагрева при сжигании березовского угля:**

а — П-67, рассечка КПП; *б* — П-59, КПП, вид снизу; *в* — П-59, ЗМТ, вид снизу; *г* — П-59, воздухоподогреватель ВП-II, нижняя трубная доска

конвективных поверхностей нагрева происходит и при температурах ниже начала шлакования. Естественно, что при сжигании таких углей поверх и внутри плотных конвективных пакетов образуются золошлаковые завалы с каркасом из фрагментов образующихся при разрушении прочных сульфатно-кальциевых отложений (см. гл. 3).

При сжигании углей с высоким содержанием кальция (канско-ачинские и, в первую очередь, березовский угли) достаточно прочные отложения образуются не только в аэродинамически активных зонах омывания, но и за счет сульфатизации во времени первоначально рыхлых тыльных отложений и перемычек между трубами. При очень высоком содержании кальция такие отложения образуются даже в зонах относительно низких температур на трубах водяного экономайзера и элементах воздухоподогревателя (рис. 1.10).

Загрязнение на базе активных щелочей. При высоком содержании в минеральной части щелочных элементов, что не характерно для традиционных отечественных углей, на охлаждаемых поверхностях нагрева по всему тракту котла образуются быстро растущие, но не прочные отложения в виде сплошного рыхлого покрытия.

В приложении 1 приведены примеры описания ситуаций по шлакованию топочных камер из отчетов и публикаций УралВТИ, СибВТИ и ОРГРЭС; в приложении 2 — поверхностей на выходе из топки и далее по газовому тракту.

ГЛАВА ВТОРАЯ

Краткие сведения о минеральной части углей

Минеральная часть углей представляет собой совокупность минеральных включений и минеральных элементов собственно угольного органического вещества (рис. 2.1).

Применительно к пылеугольному сжиганию в практике используются понятия внутренней и внешней золы. Под *внешней золой* понимают ту часть, которая при размоле отделяется от органического угольного вещества и состоит из крупных минералов, их ассоциаций, сростков. *Внутрен-*

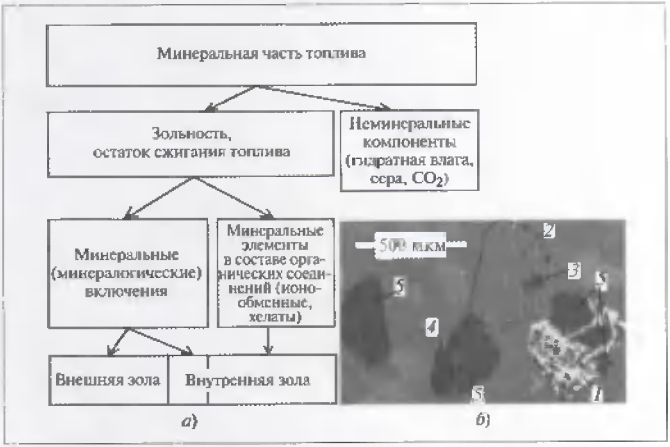


Рис. 2.1. **Диаграмма минеральной части (*а*) и фрагмент аншлифа угольной пыли в эпоксидной смоле (*б*):**

1 — пирит; *2* — кварц; *3* — каолинит; *4* — иллит; *5* — угольное вещество [3]

няя зола содержит минеральные элементы органических соединений, сорбированные элементы и мелкие минеральные примеси. Соотношение внутренней и внешней золы изменяется в широком диапазоне от доли внутренней золы более 0,7 в малозольных лигнитах и бурых углях низкой степени углефикации до менее 0,15 в высокозольных углях более высокой степени углефикации. Строгой границы отнесения минеральной части к той или иной группе нет, и она изменяется в зависимости от степени измельчения топлива и условий экспериментального определения.

Общепринято характеризовать минеральную часть углей усредненным (валовым) химическим составом, который выражается, как правило, в виде предельных оксидов. В нашей стране до настоящего времени основными методом определения химического состава золы является «водный» метод анализа по ГОСТ 10538–87. Метод достаточно трудоемкий, наряду с ним длительное время применяются автоматизированные методы [4, 5] по измерению интенсивности характеристического излучения (XRF, РФА, рентгенофлюоресцентный метод, измерение вторичного излучения при облучении вещества жесткими γ- или рентгеновскими лучами; EDX, энергодисперсионный рентгеновский анализ, измерение характерного для каждого химического элемента обратного, возбужденного рентгеновского излучения).Основные химические элементы минеральной части в виде предельных оксидов следующие:

$$SiO_2,\ Al_2O_3,\ TiO_2,\ Fe_2O_3,\ CaO,\ MgO,\ K_2O,\ Na_2O.$$

Первые три элемента имеют ионный потенциал IOP (отношение валентности к ионному радиусу) более 4,7 или, по другому признаку классификации, pH катионов в воде, менее 6,35 и относятся к числу кислых; их сумма $\Sigma K = SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2$. Щелочные и щелочноземельные элементы относятся к числу основных, сумма основных компонентов $\Sigma O = CaO + MgO + K_2O + Na_2O$. Железо относится к числу амфотерных компонентов, т. е. в зависимости от валентности ведет себя как слабая кислота в трехвалентной форме (IOP = 4,7; pH = 2,83) и как среднее основание в двухвалентной форме (IOP = 2,7; pH = 6,74). Для характеристики минеральной части используется отношение кислых к основным компонентам $ko = \Sigma K/\Sigma O$ или обратное соотношение. При этом содержание железа либо не учитывается, либо оно включается в состав основных компонентов (формулы расчета вязкости шлака или индекс Бабкок – Вилькокс оценки шлакующих свойств, см. гл. 4).

Валовый химический состав минеральной части энергетических углей изменяется в широких пределах. Например, по [6] для углей месторождений Казахстана и восточных регионов России содержание SiO_2 = = 8,4 ÷ 71,1 %, CaO = 0,5 ÷ 56,3 %, Fe_2O_3 = 0,8 ÷ 36,6 %. В приложениях 3, 4 для примера дан химический состав минеральной части ряда углей. Сведения для широкого круга углей приведены в справочниках по энергетическим углям [6, 7].

Химический состав внешней и внутренней золы различается.

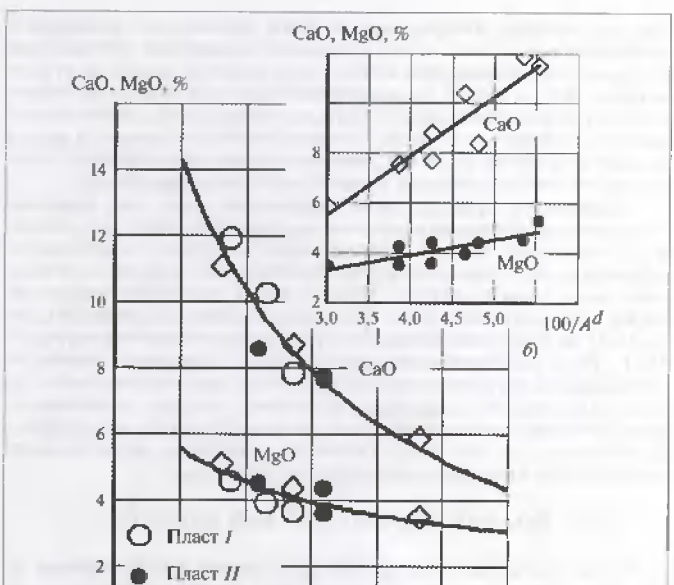


Рис. 2.2. **Изменение щелочно-земельных компонентов в минеральной части в зависимости от зольности (*а*) и показателя $100/A^d$ (*б*) на примере мухенского угля**

Внешняя зола обычно имеет кислый состав ($\Sigma K > \Sigma O$), внутренняя — чаще основной ($\Sigma K < \Sigma O$). При изменении зольности конкретного угля изменяется соотношение внешней и внутренней золы и, соответственно, усредненный химический состав минеральной части. При неизменном составе внутренней и внешней золы изменение содержания каждого из компонентов R_nO_m (здесь R_nO_m — один из компонентов SiO_2, Al_2O_3 и т.д.) по уравнению смешения может быть определено как

$$R_nO_m = b + a \cdot 100/A^d, \qquad (2.1)$$

где A^d — зольность топлива, %, a и b — коэффициенты эмпирические либо рассчитанные по составу внешней и внутренней золы коэффициенты.

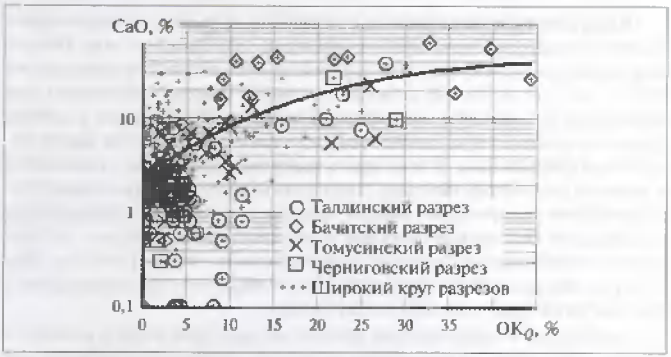


Рис. 2.3. **Содержание CaO в минеральной части кузнецких углей марки СС в зависимости от степени окисленности**

Экспериментальные значения CaO и MgO и оценка их содержания по формуле (2.1) в зависимости от зольности на примере мухенского угля (новое месторождение Хабаровского края) показаны на рис. 2.2.

Реально для многих месторождений состав внешних (вмещающих) пород в зависимости от места добычи изменяется в широких пределах (разный состав прослоев и вмещающих пород по площади разреза) и состав минеральной части в зависимости от зольности имеет большой разброс и незакономерное изменение.

Изменение состава минеральной части для многих станций также связано с поступлением топлива с разных разрезов, шахт и обогатительных фабрик, изменением зольности и состава в зависимости от класса по размеру кусков и степени окисленности угля.

В расположенных вблизи поверхности угольных пластах при окислении угля происходит и закономерное изменение состава минеральной части. При взаимодействии с грунтовыми водами в углях увеличивается содержание, в первую очередь кальция. Изменение содержания кальция в кузнецких углях СС ряда месторождений в зависимости от степени окисленности OK_Q (относительное уменьшение теплоты сгорания Q_i^{daf}) показано на рис. 2.3.

Представление состава минеральной части в виде предельных оксидов является условным. Реально минеральные компоненты входят в состав минералов (минеральных соединений, таких как сульфиды, карбонаты, оксиды, сложные глинистые минералы и др.), или присутствуют в виде элементов в органических соединениях собственно угольного вещества. Краткий перечень основных встречающихся в углях минералов приведен в табл. 2.1.

Шлакующие свойства углей в не меньшей мере, чем от химического состава, зависят от вещественного (минералогического) состава. Например, шлакующие свойства углей кардинально различаются в зависимости от того, входит ли железо в состав сульфидов (пирита, марказита) или карбонатов (сидерита) и органических соединений. Кремний в составе кварца не плавится при развиваемых температурах и является мерой абразивных свойств золы. В то же время композиции кремния со щелочами и железом (глинистые минералы типа иллита) имеют низкую температуру плавления и формируют липкие частицы летучей золы. Одинаковому химическому составу минеральной части могут соответствовать существенно различающиеся вещественные (минералогические) составы. Поэтому использование для характеристики шлакования только сведений о среднем химическом составе недостаточно.

Сведения же о вещественном составе минеральной части в количественном отношении, за исключением железосодержащих минералов, для характеристики шлакующих свойств используются в весьма ограниченном объеме. Такое положение связано с низкой точностью рентгеновских измерений, искажением вещественного состава из-за преобразований минералов при подготовке проб, присутствия значительного количества минеральной части не в форме минералов (органоминеральные соединения).

Таблица 2.1. **Перечень основных минералов в углях**

Группа, форма соединения	Минерал	Химическая формула
Оксиды	Кварц	SiO_2
	Рутил	TiO_2
Алюмосиликатные минералы групп глин, сланцев и полевых шпатов	Каолинит	$Al_4Si_4O_{10}(OH)_6$
	Монтмориллонит	$Al_{2-x}Mg_xSi_4O_{10}(OH)_2$
	Иллит	$(K_{1-x+y})(Al, Fe)_{2-y}Si_{3+x}Al_{1-x}O_{10}(OH)_2$
	Сланцы	$(K,Na,H_3O,Ca)_2(Al,Mg,Fe,Ti)_4(Al,Si)_3O_{20}(OH,F)_4$
	Полевые шпаты	$(K,Na)[AlSi_3O_8]\cdot xH_2O$
		$(Ca,Na)[AlSi_3O_8]\cdot xH_2O$
Карбонаты	Кальцит	$Ca(CO_3)_2$
	Доломит	$(Ca,Mg)(CO_3)_2$
	Сидерит	$Fe(CO_3)_2$
Сульфиды	Пирит, марказит	FeS_2
Сульфаты	Магний сернокислый, натрий сернокислый	$MgSO_4$, Na_2SO_4

Выше отмечалось, и дополнительно будет рассмотрено в гл. 4, что шлакование поверхностей нагрева в значительной мере зависит от количества пирита в угле. Наиболее просто количество пирита (или железа в составе пирита) можно определить по содержанию в угле сульфидной серы, достаточно точный количественный метод определения которой не требует уникального оборудования [8]. В пересчете на предельные оксиды содержание железа в минеральной части в составе сульфидов, %,

$$Fe_2O_3^p = 1{,}244S_p^{ash}, \tag{2.2}$$

где количество сульфидной серы в пересчете на золу, %,

$$S_p^{ash} = 100S_p^d/A^d. \tag{2.3}$$

К сожалению, сведения о разновидностях серы (органическая, сульфидная, сульфатная) имеются не для всех углей; для малосернистых углей такие исследования, как правило, не делаются. Кроме того, не все лаборатории выполняют такой анализ и в документации по качеству топлива эти сведения отсутствуют. Такая ситуация вынуждает при анализе шлакующих свойств углей и отсутствии сведений о сульфидной сере использовать приближенные оценки ее количества. Широко приняты оценки количества пиритной серы по общему содержанию S_t^d (или S_t^{daf}), например, %,

$$S_p^{daf} = a_s S_t^{daf} + b_s, \tag{2.4}$$

где a_s и b_s — эмпирические коэффициенты, зависящие от степени метаморфизма, «зрелости» угля.

В частности такая оценка использована в методике УралВТИ — Уральской теплотехнической лаборатории прогнозирования шлакующих свойств углей [9, 10]. Графически соотношение сульфидной разновидности и общей серы по данным [7] и значения эмпирических коэффициентов a_s и b_s уравнения (2.4) приведены на рис. 2.4.

Более точная оценка разновидностей серы в отечественных углях приведена в [11], согласно которой для пиритной серы лучшие или близкие к ним результаты для анализировавшихся групп углей получены при использовании сведений об общем содержании серы, содержании в угле железа $Fe_2O_3^q$ и степени метаморфизма, оцениваемой путем разделения углей на группы. Уравнения корреляции для оценки пиритной серы приведены в табл. 2.2.

Однако при наличии очевидных общих закономерностей соотношение сульфидной и общей серы для отдельных углей может существенно различаться, и обоснованных методов учета такого различия по широко доступным сведениям об углях не разработано, а сама возможность такой разработки вызывает сомнения. Поэтому для «незнакомых» углей обязательным является экспериментальное определение сульфидной серы (или количества пирита, железа в составе сульфидов иным методом). Для некоторых исследованных углей получены эмпирические коэффициенты зависимости (2.4) и/или зависимостей, приведенных в табл. 2.2, кото-

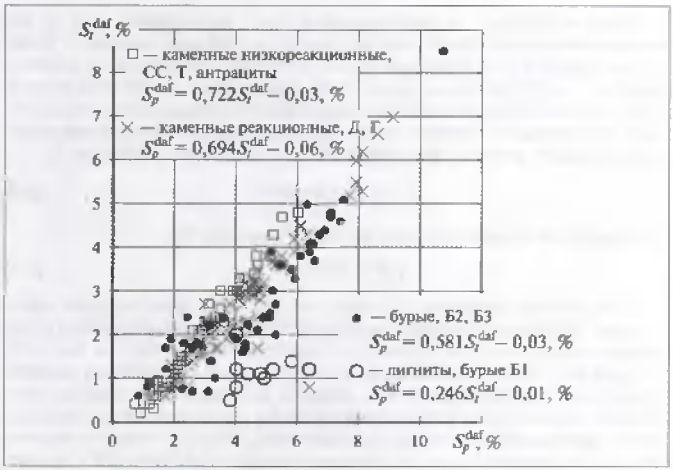


Рис. 2.4. **Соотношение сульфидной и общей серы в углях**

рые могут использоваться для достаточно достоверной оценки других партий угля тех же месторождений.

Недостаточность, ограниченность традиционных сведений об усредненном составе минеральной части обусловлена также тем, что разнообразные минеральные примеси дискретно распределены в угле. В процессе пылеугольного сжигания происходит лишь ограниченное их объединение. Крупные частицы кварца, глинистых минералов, пирита и других минералов внешней золы практически не взаимодействуют друг с другом, и образующиеся из них частицы летучей золы имеют индивиду-

Таблица 2.2. **Уравнения корреляции для оценки пиритной серы [10]**

Группа углей (марка)	Формула оценки пиритной серы S_p^d, где V^d, S_t^d, $Fe_2O_3^d$ — выход летучих, содержание серы общей и железа в пересчете на сухое состояние топлива, %	Среднеквадратическое отклонение D, %
Группа 1 (1Б)	$S_p^d = [33Fe_2O_3^d - 21V^d + 1145]S_t^d 10^{-3}$	0,35
Группа 2 (2Б, 3Б)	$S_p^d = [67\ Fe_2O_3^d - 3{,}3V^d + 349]S_t^d 10^{-3}$	0,24
Группа 3 (Д, ДГ, Г, СС1С)	$S_p^d = 0{,}517S_t^d + 0{,}1317Fe_2O_3^d - 0{,}312$	0,23
Группа 4 (СС2СС, Т, А)	$S_p^d = 0{,}75S_t^d + 0{,}035Fe_2O_3^d - 0{,}359$	0,16

альный состав, включая практически 100 %-ное содержание одного из минеральных элементов (Si, Ca, Fe).

Внутренняя зола, в отличие от внешней, приобретает температуру горящей частицы, ее преобразования проходят в условиях восстановительной атмосферы, и по мере выгорания топлива минеральные элементы и включения вступают в контакт и реагируют друг с другом, образуя новые сложные составы. В результате летучая зола представляет собой совокупность частиц, которые различаются по составу, агрегатному состоянию, размерам и другим признакам. При этом маловероятно, чтобы заметное количество этих частиц имело состав, соответствующий среднему (валовому).

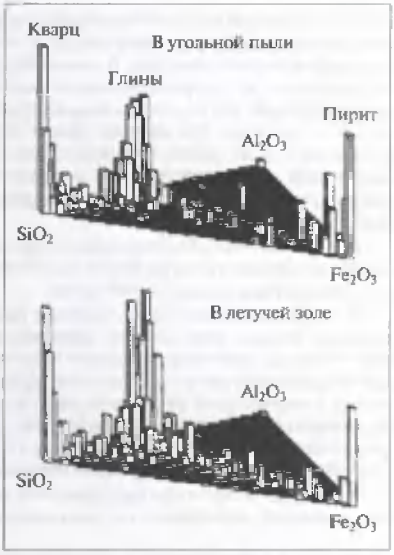


Рис. 2.5. **Распределение по составу минеральных включений и частичек летучей золы, полученной при сжигании британского угля. Высота столбиков пропорциональна количеству частиц с составом, соответствующим координате на тройной диаграмме**

Современные зарубежные методы прогнозирования шлакования базируются на факте разнообразия частиц по составу и свойствам. Экспериментально сведения о распределении частиц по составу изучаются путем определения состава индивидуальных частиц при помощи электронных микроскопов, скомпонованных с анализатором изображения и компьютером (типа технологии CCSEM). При этом для представительности результата анализу подвергается до 10000 индивидуальных частичек. Пример результатов по распределению состава минеральных примесей и полученной летучей золы для одного из британских углей показан на рис. 2.5 [12].

В научно обоснованных моделях шлакования состав частичек летучей золы рассчитывается по сведениям о размерах и распределении по составу минеральных примесей в угле.

Наибольшие проблемы по шлакованию и загрязнению поверхностей нагрева создают малозольные угли низкой степени метаморфизма. В таких углях большая доля минеральной части относится к внутренней золе.

которая содержит мелкие минеральные примеси, сорбированные и органоминеральные соединения и является определяющей при образовании некоторых типов отложений. В своем большинстве вещественный состав и распределение внутренней золы не могут быть исследованы методами, применяемыми для изучения относительно крупных минеральных включений, в том числе при помощи микрозондов на базе электронных микроскопов. В то же время, для малозольных углей низкой степени углефикации доля неанализируемых на электронном микроскопе мелких минеральных включений ($\delta < 1$ мкм) и минеральных элементов органической части превышает 67 % [13].

Для характеристики поведения минеральной части таких углей дополнительно используются сведения о количестве и формах связи минеральных элементов в органической части.

В настоящее время такие сведения получают преимущественно при помощи метода, получившего название «химическое фракционирование». Методы химического фракционирования основаны на избирательном взаимодействии отдельных минералов и органоминеральных соединений с различными растворителями, и наиболее широко признанные включают последовательное растворение угольной пробы в воде, растворе ацетата аммония и соляной кислоте [14]. Считается, что в этой схеме стадийно извлекаются следующие элементы:

- на первом этапе при растворении в воде — Na в хлоридах и сульфатах, элементы, накопление которых связано с подземными водами;

Таблица 2.3. **Растворимость натрия и кальция при химическом фракционировании**

Уголь	Доля растворившегося компонента, %				
	Na_2O		CaO		
	в воде	в ацетате аммония	в воде	в ацетате аммония	после трех этапов
Экибастузский	85,6	85,6	28,7	61	96,6
Подмосковный	25	54,8	30,6	69,7	91,6
Кузнецкий Г (Талдинский разрез)	0	11,4	31,5	56,1	81,7
Кузнецкий Г (шахта Ярославского)	43,5	51,6	8,2	55,1	89,2
Хакасский	44,7	80,4	1,73	68,9	93,3
Челябинский	70,5	79,9	0	68,7	95,1
Силезский	83,8	90	7,76	57,8	86,3
Азейский	0	63,2	0	62,4	98,1
Аигренский	86,4	86,4	9,32	71,8	98,6
Приозерный (селективная проба)	87,1	92,8	0	43,6	94,6
Ирша-бородинский	31,4	48,6	9,58	59,4	96,4

- на втором этапе при растворении в ацетате аммония — Na, K, Ca, Mg, которые присутствуют в угле в виде катионов солей органических кислот;
- на третьем этапе при растворении в соляной кислоте — неорганические компоненты органических комплексов, а также Fe и Ca в форме оксидов, гидроокислов и карбонатов.

Результаты химического фракционирования по элементам Na и Ca для ряда исследованных отечественных углей приведены в табл. 2.3 [15].

Щелочные металлы простых солей и в составе органических соединений при горении топлива в топке испаряются и при охлаждении дымовых газов конденсируются преимущественно на частицах, образуя с алюмосиликатами поверхностные липкие пленки. Для характеристики склонности углей к образованию отложений в области конвективных поверхностей используется количество ионообменных «активных» щелочей Na_2O^a, K_2O^a (растворимость в воде и ацетате аммония) и содержание органически связанного и карбонатного кальция $CaO^{раст}$ (растворимость по трем этапам).

При отсутствии экспериментальных данных о Na_2O^a и $CaO^{раст}$ УралВТИ предложены корреляционные уравнения их оценки по широко доступным данным, %:

$$Na_2O^a = 0{,}949Na_2O - 0{,}113K_2O - 0{,}05; \qquad (2.5)$$

$$CaO^{раст} = CaO - 0{,}0025CaOA^d - 0{,}05. \qquad (2.6)$$

Следует однако заметить, что при хороших статистических показателях уравнения для Na_2O^a (коэффициент линейной корреляции $r = 99$ % и среднеквадратическое отклонение $\sigma = 0{,}3$ %) некоторые угли имеют значения, существенно отличающиеся от расчетных. В частности, для углей марок Б3, Г, Д не различимы склонные к загрязнению «соленые» угли (приозерный, силезский) и угли с повышенным содержанием натрия в составе алюмосиликатов (альбит, цеолит) и с низким потенциалом загрязнения (кузнецкие, азейский). С учетом этого для «новых» углей необходимо обязательное проведение экспериментальных исследований, а для некоторых из исследованных углей для прогнозирования используются зависимости, эмпирические коэффициенты в которых отличаются от приведенных в уравнении (2.5).

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

Условия и механизм образования отложений разных типов

В предыдущей главе показано, что летучая зола представляет собой совокупность частиц с различающимися составом и свойствами; некоторое количество минеральной части возгоняется и находится газообразной фазе. Дополнительно по ходу факела агрегатное состояние и способность частиц к закреплению на поверхностях нагрева и на ранее образовавшихся отложениях изменяется. Способностью к закреплению и формированию отложений в разных температурных зонах обладают разные совокупности частиц. В результате образуются отложения, состав, скорость формирования и свойства которых различаются.

При разнообразии свойств и состава частиц отложений для удобства анализа их можно объединить в группы по роли в формировании отложений. Например, в вероятностной модели шлакования УралВТИ [16] использовано деление частиц на четыре группы: матричные, липкие, инертные и абразивные, которые удовлетворяют следующим условиям.

Матричные частицы обладают достаточными липкими свойствами, чтобы налипать на не обладающие такими свойствами поверхности и закреплять в отложениях не липкие частицы. *Липкие частицы* образуют неразрушающиеся по мере роста отложений связи только при контакте с липкими поверхностями помимо, естественно, матричных. *Инертные частицы* закрепляются в отложениях при контакте с матричными и образуют разрушающиеся по мере роста отложений связи с липкими. *Абразивные частицы* разрушают отложения. По мере уменьшения температуры частиц по ходу факела соотношение частиц с разными свойствами изменяется; уменьшается доля матричных и липких, и возрастает количество инертных (рис. 3.1).

Шлаковые отложения. При высокой температуре дымовых газов и частиц в летучей золе содержится достаточное количество матричных и липких частиц для закрепления практически всех достигших поверхности частиц, включая инертные. В результате за счет липких свойств совокупности частиц образуются быстро растущие шлаковые отложения, прочность которых со временем увеличивается за счет спекания (рис. 3.2).

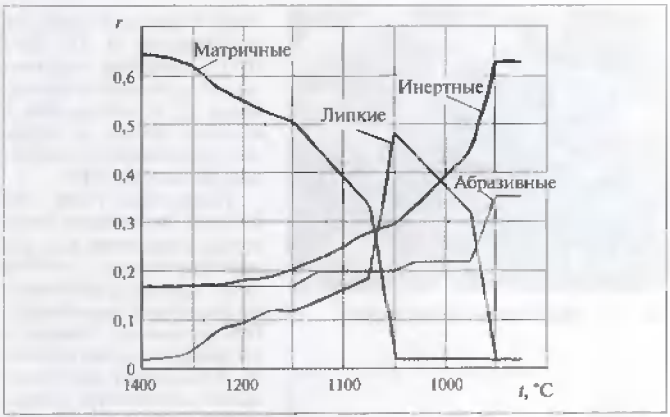


Рис. 3.1. **Изменение доли частиц разного типа в зависимости от температуры (расчет по распределению химического состава и размера индивидуальных частиц летучей золы бородинского угля)**

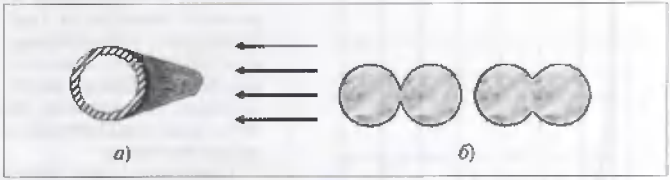


Рис. 3.2. **Схема образования гребневидных шлаковых отложений на поперечно омываемой трубе (*а*) и спекания шлаковых отложений (*б*)**

Морфология частиц в слабоспекшихся отложениях показана на рис. 3.3.

Средний химический состав развитых шлаковых отложений практически соответствуют среднему составу летучей золы и для некоторых углей может отклоняться от него при приближении к граничным температурным условиям формирования отложений этого типа. На рис. 3.4 для примера показано изменение содержания железа в зависимости от интенсивности роста отложений *g*.

Для большинства углей экспериментально наблюдаются достаточно четкие температурные границы, выше которых образуются шлаковые отложения. Температура газов, выше которой происходит образование таких отложений на неохлаждаемой или покрытой слоем отложений попе-

Рис. 3.3. **Морфология золовых частиц**

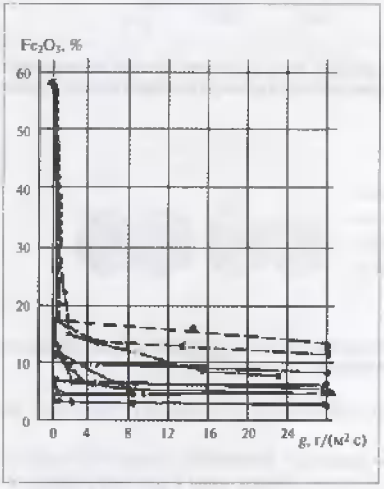


Рис. 3.4. **Содержание железа в отложениях**

речно омываемой трубе, по предложению Э. П. Дика (ВТИ) получила название температуры начала шлакования $t_{шл}$ и используется в качестве одного из основных показателей шлакующих свойств углей [4].

Температура газов, при которой фактически начинается шлакование $\vartheta_{ф.ш}$, для фиксированного топлива также зависит от температуры шлакуемой поверхности. При увеличении температуры поверхности она начинает шлаковаться при более низкой температуре газового потока (рис. 3.5). В свою очередь, при равной температуре дымовых газов ϑ температура поверхности $t_п$ изменяется в зависимости от условий теплообмена (термического сопротивления слоя отложений, эмиссионных свойств факела, расположения поверхностей, наличия очагов шлакования и других факторов).

При температурах газов и поверхности ниже граничных способностью к закреплению обладает относительно небольшая часть частичек летучей золы, состав которых отличается от среднего. При этом на поверхностях нагрева могут образовываться медленно растущие отложения, селективно обогащенные тем или иным компонентом, обеспечивающим закрепление частиц в отложениях и/или упрочнение последних, либо рыхлые отложения из мелких частиц летучей золы. В число селективно обогащенных отложений входят прочные *железистые*, *сульфатно-кальциевые отложения* и *загрязнения на базе активных щелочей*.

В процессе роста селективно обогащенных отложений температура их поверхности растет и достигает критической по условиям образования шлаковых отложений. При температуре газов $\vartheta > \vartheta_{ф.ш}$ селективные отложения служат первичным слоем, поверх которого развиваются быстро растущие шлаковые отложения.

Интенсивность формирования и прочность отложений возрастают при увеличении температуры газов и падающего теплового потока (см. гл. 4 и 5). При небольшом превышении температуры $\vartheta_{ф.ш}$ из-за невысокой прочности отложений по мере роста происходит их самораспшлаковка. При высоких значениях температуры газов ϑ и падающего теплового потока $q_{пад}$ температура поверхности отложений может достигать значений, при которых отложения плавятся и приобретают вязкость, достаточную для перемещения под действием силы тяжести (рис. 3.6), вплоть до образования слоя стекающего жидкого шлака. В этом случае слой шлаковых отложений также стабилизируется, но при гораздо большей толщине и прочности, что может вызывать проблемы при его разрушении и падении.

Шлаковые отложения формируются путем налипания частиц при их инерционном динамическом взаи-

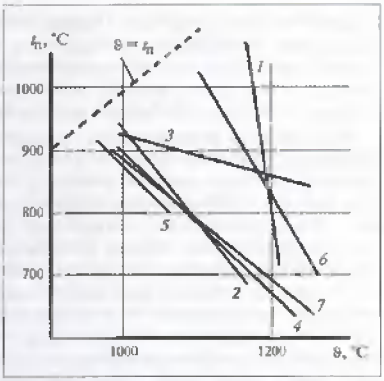


Рис. 3.5. **Граничные условия образования шлаковых отложений в зависимости от сочетаний значений температур газов ϑ и поверхности $t_п$:**

угли: *1* — экибастузский, *2* — кузнецкий Г; *3* — кузнецкий СС; *4* — кузнецкий 2ССОКШ; *5* — челябинский; *6* — кизеловский; *7* — башкирский

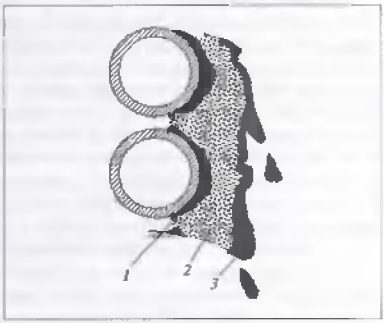


Рис. 3.6. **Схема развитых отложений на экранах при высоких падающих тепловых потоках:**

1 — прочные первичные; *2* — спекшиеся шлаковые; *3* — деформирующийся, «подвижный» слой

модействии с поверхностью. Определяющими факторами в их образовании служит соотношение температуры факела (частиц летучей золы), которое зависит от тепловых напряжений топки и склонности угля (индекса) к шлакованию, а также активное динамическое взаимодействие факела с поверхностью (наброс факела, поворот газового потока).

Возможность формирования больших шлаковых отложений на поверхностях нагрева в определяющей мере, помимо температурного уровня и собственно их свойств, зависит от характеристик первичного слоя. При рыхлом первичном слое шлаковые отложения непрочно удерживаются на поверхностях нагрева и по мере роста разрушаются под действием силы тяжести, при обдувке и термических нагрузках. Рост шлаковых отложений до значительных размеров возможен, если их масса воспринимается какой-либо опорой (расположенные ниже слабонаклонные поверхности, выступающие из ранжира трубы, локальные очаги шлакования на неохлаждаемых участках и др.), и при наличии прочного, крепко сцепленного с металлом поверхности нагрева первичного слоя. Когда химические и термические характеристики (коэффициент термического расширения) первичных отложений и материала труб похожи, отложения сохраняются в процессе охлаждения при останове котла и трудно удаляются при циклах очистки. Наибольшую прочность сцепления отложений с окисленной поверхностью металла труб обеспечивает химическая связь.

Формирование шлаковых отложений возможно непосредственно на трубах экранов за счет неровности трубной поверхности. В этом случае отложения также непрочно удерживаются на экранах; возможно их обрушение при изменении режимов и расшлаковка.

Рыхлые загрязнения, «завалы». При недостаточном количестве селективно закрепляющихся частиц на поверхностях нагрева формируются загрязнения рыхлой структуры из мелких инертных частичек. Слой или гребень таких отложений стабилизируется в течение нескольких часов и в процессе длительной компании работы котла находится в динамическом равновесии: он разрушается за счет инерционных сил крупных частичек и восполняется за счет переноса мелких частиц, в основном за счет турбулентных пограничных и кормовых вихрей.

Повторимся, что шлаковые отложения, образующиеся на подслое рыхлых загрязнений и, возможно, непосредственно на поверхностях нагрева, удерживаются на них непрочно, и в процессе роста шлаковых отложений происходит их самораспшаковка под действием силы тяжести.

Темп образования и уровень стабилизации рыхлых загрязнений увеличиваются с утонением помола топлива, уменьшением механического недожога C^I и теплового напряжения сечения топки q_F (скорости газового потока W^T). Загрязнение выше для углей, при сжигании которых образуется большое количество тонких частиц (фрагментация минеральной части превалирует над ее объединением в более крупные частицы). Локально образование рыхлых загрязнений интенсифицируется по высоте топки и в турбулизированных зонах неактивного омывания газовым по-

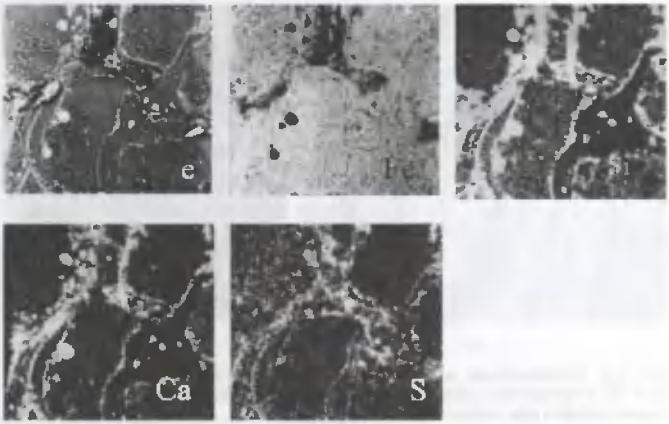


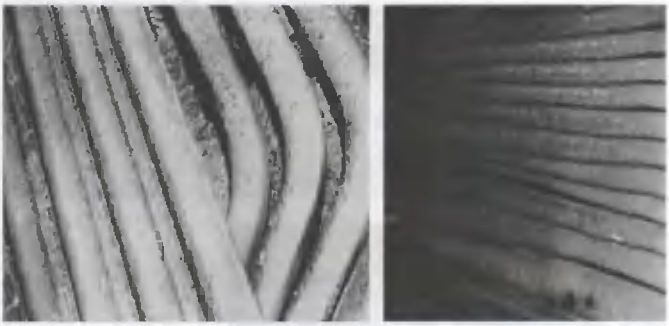
Рис. 3.7. **Распределение элементов в структуре обогащенных железом отложений, отобранных при сжигании азейского угля. Темный фон соответствует отсутствию элемента**

током (межтрубное пространство экранов, кормовые отложения поперечно омываемых труб).

В застойных зонах, вызванных неоптимальным профилем конструктивных элементов газоходов или перекрытием части сечения отложениями в процессе работы котла, происходит выпадение и накопление летучей золы в виде «завалов» (см. рис. 1.5, 1.6). Размеры завалов, если они не пополняются фрагментами образующихся выше шлаковых и селективно-обогащенных отложений, стабилизируются по мере образования аэродинамически оптимального профиля. В противном случае завалы могут расти до размеров, ограничивающих нагрузку котла из-за нехватки тяги.

Железистые отложения. При температурах газов $\vartheta \geq 900$ °С на поверхностях нагрева за счет высоких липких свойств обогащенных железом композиций (композиции $FeO–FeS–SiO_2$, $FeO–FeS$, расплавы пирротина FeS и пирита FeS_2, обогащенные железом переохлажденные расплавы стекол) образуются селективно обогащенные железом до 80 % весьма прочные отложения.

Высокая прочность отложений обусловлена значительной поверхностью контакта (деформацией) при налипании, спеканием и для углей с повышенным содержанием кальция дополнительно процессами сульфатизации в объеме между частицами (рис. 3.7).



а) *б*)

Рис. 3.8. **Формирование железистых отложений в условиях, близких к граничным (*а*) и чрезвычайно мощные железистые отложения в топке с низкотемпературным вихрем при сжигании азейского угля (*б*)**

В условиях, близких к граничным, железистые отложения на охлаждаемых трубах присутствуют в виде отдельных, не связанных друг с другом «крупинок». Их число, например при повышении температуры, возрастает до формирования поверхности вида «наждак» и далее сплошной поверхности или гребней с относительно большим образующим углом. Если условия образования шлаковых отложений не достигаются, железистые отложения могут расти до значительных размеров (рис. 3.8).

В силу низкой вязкости материала такие отложения при достаточном развитии покрывают всю омываемую газами поверхность, а из-за высокого содержания железа прочно закрепляются на стальных трубах. При отсутствии шлакования в зоне высоких температур железистые отложения могут достигать достаточно больших размеров (примерно до 200 мм в низкотемпературной вихревой топке котла ПК-24).

Коэффициент линейного расширения отложений этого типа близок к коэффициенту углеродистой стали, и отложения не разрушаются при изменениях температуры, разгрузке и останове котлов.

Наиболее характерно образование железистых отложений при сжигании углей с высоким содержанием пирита и низкой степенью углефикации (бурые, длиннопламенные, газовые угли). Для углей с высокой степенью углефикации (тощие угли, антрациты), которые сжигаются с тонким помолом топлива, воздушной сушкой и при высоких температурах, железистые отложения из-за интенсивного выгорания пирита не характерны или не образуются, даже при большом его содержании.

На трубах экранов железистые отложения на базе продуктов неполного горения пирита наблюдаются в зоне активного горения и несколько выше. К верху топки, за счет более полного выгорания пирита и интенси-

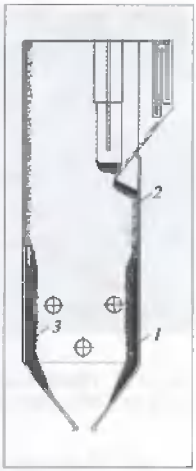


Рис. 3.9. **Характерные зоны образования отложений разного типа в топке при образовании прочных железистых отложений:**

1 — прочные селективные отложения; *2* — рыхлые отложения; *3* — шлаковые (спекшиеся) отложения

фикации формирования рыхлых загрязнений из мелких фракций летучей золы, характерен постепенный переход от прочных железистых к рыхлым неспекшимся отложениям. Другой зоной формирования железистых отложений являются расположенные в газоходе и активно омываемые газами поверхности пароперегревателя на выходе из топки и в поворотном газоходе, где отложения могут наблюдаться даже при отсутствии на экранах (рис. 3.9).

На отечественных котлах образование железистых отложений при преимущественном нахождении железа в форме карбонатов (сидерита) зафиксировано только при сжигании экибастузского угля в котле П-57 с низкими избытками воздуха ($\alpha_т'' < 1{,}1$). Этот котел характеризуется высоким тепловым напряжением сечения топки ($q_F = 5{,}9$ МВт/м^2) и небольшим загрязнением экранов рыхлыми мелкодисперсными отложениями. В этом случае железистые отложения, помимо ширм, наблюдались на экранах выше зоны активного горения.

Прочные сульфатно-кальциевые отложения образуются по тракту котла от топочных экранов до поверхностей водяного экономайзера и воздухоподогревателя за счет налипания низкоплавких расплавов типа CaO–CaS, низкоплавких бинарных расплавов Na–Ca–сульфат и других, и за счет механического или хемсорбционного закрепления мелких легко сульфатизируемых кальцийсодержащих частиц. Вне зависимости от механизма закрепления кальцийсодержащих частичек в отложениях, упрочнение отложений происходит в основном за счет сульфатизации кальция ($CaO + SO_3 \leftrightarrow CaSO_4$), в процессе которой объем закрепившегося материала значительно возрастает, заполняя пустоты и поры.

Сульфаты термодинамически стабильны при температурах $t < 1095$ °С [17]. В области высоких температур газов сульфатно-кальциевые отложения проявляются в качестве прочных первичных, в которых температура материала не превосходит предельной по условиям стабильности сульфатов. При этом характерно, что такие первичные отложения имеют несколько слоев. Непосредственно на трубах образуется слой железистых отложений, частицы в котором помимо налипания связываются сульфатизированным материалом (см. рис. 3.7).

а) *б*)

Рис. 3.10. **Отложения на лобовой трубе ширм при сжигании березовского угля (*а*) и неохлаждаемых элементах при сжигании азейского угля (*б*)**

При температурах газов ниже начала шлакования $\vartheta < \vartheta_{ф.ш}$ сульфатно-кальциевые отложения представляют самостоятельный тип отложений, который характеризуется большим содержанием кальция, высокой степенью сульфатизации и, соответственно, большой прочностью. Из-за формирования из твердых частиц или частиц с малой липкостью рассматриваемые отложения в зонах активного аэродинамического обтекания труб формируются в виде остроконечных гребней (рис. 3.10). Сами по себе такие отложения при естественном ухудшении теплообмена не дают значительного увеличения газодинамического сопротивления конвективных поверхностей нагрева. Однако при падении и разрушении они забивают расположенные ниже пакеты и являются очагами развития отложений и золошлаковых завалов.

Массовое содержание кальция в пересчете на оксиды и безсульфатную массу в отложениях рассматриваемого типа при сжигании березовского угля достигает 70 %. При сжигании других углей, в первую очередь в аэродинамически активных зонах, содержание кальция в отложениях, которые можно классифицировать как сульфатно-кальциевые, может быть существенно ниже ($CaO \geq 10$ %). Остальная часть сформирована частичками с иным химическим составом, и сульфат кальция выступает в качестве связующего материала, объединяющего частички золы в прочные отложения.

На рис. 3.11 показана микрофотография аншлифа участка прочных отложений, образовавшихся при сжигании азейского угля, и распределение по нему Ca и S, полученные при помощи электронного микрозонда. Черный фон соответствует отсутствию компонента. Видно, что пространство между относительно крупными некальциевыми частицами

а) *б*) *в*)

Рис. 3.11. **Распределение элементов Ca и S по площади сульфатизированных отложений, образовавшихся при сжигании азейского угля:**

а — электронная микрофотография поверхности аншлифа; *б* — распределение Ca; *в* — распределение S

(алюмосиликатные, железистые) заполнено материалом преимущественно из Ca и S.

При относительно низком содержании сульфата кальция существенное, а иногда превалирующее, упрочнение отложений происходит по механизму спекания.

Сульфатизации также подвергаются золошлаковые отложения с низким содержанием кальция и не обогащенные химически активными компонентами. Степень сульфатизации k_{SO_3} таких отложений может быть большой (табл. 3.1), вплоть до содержания серы большего, чем требуется для полного связывания кальция ($k_{SO_3}^{Ca} > 1,0$).

Под степенью сульфатизации понимается отношение фактического содержания серы в отложениях к теоретически возможному, потребному для полного перевода щелочно-земельных и щелочных элсментов в форму сульфатов:

$$k_{SO_3} = SO_3/(1,428CaO + 1,986MgO + 0,85K_2O + 1,292Na_2O); \quad (3.1)$$

Таблица 3.1. **Степень сульфатизации отложений, отобранных с пароперегревателей котлов, сжигающих угли с кислым составом золы**

Уголь, котел	Содержание в отложениях			k_{SO_3}	$k_{SO_3}^{Ca}$
	$\Sigma K/\Sigma O$	CaO,%	SO_3,%		
Экибастузский, П-57	11,44	1,93	3,12	0,58	1,13
Челябинский, БКЗ-210	3,89	4,85	4,51	0,38	0,65
Башкирский, ТП-170	1,26	6,7	11,19	0,86	1,17
Кузнецкий Г, ПК-40	3,83	9,59	15,25	0,67	1,11
Кызылкийский, ТП-170	2,97	9,66	21,51	0,94	1,56

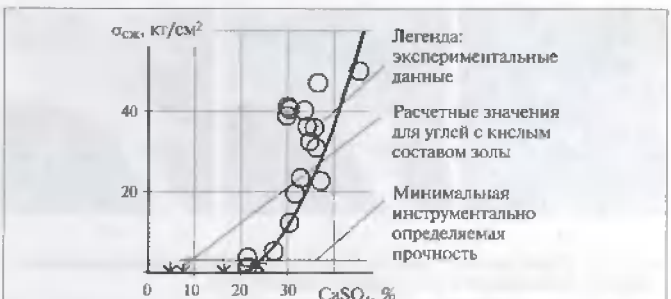


Рис. 3.12. **Зависимость прочности кормовых отложений $\sigma^{сж}$ от доли сульфата кальция**

$$k_{SO_3}^{Ca} = SO_3/(1{,}428CaO). \qquad (3.1а)$$

В том числе сульфатизируются рыхлые кормовые отложения, образующиеся из мелких частиц летучей золы. Однако при сжигании углей с кислым составом золы и, соответственно, низким или умеренным содержанием кальция отложения в области низких температур, даже при весьма высокой степени сульфатизации k_{SO_3} не приобретают сколь-либо существенной прочности.

Упрочненные или достаточно прочные отложения за счет сульфатизации из первоначально рыхлых кормовых и из других «аэродинамически» неактивных зон наблюдаются при сжигании углей с высоким содержанием кальция, например березовского, и определяющим, по-видимому, является доля образующегося сульфата кальция $CaSO_4$. На рис. 3.12 показана зависимость прочности первоначально рыхлых кормовых отложений от количества $CaSO_4$. Там же нанесены расчетные значения максимально возможного количества $CaSO_4$ для отложений углей из табл. 3.1. Видно, что, даже полная сульфатизация кальция, не обеспечивает их заметной прочности.

Загрязнения на базе активных щелочей. При высоком содержании активных щелочных компонентов (катионы простых солей типа NaCl или органических соединений с катионами натрия и калия) в факеле происходит их возгонка (испарение). Перешедшие в газовую фазу элементы или их соли реагируют с материалом частиц летучей золы или при снижении температуры по ходу факела конденсируются на поверхностях нагрева и, в основном, на поверхности частиц с образованием низкоплавких соединений. Такие соединения в разных температурных зонах могут образовываться на базе силикатов, сульфатов, хлоридов и фосфатов [17].

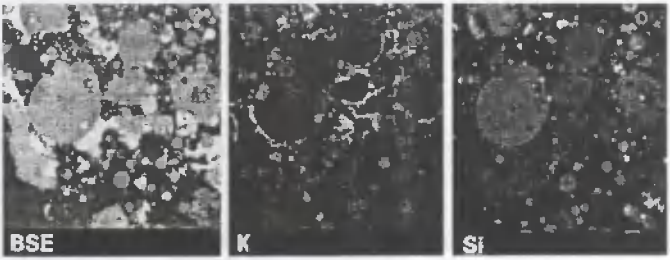


Рис. 3.13. **Микрофотография структуры (BSE) и карта распределения калия и кремния в отложениях, сформированных при совместном сжигании угля с 20 % соломы [18]**

При достаточной концентрации этих соединений на поверхности частиц летучей золы образуется липкая пленка (рис. 3.13).

За счет липких поверхностных пленок образуются быстро растущие отложения при низких значениях температуры поверхности и/или дымовых газов. Такие отложения формируются из мелких частиц летучей золы, поскольку последние имеют максимальную относительную поверхность и минимальную кинетическую энергию. Из-за относительно тонкой липкой пленки и незначительной деформации (площади контакта) при закреплении частиц отложения этого типа непрочные.

С течением времени такие отложения упрочняются, но сохраняют рыхлую структуру. Их образование снижает теплообмен, но не ведет к возникновению аварийных ситуаций. При стояночной расшлаковке отложения на базе сульфатов и хлоридов легко смываются водой.

Загрязнения на базе активных щелочей не характерны для традиционно используемых в отечественной энергетике углей, но могут иметь место при освоении новых месторождений (например, Нижне-Илийское в Казахстане, соленые угли Западного Донбасса) и при использовании биомасс. Для биомасс годичного цикла активные щелочные компоненты преимущественно представлены калием.

В заключение приведем положение, которое, в том числе, используется при решении практических вопросов по снижению шлакования котлов и в методах оценки шлакующих свойств углей. Это положение можно сформулировать следующим образом. В конкретных условиях формируются отложения, интенсивность образования которых выше, чем отложений других типов. Иллюстрация этого положения дана на рис. 3.14, *а*.

При низких значениях температуры газов 9 (температурная область *f*) на поверхности нагрева формируются рыхлые отложения, темп формирования которых *g* больше, чем железистых. При более высоких темпера-

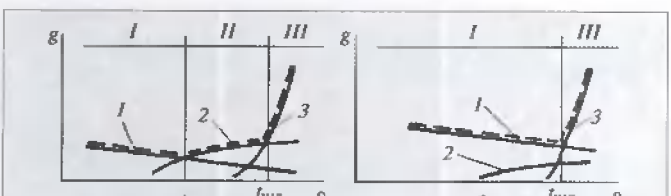


Рис. 3.14. **Иллюстрация положения об образовании отложений разных типов:**

а — исходный вариант; *б* — при утонении помола: *1* — темп формирования рыхлых отложений из мелких фракций летучей золы; *2* — то же прочных железистых; *3* — темп формирования шлаковых отложений; *I* — температурная область образования рыхлых отложений; *II* — температурная область образования прочных железистых отложений; *III* — область шлакования

турах газов темп формирования железистых отложений возрастает, а рыхлых, как минимум, не растет. В температурной области *II* образуются прочные железистые отложения. При температуре выше температуры начала шлакования $t_{шл}$ образуются быстро растущие шлаковые отложения (область *III*).

Изменяя интенсивность образования отложений одного из типов, можно изменять картину шлакования в целом. Например, при утонении помола топлива интенсивность образования рыхлых отложений из мелких фракций летучей золы возрастает, а прочных железистых за счет более быстрого выгорания пирита и преобразования железосодержащих соединений — снижается (рис. 3.14, *б*). В результате, используя этот фактор, можно избежать образования железистых отложений и перейти от ситуации прогрессирующего шлакования топки к режиму ее самораспшлаковки.

При соизмеримой скорости формирования отложений разного типа на поверхности нагрева образуются отложения переходного типа. В качестве примеров можно привести наличие в разной степени обогащенных железом слоев отложений на границе перехода от железистых к шлаковым или обогащение шлаковых отложений при сжигании углей с кислым составом золы компонентами основного состава по мере снижения температуры их формирования.

За рубежом используются иные принципы и показатели для классификации отложений на типы. Наиболее распространена американская классификация, согласно которой процессы образования отложений в котле подразделяются на шлакование (slagging) и загрязнение (fouling). Под шлакованием понимается образование отложений и связанные с этим проблемы в топке и поверхностях нагрева на ее выходе. Под загрязнением понимается образование отложений и связанные с этим пробле-

мы в конвективных газоходах котла вне зоны излучения из топки. В настоящее время принято дополнительное разделение загрязнения на высокотемпературное ($\vartheta > 1095$ °C) и низкотемпературное ($\vartheta < 1095$ °C). В качестве граничной температуры между высокотемпературным и низкотемпературным загрязнением принята температура стабильности сульфатов. Такая классификация предполагает, что связующим материалом между частичками в высокотемпературном загрязнении являются силикаты и используется также терминология «силикатный» индекс, «силикатное» загрязнение. Также принимается, что связующим материалом между частичками в низкотемпературном загрязнении являются сульфаты, используется терминология «сульфатный» индекс [17].

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

Показатели шлакующих и загрязняющих свойств углей

В предыдущих главах показано, что в разных зонах котла формируются отложения, различающиеся по составу и свойствам. Очевидно, что способность углей к образованию отложений разных типов не может характеризоваться каким-либо одним показателем.

Наиболее широко используемым методом прогнозирования поведения золы при высоких температурах традиционно является определение температур плавкости. Для углей с золой одного типа (например углей с кислым составом золы) с ростом тугоплавкости золы, как правило, возрастает температура, при которой образуются шлаковые отложения, и уменьшается их спекаемость.

Неоптимальность использования плавкости для оценки поведения золы при высоких температурах и ее шлакующих свойств широко признана (неточная характеристика лишь некоторых из аспектов шлакования). Тем не менее, плавкость золы сохраняется как единственный регламентированный показатель поведения золы при высоких температурах и до настоящего времени используется для выбора и контроля температурных параметров работы топочных камер и в некоторых математических моделях шлакования.

Минеральная часть углей состоит из совокупности различных минералов и не имеет единой температуры плавления. Плавкость золы характеризуется интервалом температур, в котором наблюдается изменение формы испытуемого образца и/или фазового состояния компонентов. Поведение при плавлении большинства топливных зол достаточно сложное, и лучшей характеристикой плавления считается определение кривой плавления по относительно новому методу. В этом методе кривая плавления (доля расплавленной золы от температуры) рассчитывается по данным дифференциального термического анализа ДТА. Температуры плавкости определяются по доле расплавленной фазы в образце. Обычно для использования идентифицируется две точки: t_{15} и t_{70}. Температура t_{15} подразумевает наличие 15 % по массе расплавленного материала, и считается, что при этой температуре частицы приобретают достаточную лип-

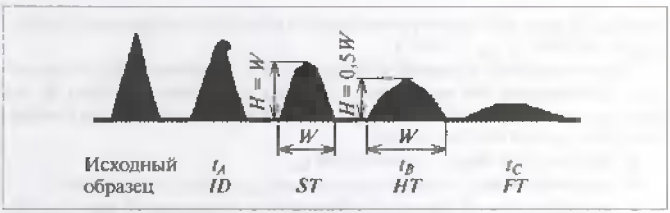


Рис. 4.1. **Изменение формы образца при определении плавкости и принятые характерные температуры (t_A, t_B, t_C по ГОСТ):**

ID (или *DT*) — начало деформации; *ST* — температура размягчения или плавления; *HT* — температура полусферы; *FT* — температура жидкоплавкого состояния (по ASTM 1857)

кость для формирования отложений. Температура t_{70} соответствует достижению 70 % плавленой фазы, и эта температура принимается за температуру, при которой внешняя поверхность отложений начинает стекать на вертикальном экране под действием силы тяжести [19].

Определение полной кривой плавления — весьма длительная процедура. Гораздо чаще используется традиционная технология определения трех — четырех характерных точек по изменению формы образца (рис. 4.1). Отметим, что определение плавкости по отечественному (ГОСТ 2057–94) и американскому (ASTM 1857) стандартам не вполне совпадают. По отечественной методике температура размягчения ST не определяется.

Неудовлетворительность использования температур плавкости по традиционной технологии для характеристики даже отдельных аспектов шлакования связана с низкой экспериментальной точностью метода, неясным физическим смыслом и плохим воспроизведением процессов превращения минеральной части в котле. Фиксируемые точки температур плавкости по этой технологии значительно выше тех, при которых появляется жидкая фаза, начинается шлакование и, тем более, упрочнение отложений. Уже первая фиксируемая точка плавкости t_A, которая редко используется из-за плохой воспроизводимости, в среднем на 120 °С выше температуры начала шлакования $t_{шл}$.

С учетом образования отложений разных типов и стадийности процесса шлакования в нашей стране по разработке ВТИ [4] для характеристики шлакующих свойств топлив принята совокупность показателей, которая включает *температуру начала шлакования* $t_{шл}$ и *склонность к формированию прочных первичных отложений*. Если такие отложения не образуются, происходит самораспшлаковка поверхностей нагрева, и не возникает проблем шлакования топочных экранов современных котлов. По классификации ВТИ угли относятся к шлакующим, если они имеют склонность к образованию прочных первичных отложений и $t_{шл} < 1050$ °С, а к нешла-

кующим — если отсутствует склонность к образованию прочных первичных отложений и $t_{шл} > 1050$ °С.

В исследованиях и разработках УралВТИ — Уральской теплотехнической лаборатории эти показатели дополнены и детализированы. В них шлакующие и загрязняющие свойства топлива характеризуются следующей совокупностью показателей:

- температура начала шлакования $t_{шл}$;
- характеристика прочностных свойств шлаковых отложений;
- нормированные индексы склонности к образованию прочных селективно обогащенных отложений (железистых P_{Fe} и сульфатно-кальциевых P_{Ca}), загрязнений на базе активных щелочей $P_{Na}^{я}$ и комбинированный индекс склонности к шлакованию топки $R_{я}$.

Наиболее достоверная характеристика шлакующих свойств угля может быть получена в результате обследования котлов, сжигающих интересующий уголь, и проведения на них измерений при помощи зондов, помещаемых на время в газоход котла. Информация, полученная в промышленных условиях, дополняется результатами анализа проб топлива и отобранного из котла золошлакового материала. За исключением оценки склонности к образованию сульфатно-кальциевых отложений, полная и достоверная характеристика шлакующих свойств может быть получена при проведении сжигания в котле опытной партии интересующего угля (опытное сжигание непроектного угля).

Экспериментально температура начала шлакования $t_{шл}$ определяется на котлах или крупных огневых стендах, в которых с приемлемым приближением воспроизводится температурно-временной режим частичек летучей золы, как минимальная температура факела, при которой начинается образование шлаковых отложений на поперечно омываемой неохлаждаемой трубе (зонде). Иллюстрация определения $t_{шл}$ по результатам измерения массы налипших отложений или визуального осмотра зонда после его кратковременной ($\tau \approx 20$ мин) выдержки в газоходе с разными значениями температуры газов приведена на рис. 4.2, *а*, *б*. В зависимости от химического состава минеральной части углей температура начала шлакования изменяется в диапазоне от 950 — 970 °С (угли бородинский, минусинский, кузнецкий газовый некоторых месторождений) до 1190 — 1210 °С (экибастузский уголь).

Прочностные свойства шлаковых отложений измеряются путем определения предельного напряжения на сжатие $\sigma_{сж}$ охлажденных проб отложений, накопленных на размещенном в газоходе котла зонде при отличающихся температурах (рис. 4.2, *в*) и проб в горячем состоянии при помощи динамометра (рис. 4.2, *г*), или предельного напряжения на растяжение σ_p' при температуре формирования отложений в стендовых условиях с помощью специального устройства [20]. Результаты определения прочности отложений для ряда исследованных углей показаны на рис. 4.3.

Прочность отложений возрастает с течением времени из-за протекания процессов спекания и сульфатизации, поэтому прочность отложе-

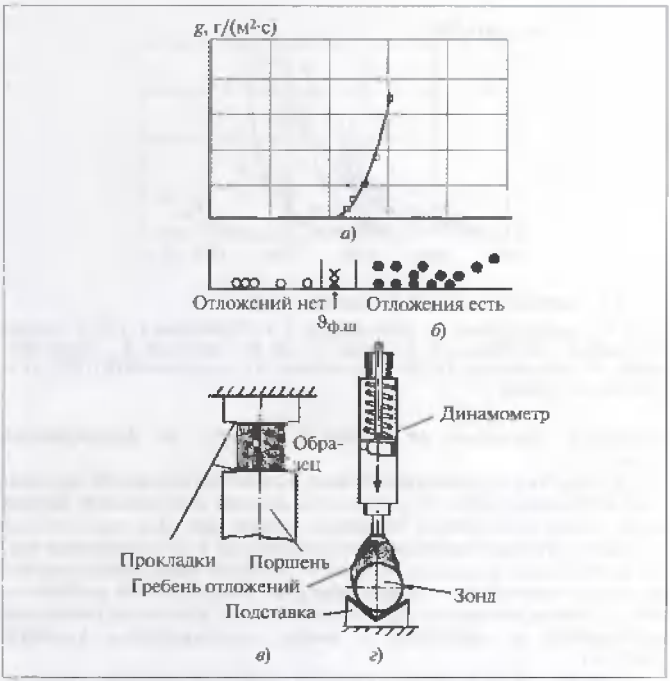


Рис. 4.2. **Иллюстрация к определению температурных условий начала шлакования по результатам измерения массы налипших отложений (*а*) или визуального осмотра зонда после его выдержки в газоходе (*б*) и схема измерений прочности на сжатие охлажденных проб в лабораторных условиях (*в*) и в горячем состоянии на котле при помощи динамометра (*г*)**

ний с поверхностей нагрева, как правило, выше, чем с зондов в относительно кратковременных исследованиях. С учетом этого, измеренная при помощи зондов прочность имеет относительный характер, и эти сведения применяются лишь для ранжирования углей по шлакующим свойствам и в эмпирических рекомендациях, например, для выбора температуры газов на выходе из топки $\vartheta''_т$. Для сравнительной оценки прочностных свойств шлаковых отложений используется показатель, определяемый как значение температуры, при которой достигается определенная прочность отложений $\vartheta_{\sigma=\text{const}}$. В частности используется температура t_{12} при

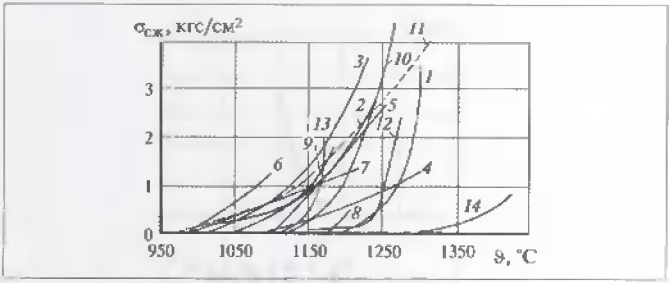


Рис. 4.3. **Прочность шлаковых отложений:**

угли: *1* — экибастузский; *2* — кизеловский; *3, 4* — кузнецкий Г, СС; *5* — минусинский; *6* — челябинский; *7* — башкирский; *8* — азейский; *9* — кызылкийский; *10* — ангренский; *11, 12* — приозерный; *13* — анжуйский (КНДР); *14* — синграули (Индия)

прочности отложений на разрыв в условиях их формирования $\sigma_p^t = 12{,}5$ кПа.

Склонность к образованию прочных железистых отложений оценивается преимущественно по результатам осмотра поверхностей нагрева котла после эксплуатации на интересующем угле. Для относительно зольных углей также используются охлаждаемые и неохлаждаемые зонды, размещаемые в газоходе на время от 20 мин до нескольких суток или на период проведения опытного сжигания. Относительное ранжирование углей по склонности к образованию прочных железистых отложений выполняется по признакам и шкале, предложенными УралВТИ (табл. 4.1).

Возможность образования и свойства сульфатно-кальциевых отложений с учетом их медленного роста изучаются путем осмотра котлов, отбора отложений и их последующего анализа с поверхностей нагрева после длительной работы на испытуемом топливе. Для классификации углей по склонности к образованию сульфатно-кальциевых отложений с использованием экспериментальных материалов предложен алгоритм, приведенный в табл. 4.2.

По результатам испытаний и осмотра котлов могут устанавливаться промежуточные значения нормированных показателей P_{Fe} и P_{Ca}. Промежуточные значения отражают отличие углей по экспертной оценке, при назначении которой учитывается различие в результатах исследований на однотипных котлах или по признакам классификации не включенным в табл. 4.1, 4.2 (интенсивность формирования отложений, различия в составе, прочности и температурных границах образования отложений). В табл. 4.1, 4.2 в скобках также приведен диапазон классификации углей по рассматриваемым показателям, в том числе оцененным по расчетным методам.

В отечественной энергетике не используются угли с высокой склонностью к загрязнению на базе активных щелочей и не проводилось исследований в промышленных условиях. Вариант классификации углей по склонности к образованию отложений рассматриваемого типа приведен в табл. 4.3.

Комбинированный показатель склонности углей к шлакованию топки R_{sl} по разработке УралВТИ является модификацией распространенного за рубежом расчетного показателя фирмы Бабкок – Вилькокс. Его при-

Таблица 4.1. **Признаки классификации углей по склонности к образованию железистых отложений (P_{Fe} — нормированный показатель)**

Ранг	P_{Fe}	Признаки классификации
Низкий (отложения отсутствуют)	0,2 (0 – 0,25)	Отложения на поверхностях котлов не обнаружены или имеют локальный, не определяющий шлакование характер. Зондами не воспроизводятся
Средний	0,4 (0,25 – 0,5)	Отложения имеются на одних котлах и отсутствуют на других. Воспроизводятся зондами только при низких избытках воздуха
Высокий	0,6 (0,5 – 0,7)	Отложения занимают значительную площадь на экранах в зоне активного горения и на поверхностях пароперегревателя. Воспроизводятся зондами в оптимальных режимах
Очень высокий	0,8 (>0,7)	Имеются интенсивные железистые отложения на всех поверхностях за исключением или включая верхнюю часть топки в зоне $\vartheta > 920$ °С. На зондах воспроизводятся в кратковременных опытах $\tau = 20$ мин в оптимальных режимах

Таблица 4.2. **Признаки классификации углей по склонности к образованию сульфатно-кальциевых отложений (P_{Ca} — нормированный показатель)**

Ранг	P_{Ca}	Признаки классификации
Низкий (отложения отсутствуют)	0,2 (<0,42)	Отложения на поверхностях нагрева не обнаружены или имеют локальный не определяющий характер
Средний	0,5 (0,42 – 0,6)	Отложения наблюдаются на поверхностях нагрева в зоне температур $\vartheta \geq 800$ °С
Высокий	0,8 (>0,6)	Отложения наблюдаются на поверхности водяного экономайзера

менение базируется на представлениях о возможности суммировать эффекты образования отложений отличающихся типов. Подробнее этот вопрос рассмотрен в конце данной главы при изложении сведений об оценочных, расчетных показателях.

В качестве примера в приложении 3 показаны результаты определения показателей шлакующих и загрязняющих свойств для ряда углей в промышленных условиях и на огневом стенде. Следует отметить, что эти приводимые результаты, строго говоря, применимы только для конкретных исследовавшихся партий топлива.

Оценка шлакующих и загрязняющих свойств по результатам специальных лабораторных исследований. Результаты определения шлакующих свойств топлив в промышленных условиях наиболее объективны и достоверны. Однако проведение подобных исследований трудоемкое, дорогое и часто, по многим причинам, например для углей неэксплуатируемых месторождений, не может быть проведено или нецелесообразно. На основе накопленных сведений и исследований механизма образования отложений разных типов в различных странах предложены методы оценки шлакующих и загрязняющих свойств по результатам специальных исследований небольших проб в лабораторных условиях.

Не полный перечень предложенных специальных исследований и показателей для оценки шлакующих и загрязняющих свойств включает: определение прочности при спекании золы лабораторного озоления (спекаемость материала); вязкость жидкого шлака и переохлажденного расплава; содержание кальция во внутренней золе; долю тяжелой фракции угольной пыли и/или содержание в ней железа; количество водорастворимых щелочных компонентов и др. За рубежом широко используются сведения о составе и распределении минеральных включений в угле (техника электронной сканирующей микроскопии, скомпонованной с компьютером, CCSEM) и минеральной части в составе органических соединений (химическое фракционирование).

Результаты таких исследований обычно используются в виде показателей (индексов), которые представляют собой упрощенные эмпирические зависимости склонности создавать зависящие от золы проблемы от результатов таких исследований.

Таблица 4.3. **Ранжирование топлив по склонности к образованию загрязнений на базе активных щелочей (P^{a}_{Na} нормированный показатель)**

Ранг	P^{a}_{Na}	Признаки классификации
Низкий	0,2	На лобовых участках в зоне температур газов ниже 800 °С прочные сульфатно-кальциевые отложения или отложения из мелкой золы с $(Na_2O - 0,3K_2O) < 0,6$
Средний	0,35 – 0,65	На лобовых участках труб в зоне 9 < 800 °С интенсивный рыхлый налет с содержанием $0,6 < (Na_2O - 0,3K_2O) < 4,2$
Высокий	0,652	Состав отложений $(Na_2O - 0,3K_2O) > 4,2$

Например, в разработке центра EERC (США) для расчета индекса шлакования используются сведения о размерах минеральных включений (в первую очередь иллита, кварца и пирита), ассоциированности кальцита и вязкости жидкой силикатной фазы, рассчитанной по составу. Для расчета индекса образования высокотемпературных загрязнений (силикатного индекса) используются сведения о размерах кварца и глинистых минеральных включений, содержании щелочных и щелочно-земельных элементов и вязкости жидкой силикатной фазы, рассчитанной по составу. Для расчета индекса образования низкотемпературных загрязнений (сульфатного индекса) используются сведения о содержании щелочных и щелочно-земельных элементов [17].

В нашей стране для прогнозирования шлакующих свойств по данным специальных лабораторных исследований разработан достаточно достоверный метод УралВТИ — Уральской теплотехнической лаборатории, которой базируется на большом объеме накопленных экспериментальных данных (исследования 37 партий углей в промышленных условиях и 43 на огневом стенде) и литературных сведениях.

В качестве исходных используются данные о разновидностях железа или серы в угле, результаты химического фракционирования (Na_2O^a, $CaO^{раст}$), сведения о спекаемости золы в совокупности с традиционными данными по углям.

Расчетные формулы для оценки показателей шлакующих и загрязняющих свойств по этому методу приведены ниже:

- *температура начала шлакования* $t_{шл}$. Несмотря на формирование шлаковых отложений из частиц разного состава и отличие состава отложений от среднего минеральной части при температурных условиях близких к граничным, значения $t_{шл}$ с приемлемой для практики точностью можно характеризовать средним химическим составом минеральной части. Значение $t_{шл}$ зависит от отношения компонентов кислого и основного состава *ko*. Эта зависимость имеет экстремальный характер (рис. 4.4).

Для углей с низким содержанием щелочных компонентов ($Na_2O < 2,8$ %) зависимость $t_{шл}$ от химического состава минеральной части приближенно можно описать двумя уравнениями:

$$t_{шл} = 945 + 7,77ko \text{ при } ko > ko_{кр} = 2,25; \quad (4.1)$$

$$t_{шл} = 940 + 52,23/ko \text{ при } ko < ko_{кр}. \quad (4.2)$$

Для топлив с повышенным содержанием щелочных компонентов температура $t_{шл}$ ниже и приближенно этот фактор может быть учтен введением поправки

$$\Delta t_{шл} = -12(Na_2O^* - 1,8), \quad (4.3)$$

где $Na_2O^* = Na_2O + K_2O^a$; K_2O^a — содержание этого компонента в ионообменной форме (см. гл. 2);

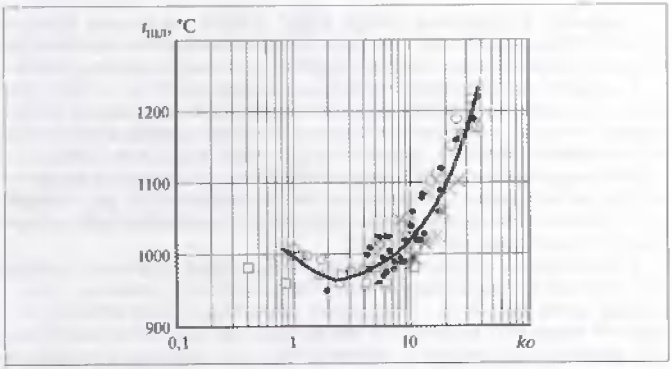


Рис. 4.4. **Температура начала шлакования $t_{шл}$ в зависимости от соотношения компонентов кислого и основного состава *ko* в минеральной части:**

● — измерения на котлах; ○ — пересчитанные применительно к промышленным условиям измерения на огневом стенде при содержании $Na_2O < 1{,}8$ %; □ — то же, при $Na_2O > 1{,}8$ %; × — смеси углей; линия — эмпирическая расчетная зависимость $t_{шл} = f(ko)$

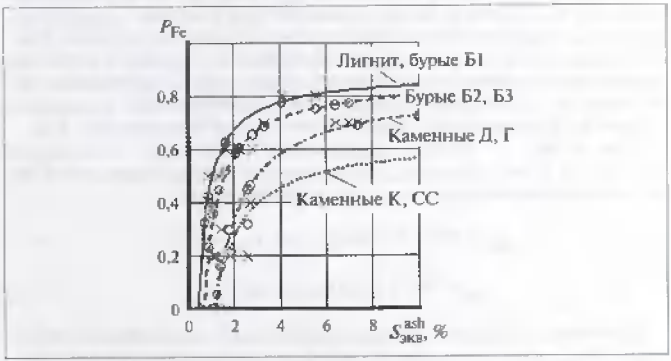


Рис. 4.5. **Показатель склонности к образованию прочных железистых отложений в зависимости от ранга углей и эквивалентного содержания пиритной серы**

• *показатель прочности отложений.* Температура, при которой достигается фиксированная прочность отложений, как и $t_{шл}$, имеет экстремальный характер от состава. Ее, в частности, можно выразить как

$t_{\sigma = \text{const}} = t_{\text{шл}} + \Delta t$, где Δt — превышение значений $t_{\text{шл}}$. По результатам исследований значение Δt зависит от спекаемости золы и $t_{\text{шл}}$, и, соответственно, при наличии таких экспериментальных материалов температура $t_{\sigma = \text{const}}$ может прогнозироваться по этим сведениям, например, как

$$t_{7,5} = t_{\text{шл}} + 45 + 520/\sigma_{\text{сп}}, \qquad (4.4)$$

где $t_{7,5}$ — температура при прочности отложений на разрыв в условиях их формирования $\sigma_p^t = 7,5$ кПа; $\sigma_{\text{сп}}$ — прочность при спекании при температуре $t_{\text{шл}}$, МПа.

В настоящее время эксперименты по спеканию в нашей стране не выполняются, и приближенная оценка показателя прочности отложений выполняется по составу минеральной части, что рассмотрено при изложении сведений о расчетных показателях;

- *склонность к образованию прочных железистых отложений* P_{Fe}. Обработка результатов исследований, выполненных в промышленных условиях, показала, что статистически наиболее значимыми факторами для оценки склонности (потенциала) углей к образованию таких отложений является содержание пирита в пересчете на зольность, температура горения и степень метаморфизма (марка) углей. Повторимся, что низкореакционные угли, сжигаемые при высоких температурах с тонким помолом и использованием схем пылеприготовления с промбункером пыли и воздушной сушкой, не образуют железистых отложений даже при высоком содержании пирита.

Для оценки P_{Fe} предложено следующее уравнение:

$$P_{\text{Fe}} = b_f - a_f/[S_p^{\text{ash}}(b_\vartheta - a_\vartheta \vartheta^{\text{a}}) + \Delta S], \qquad (4.5)$$

где $\Delta S = 0,1(0.813\text{Fe}_2\text{O}_3 - S_p^{\text{ash}})$, при $\Delta S < 0$ принимается $\Delta S = 0$; b_f, a_f, b_ϑ, a_ϑ — эмпирические коэффициенты, зависящие от марки угля (табл. 4.4); S_p^{ash} — содержание пиритной серы в пересчете на золу, %; Fe_2O_3, — содержание железа в минеральной части, %; ϑ^{a} — адиабатическая температура горения, °С.

Экспериментальные значения показателя P_{Fe} и расчетные линии корреляции в зависимости от сорта (ранга) угля и значения эквивалентного содержания пиритной серы в пересчете на золу ($S_{\text{экв}}^{\text{ash}} = S_p^{\text{ash}}(b_\vartheta - a_\vartheta \vartheta^{\text{a}}) + \Delta S$) показаны на рис. 4.5;

- *склонность к образованию загрязнений на базе активных щелочей* P_{Na}^{a}. Метод прогнозирования индекса P_{Na}^{a} разработан с использованием отечественных сведений по содержанию ионообменных щелочей и загрязняющим свойствам различных углей [15] с привлечением литературных данных по топливам с высокой склонностью к образованию загрязнений (рис. 4.6).

Рис. 4.6. **Склонность к образованию низкотемпературных отложений на основе активного натрия в зависимости от ионообменного натрия**

Склонность к образованию низкотемпературных загрязнений на базе активных щелочей вычисляется по данным об ионообменном натрии Na_2O^a (см. гл. 2) по выражению

$$P_{Na}^a = 0{,}416(Na_2O^a)0{,}313; \qquad (4.6)$$

- *склонность к образованию прочных сульфатно-кальциевых отложений* P_{Ca}. Метод оценки склонности углей к образованию сульфатно-кальциевых отложений исходит из гипотезы, что образование сульфатно-кальциевых и низкотемпературных загрязнений являются конкурирующими процессами и образуются те из них, скорость формирования которых выше:

$$P_{Ca} = 0{,}5(CaO^{раст})^{0{,}22} - P_{Na}^a, \qquad (4.7)$$

где $CaO^{раст}$ — количество кальция в составе органических соединений топлива и в карбонатах, определяемое методом химического фракционирования (см. гл. 2), %. При $P_{Na}^a < 0{,}25$ в формуле (4.7) принимается $P_{Na}^a = 0{,}25$.

Таблица 4.4. **Эмпирические коэффициенты корреляции для расчета P_{Fe} и $S_{зол}^{каф}$**

Класс, марка угля	a_f	b_f	a_9	b_9
Торф, лигнит, бурый Б1	0,42	0,88	0	1,0
Бурый Б2, Б3	0,567	0,856	0	1,0
Каменные угли Д, ДГ, Г,	0,976	0,825	0	1,0
Каменные угли КЖ, К, СС	0,75	0,64	0,0004	1,6
Каменные угли Т, Антрацит	0,27	0,42	0,0012	2,8

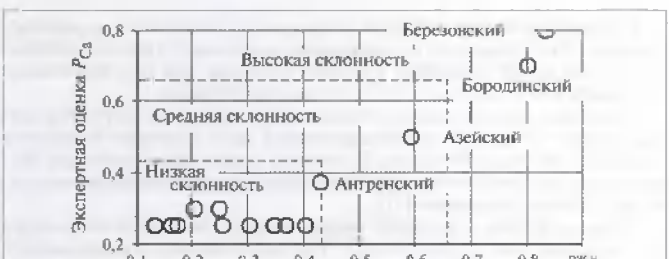


Рис. 4.7. **Экспериментальная (экспертная) и расчетная оценки склонности к образованию сульфатно-кальциевых отложений**

что по принятой классификации соответствует образованию необогащенных шелочами отложений из мелких частиц золы. Соотношение экспериментальной и расчетной оценок склонности к образованию сульфатно-кальциевых отложений показано на рис. 4.7.

Оценка показателей шлакующих и загрязняющих свойств по справочным (широко доступным) сведениям. В нашей стране в связи с существенным сокращением экспериментальных исследований наиболее востребованными являются разработки по оценке шлакующих свойств и шлакования котлов с использованием ограниченного количества сведений в объеме традиционного справочного материала и технических условий на поставку топлива.

Для большинства углей, шлакующие свойства которых исследованы, можно достоверно прогнозировать уровень и изменение от партии к партии шлакующих свойств по широко доступным сведениям, вплоть до достаточности данных о зольности или содержании отдельных компонентов. В частности, можно достоверно ранжировать по доступным сведениям угли для конкретных электростанций, на которые поступает топливо с одним типом золы и от определенных поставщиков.

Для характеристики шлакующих свойств углей по доступным сведениям в мире разработаны десятки эмпирических показателей. Однако эмпирические показатели, в которых используются только данные о среднем химическом составе минеральной части, элементном составе и технических характеристиках, при любом их совершенстве с определенной степенью достоверности обеспечивают прогнозирование лишь для углей, на базе которых они получены, и обладают невысокой экстраполяционной способностью. Такое положение обусловлено тем, что, как рассмотрено в гл. 2, сам по себе средний химический состав в ограниченной, неоптимальной мере характеризует минеральную часть и ее преобразования при пылеугольном сжигании топлива.

Использование эмпирических показателей, построенных на рассматриваемой базе данных для «незнакомых», особенно для сильно шлакующих углей, может приводить к грубым ошибкам. Для них необходимо проводить дополнительные специальные исследования.

Из показателей (индексов) с использованием широко доступных данных наиболее широкое распространение в мире получили показатели компании Бабкок – Вилькокс. В качестве справочного материала они приведены в отечественных методических рекомендациях по проектированию топочных устройств [21].

Индексы Бабкок – Вилькокс предназначены для оценки шлакующих R_S и загрязняющих R_F свойств углей. Под шлакованием по американской терминологии понимаются проблемы, связанные с образованием отложений в топке; под загрязнением — далее по газоходу котла в зонах вне излучения из топки без учета типа отложений и механизма их образования. Используемые для расчета индексов данные и сами индексы различаются в зависимости от типа золы (восточный, битуминозный тип и западный, лигнитный по американской классификации). В частности для углей с битуминозным типом золы $Fe_2O_3 > (CaO + MgO)$ индексы имеют вид:

$$R_S = S_t^d B/A; \tag{4.8}$$

$$R_F = Na_2O B/A, \tag{4.9}$$

где

$$B = CaO + MgO + K_2O + Na_2O + Fe_2O_3 = \Sigma O + Fe_2O_3; \tag{4.10}$$

$$A = \Sigma K = SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3. \tag{4.11}$$

Индексы Бабкок – Вилькокс разработаны по результатам исследований американских углей. Выполненная в разных странах их проверка для иных углей (отечественных, китайских, топлив бывшей Югославии, углей новых американских месторождений) показала неудовлетворительные результаты.

Для характеристики шлакующих и загрязняющих свойств в нашей стране в основном используется метод УралВТИ — Уральской теплотехнической лаборатории, которой, в частности, разработан и в варианте оценки показателей этих свойств по традиционным справочным материалам. Расчет выполняется по уравнениям (4.1) – (4.3), (4.5) – (4.7), в которых вместо исходных данных по специальным исследованиям (S_p^{ash}, Na_2O^a, $CaO^{расч}$) применяются значения их оценки по доступным сведениям (см. гл. 2). Повторимся, что такая оценка для «новых» углей, даже при хорошей статистической достоверности используемых эмпирических корреляций, может давать грубые ошибки. Для уменьшения риска грубых ошибок при использовании ограниченной информации и решения новых задач методика оценки шлакующих свойств перманентно дополняется и совершенствуется. В частности, это достигается пополнением банка данных об исследованных углях и применением для разных уг-

лей отличающихся эмпирических корреляционных зависимостей расчета недостающих характеристик топлива. Такой вынужденный подход обуславливает предпочтительное использование метода в виде компьютерной программы, например Coral [22], взамен приведенного небольшого набора простых зависимостей.

При изложении выше метода расчета показателей шлакующих свойств не затрагивались вопросы оценки прочностных свойств шлаковых отложений по сведениям об их составе и расчета показателя (индекса) R_{sl}, характеризующего суммарный потенциал углей к шлакованию топочных экранов (вариант расчетного показателя R_S компании Бабкок-Вилькокс). Эти сведения приводятся ниже:

- *показатель, учитывающий прочностные свойства шлаковых отложений.* В методике УралВТИ — Уральской теплотехнической лаборатории показатель $t_{\sigma=const}$, учитывающий прочностные свойства шлаковых отложений, используется для регламентирования рекомендуемой (допустимой) по условиям шлакования температуры газов на выходе из топки $(\vartheta_T'')^{доп}$. Допустимое значение температуры также зависит от склонности углей к образованию прочных железистых отложений, характеризуемых показателем P_{Fe}. Для практики удобнее непосредственно оценивать температуру $(\vartheta_T'')^{доп}$, °С, и для углей с кислым составом золы $ko > 2{,}25$

$$(\vartheta_T'')^{доп} \le t_{шл} + \Delta\vartheta, \tag{4.12}$$

где $t_{шл}$ — определяется по уравнениям (4.1) – (4.3);

$$\Delta\vartheta = 645 - 0{,}446t_{шл} - 39{,}117P2 \text{ при } P_{Fe} < 0{,}5; \tag{4.13}$$

меньшее значение по (4.13) и

$$\Delta\vartheta = 1115 - 0{,}939t_{шл} - 274{,}76P2 \text{ при } P_{Fe} > 0{,}5; \tag{4.14}$$

$$P2 = K_2O/(Na_2O + CaO + MgO). \tag{4.15}$$

При расчетных значениях 180 °С < $\Delta\vartheta$ < 50 °С принимаются, соответственно, значения 50 и 180 °С;

- *комбинированный индекс склонности углей к шлакованию топки* R_{sl}. Ранее рассмотрено, что шлакование топки в значительной мере зависит от склонности углей к формированию прочных первичных отложений P_{Fe} и температурных условий начала образования шлаковых отложений $t_{шл}$. В свою очередь, для углей с кислым составом или битуминозным типом золы эти показатели прогнозируются по содержанию в угле пирита и отношению кислых и основных компонентов в минеральной части. Анализ эмпирического индекса Бабкок – Вилькокс (4.8) показывает, что его с определенным приближением можно трактовать как комбинацию в виде произведения склонности к формированию железистых отложений S_f^d и величины, обратно пропорциональной температуре начала шлакования B/A.

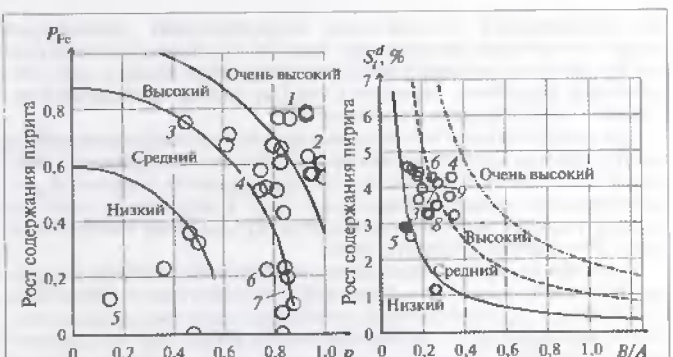


Рис. 4.8. **Сравнение представления индекса шлакования топки при алгебраическом сложении показателей (изолинии R_{st} УралВТИ) (*а*) и их умножении (изолинии R_s фирмы B&W) (*б*). Границы деления на группы по шлакующим свойствам показаны по классификации УралВТИ:**

угли: *1* — ангренский; *2* — КАУ; *3* — подмосковный; *4* — азейский; *5* — экибастузский; *6* — нерюнгринский; *7* — кузнецкие; *8* — минусинский; *9* — силезский

В комбинированном индексе УралВТИ склонности углей к шлакованию топки R_{st} уточнено прогнозирование определяющих факторов и принято их алгебраическое сложение (4.16) вместо умножения (4.8). Последнее не является очевидным, и при накоплении экспериментальных данных и дополнительном анализе может уточняться индекс, так же как и вообще необходимость комбинированного индекса. Расчет индекса R_{st} выполняется по формуле

$$R_{st} = 0{,}707[P_{Fe}^2 + P_{ct}^2]^{0{,}5}, \qquad (4.16)$$

где $P_{ct} = 1 - 13{,}275ko/(0{,}828^a - 945)$; ko — отношение компонентов кислого и основного состава; ^{a} — адиабатическая температура горения. Графически индекс R_{st}, его составляющие и сравнение с индексом Бабкок-Вилькокс R_S показаны на рис. 4.8.

Расчетные показатели шлакующих и загрязняющих свойств ряда углей характерного состава приведены в приложении 4.

ГЛАВА ПЯТАЯ

Влияние конструктивных и режимных факторов на шлакование и загрязнение

При пылеугольном сжигании одного и того же угля ситуация по шлакованию разных котлов может кардинально различаться в зависимости от оптимальности конструктивных решений и их соответствия шлакующим свойствам топлива. При сжигании одинакового угля в котлах одной конструкции состояние по шлакованию может изменяться от эксплуатационно-чистого до аварийного в зависимости от режима работы, состояния поверхностей нагрева и, на что не всегда обращают внимание, предыстории. Снижение ущерба от шлакования достигается за счет:

- выбора параметров топки, лучше отвечающих специфике топлива и его минеральной части;
- рациональной конструкции и компоновки топочногорелочных устройств;
- внедрения пылеприготовительных и топочно-горелочных устройств, позволяющих управлять шлакованием. Для персонала ТЭС важно иметь возможность влиять на ситуацию по шлакованию работающего оборудования помимо крайнего случая его разгрузки, и оборудование должно отвечать этим требованиям. За рубежом отработаны следующие, наиболее влияющие операции: увеличение избытка воздуха, уменьшение частоты вращения классификатора (огрубление помола топлива), увеличение третичного воздуха выше факела (OFA), перераспределение топлива по ярусам;
- совершенствования систем мониторинга и контроля шлакования;
- совершенствования средств и регламента работы средств очистки от отложений.

Последние из названных методов рассмотрены в следующих главах. Здесь рассмотрим, какие факторы, и каким образом влияют на ситуацию по шлакованию и, иногда, шлакующие свойства летучей золы.

5.1. Температура газов

Шлакующие свойства летучей золы, шлакование и загрязнение котлов зависят от температурного уровня топочного процесса и локальных значений температуры по газовому тракту. Под температурным уровнем топочного процесса будем понимать усредненную в зоне активного горения температуру факела $\vartheta^{\text{гор}}$, и подразделять топки на низко-температурные, с традиционным сжиганием (пылеугольные топки с твердым шлакоудалением) и высокотемпературные, в частности топки с жидким шлакоудалением. В общем случае влияние температурного уровня процесса сжигания $\vartheta^{\text{гор}}$ и локальных значений температуры газов по тракту котла ϑ на шлакование в широком смысле этого слова (образование отложений разных типов, приводящее к проблемам в эксплуатации) может иметь противоположный знак. В этой части главы без дополнительных ссылок рассматривается влияние локальных значений температуры газов в рамках традиционного пылеугольного сжигания; краткая информация о влиянии температурного уровня процесса сжигания приводится в § 5.2.

Локальная температура газов ϑ (далее для краткости использован термин «температура газов») является наиболее очевидным и определяющим фактором шлакования, и большинство мероприятий по уменьшению шлакования в явном виде или как следствие изменения других факторов (например, избытка воздуха, тонкости помола топлива) направлено на снижение температуры.

Как рассмотрено в предыдущих главах существуют граничные по температуре условия, ниже которых формирование отложений определенного типа не происходит, в том числе образование шлаковых отложений наблюдается только при температурах выше температуры начала фактического шлакования $\vartheta_{\text{ф.ш}}$ (или температуры начала шлакования $\varepsilon_{\text{шл}}$ при фиксированных экспериментальных условиях). По мере увеличения температуры газов выше $\vartheta_{\text{ф.ш}}$ растет доля летучей золы с липкими и матричными свойствами, а сами частицы становятся менее вязкими. В результате с ростом температуры ϑ обычно достаточно резко увеличивается интенсивность шлакования (рис. 5.1, *а*), прочность формирующихся отложений (см. рис. 4.3) и их упрочнение за счет спекания (рис. 5.1, *б*).

С ростом температуры выше определенной граничной возрастает и интенсивность образования прочных первичных отложений.

Рост толщины шлаковых отложений с увеличением температуры прекращается, когда на поверхности образуется стекающий под действием силы тяжести расплав шлака. С появлением пластических или текучих свойств шлака измеряемые значения его прочности снижаются. По тракту котла средняя по поперечному сечению температура газов закономерно изменяется от максимального значения в зоне горения $\vartheta^{\text{ф}} = 1300 \div 1700$ °С в разных котлах до температуры уходящих газов $\vartheta^{\text{ух}} < 200$ °С, и, соответственно, в разных температурных зонах образуются отложения отличающихся типов (рис. 5.2).

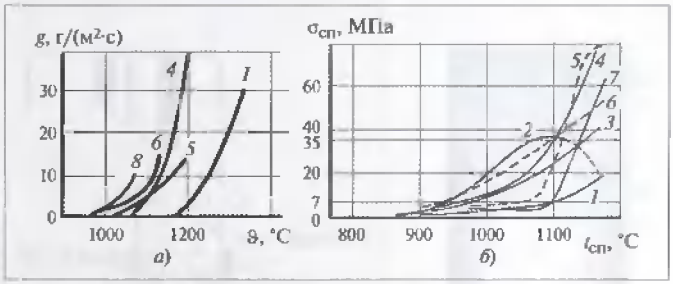


Рис. 5.1. **Интенсивность образования (*а*) и прочность при спекании шлаковых отложений (*б*) в зависимости от температуры и марки угля:**

1 — экибастузский; *2* — кузнецкий Г ($Na_2O + K_2O$ = 4,0 %); *3* — кузнецкий СС; *4* — кизеловский; *5* — минусинский; *6* — челябинский; *7* — башкирский; *8* — кузнецкий ССОКII

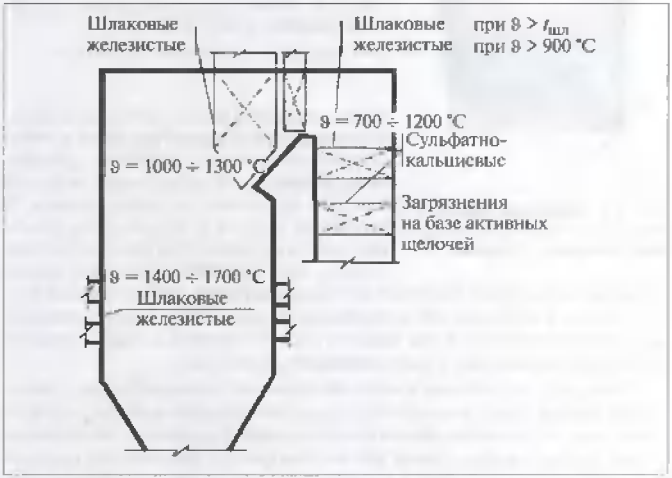


Рис. 5.2. **Распределение температур и характерных отложений по тракту котла**

Температура газов, падающие тепловые потоки, расположение и размер шлаковых образований закономерно изменяются по высоте топки и ее поперечному сечению (см. рис. 3.9 и рис. 5.3), а также поперечному се-

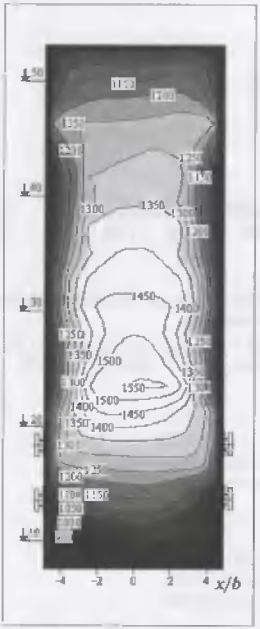


Рис. 5.3. **Изотермы факела в топке котла П-57 при сжигании кузнецкого угля марки ДГ**

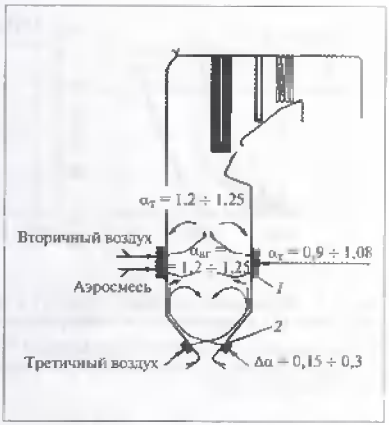


Рис. 5.4. **Схема топочно-горелочного устройства с нижним дутьем [61]:**

1 — горелка; *2* — сопло нижнего дутья

чению поворотных и опускных газоходов. Максимальная температура газов и образование отложений с наиболее проплавленной структурой наблюдается на уровне или чуть выше верхнего яруса горелок. К выходу из топки и в направлении холодной воронки температура газов снижается. Однако, при достаточно высоком уровне температуры в начале холодной воронки, например, при ее близком расположении к горелкам, здесь возможно закрепление и неограниченный рост шлаковых очагов, в том числе за счет стекающего шлака, сепарации шлаковых образований с расположенных выше стен.

Очевидно, что для ряда котлов обеспечение безаварийной по шлакованию работы может быть достигнуто за счет внедрения мероприятий по снижению температуры газов в начале холодной воронки (снижение нагрузки нижнего яруса горелок или подъем факела, организация нижнего воздушного дутья [23] (рис. 5.4), воздушного дутья вдоль экранов в верхней части холодной воронки, снижение уровня расположения холодной воронки и ее элементов).

В котлах с односторонним (фронтальным) расположением горелок поле температур факела по глубине топки несимметричное, и максимум температур смещен к противоположной от горелок стенке, как, напри-

мер, показано на рис. 5.5. Уменьшение шлакования заднего экрана достигается снижением дальнобойности горелок, организацией заднего дутья или воздушной завесы.

Безаварийная по условиям шлакования работа расположенных в выходном окне поверхностей нагрева, помимо оптимизации их конструкции и применения средств очистки, зависит от соответствия достигаемого здесь температурного уровня дымовых газов шлакующим свойствам используемого угля. Допустимая по условиям шлакования температура газов на выходе из топки $(\vartheta''_т)^{доп}$ для поверхностей конкретного типа и при определенном уровне температурной разверки определяется зависимостью «прочность отложений – температура» и склонностью угля к формированию прочных первичных отложений. Температура $(\vartheta''_т)^{доп}$ изменяется в широких пределах — от 1120 °С для канско-ачинских углей до 1300 °С для экибастузского угля (табл. 5.1).

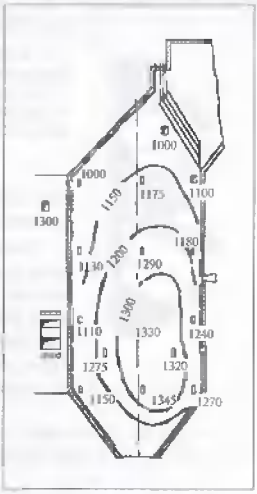


Рис. 5.5. **Поле температур в топке котла ПК-14 с фронтальным расположением**

Приведенные в табл. 5.1 значения допустимых температур обоснованы исследованиями УралВТИ и часто выше, чем рекомендуются в действующих методических указаниях [21].

Обеспечение температуры газов на выходе из топки не выше $(\vartheta''_т)^{доп}$ при проектировании котла достигается в основном за счет выбора высоты топочной камеры, использования дополнительных поверхностей нагрева в виде двусветных экранов, разделительных ширм, «шек».

При эксплуатации котлов возможно уменьшение температуры $(\vartheta''_т)^{факт}$ за счет режимных факторов (влияние α, R_{90} и других приведено ниже), оптимизации (или регулирования) положения факела, использования очистки топочных экранов. Реже применяется снижение общего или локального уровня температур путем рециркуляции газов в верхнюю часть топки. Для регулирования положения факела используются поворотные горелки или плоско-факельные горелки (рис. 5.6) отечественной разработки (ЦКТИ-ТКЗ), если это не сопровождается возникновением проблем шлакования нижней части топки или холодной воронки. Такой же результат, помимо уменьшения теплового напряжения зоны горения, достигается при отключении горелок в случае их многоярусного расположения или многоярусного расположения сопел в вертикальном блоке,

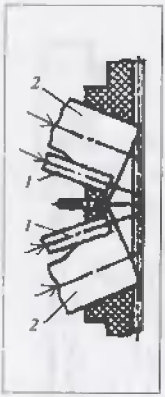


Рис. 5.6. **Схема плоскофакельной горелки:**

1 — каналы аэросмеси; *2* — каналы вторичного воздуха (увеличение подачи вторичного воздуха через верхний канал приводит к смещению ядра факела и возможного шлакования в нижнюю часть топки и снижению температурного уровня дымовых газов на выходе из топки)

что часто используется на зарубежных котлах, даже небольшой мощности.

Решение или улучшение ситуации по шлакованию поверхностей нагрева в выходном окне и поворотных газоходах также может быть достигнуто за счет изменения профиля температур газов, снижения температурной разверки $\delta\vartheta = (\vartheta^{max} - \vartheta_{ср})/\vartheta_{ср}$. При равномерном распределении топлива и воздуха по горелкам максимальная локальная температура

Таблица 5.1. **Допустимые по условиям шлакования значения температур газов на выходе из топки (при температурной развертке $\vartheta_{max}/\vartheta_{ср} = 1{,}05$)**

Угли	Рекомендуемые значения
Экибастузский:	
$A^d > 40$ %	1300
$A^d < 40$ %	1275
Кузнецкие:	
талдинский ДГ	1230
грамотеинский Г	1150
черниговский СС	1200
сибиргинский 2СС	1215
челябинский	1090
приозерный	1150
минусинский	1180
башкирский	1200
ангренский	1140
подмосковный	1125
азейский	1160
Канско-ачинские:	
березовский	1120
бородинский	1120

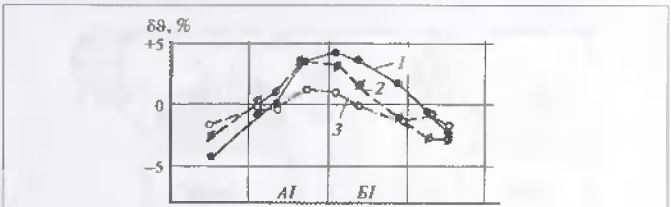


Рис. 5.7. **Неравномерность распределения температуры газов по ширине поворотного газохода котла П-57:**

1 — равномерная крутка воздуха в горелках; *2, 3* — снижена крутка воздуха в крайних горелках

газов и, соответственно шлакование наблюдаются в центральной по ширине части газохода (рис. 5.7).

Уровень температурной разверки, профиль снижения температуры к периферии объективно зависит от размеров газохода и эмиссионных свойств факела. Но они могут быть изменены в благоприятную сторону за счет режимных мероприятий, таких как организация неодинаковой крутки потока в разных горелках, перераспределение воздуха и топлива по ширине газохода.

Потенциально возможно уменьшение максимальных температур газов в центральной по ширине части газохода и уменьшение среднего уровня на выходе из топки путем снижения нагрузки центральных горелок или увеличения расхода на них воздуха. Достигаемый эффект зависит от оптической плотности факела и габаритов топки. Реально при неоптимальном внедрении указанных мероприятий средний уровень температур на выходе из топки может возрасти из-за усиления шлакования экранов. Похожий эффект даст и изменение газодинамики топки при изменении положения, угла раскрытия и направления крутки горелочных струй.

По высоте поворотного газохода профиль температур газов неодинаковый в зависимости от компоновки газоходов. В котлах Т-образной компоновкой горелок более горячие газы из центральной зоны топки достигают потолка, и в поворотном газоходе максимальная температура имеет место в верхней части поворотного газохода, в отличие от котлов с П-образной компоновкой, в которых более горячие газы поступают в нижнюю часть (рис. 5.8).

Это различие распределения температур необходимо учитывать при организации контроля, в частности, шлакования. Путем перераспределения тепловыделения по горелкам, например, относительной разгрузки со стороны выходного окна [24] максимальная температура может быть уменьшена (рис. 5.9).

Возможность улучшения ситуации по шлакованию путем уменьшения температурной разверки газов часто недооценивается. Вместе с тем, сни-

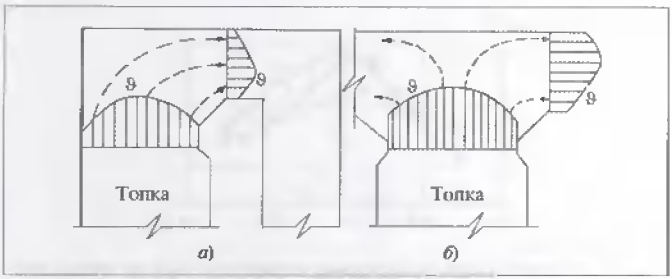


Рис. 5.8. **Схема формирования профиля температур в поворотном газоходе котлов с П-образной (*а*) и Т-образной (*б*) компоновкой газоходов**

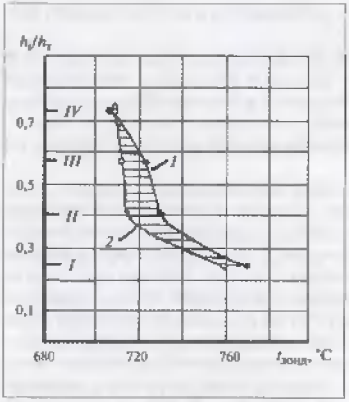


Рис. 5.9. **Изменение профиля температур по высоте поворотного газохода котла ТП-230-2 с П-образной компоновкой газоходов при перераспределении топлива по горелкам:**

1 — равномерное распределение топлива; *2* — разгрузка горелок со стороны выходного окна

жение максимальной температуры на 10 – 15 °С обычно эквивалентно повышению бесшлаковочной мощности котла по условиям шлакования пароперегревателя примерно на 5 %.

Из-за неэффективности расшлаковки плотных горизонтальных пакетов температуру газов перед ними $\vartheta'_{к.ш}$ целесообразно ограничивать таким образом, чтобы локальные значения не превосходили температуры начала шлакования, $(\vartheta')^{доп} \le t_{шл}/(1 + \delta\vartheta)$.

Для углей склонных к образованию прочных сульфатно-кальциевых отложений допустимая на входе в опускную шахту температура должна приниматься ниже и рекомендуемые УралВТИ значения составляют $(\vartheta')^{доп} = 650 \div 800$ °С, снижаясь по мере увеличения показателя P_{Ca}.

При неудаче режимных и мало затратных реконструктивных мероприятий необходимый для бесшлаковочной работы температурный уровень по топке и газоходам котла обеспечивается за счет снижения (огра-

ничения) нагрузки. Снижение нагрузки на 10 % ведет к уменьшению температуры газов на выходе из топки на 20 – 30 °С при отсутствии видимого изменения состояния экранов по условиям шлакования и до 100°С при высоких нагрузках шлакующихся котлов.

Приемлемая по условиям шлакования работа всех действующих котлов на пониженных нагрузках ($0,7 - 0,8 D_{ном}$) указывает на неоптимальный выбор параметров шлакующихся котлов и возможность обеспечения номинальной нагрузки при их оптимизации. В первую очередь это касается выбора тепловых напряжений топочной камеры и температур газов по тракту котла. Более подробно этот вопрос рассмотрен в параграфе, посвященном анализу конструктивных недостатков котлов с позиций шлакования.

5.2. Температурный уровень процесса сжигания

В отличие от локальных температур газов, влияние температурного уровня процесса сжигания на шлакование неоднозначное и более сложное. Кратко благоприятные последствия снижения температурного уровня сжигания с позиций шлакования следующие:

- уменьшаются локальные температуры газов, падающие тепловые потоки в зоне активного горения и, тем самым, шлакование зоны;
- формируется летучая зола с лучшими шлакующими свойствами из-за ее меньшего проплавления;
- уменьшается возгонка активных компонентов и образование загрязнений на базе активных щелочей.

К неблагоприятным последствиям снижения температурного уровня сжигания следует отнести:

- затягивание выгорания пирита и интенсификацию из-за этого образования прочных железистых отложений;
- более высокую химическую активность летучей золы к сульфатизации, что благоприятно с позиций связывания серы, но усугубляет проблему образования прочных сульфатно-кальциевых отложений.

В частности, по результатам исследований в промышленных условиях темп образования и прочность прочных первичных отложений при сжигании канско-ачинских углей ниже в высокотемпературных топках.

В настоящее время в мировой практике для снижения выбросов оксидов серы и азота новые котлы делаются в основном с пониженным температурным уровнем. Это достигается применением рециркуляции дымовых газов в зону горения, в том числе в виде газовой сушки, и увеличением площади, уменьшением тепловых напряжений зоны активного горения $q_{лг}$.

5.3. Температура и материал поверхности

Условия начала шлакования зависят не только от температуры газов, но и от температуры поверхности (см. рис. 3.5). Поверхность с более вы-

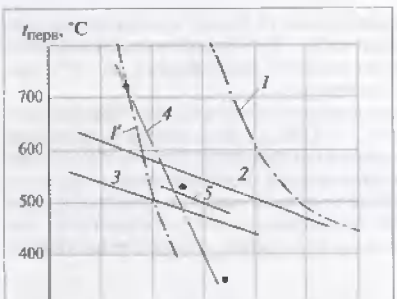


Рис. 5.10. **Зависимость критической температуры поверхности, определяющей начало образования прочных железистых отложений, от температуры:**

1 — азейский уголь, котел ПК-24; *1'* — то же, топка с низкотемпературным вихрем; *2, 3* — березовский и назаровский угли; *4* — приозерный уголь; *5* — тюменский торф

сокой температурой начинает шлаковаться при меньшей температуре газов. Поэтому в топке наиболее подвержены шлакованию неэкранированные поверхности (лазы, кладка у горелок) и утепленные, зажигательные участки. В силу химического сродства алюмо-силикатных огнеупорных материалов и летучей золы шлаковые отложения на утепленных и неохлаждаемых участках прочно закрепляются на поверхности, не саморазрушаются и с трудом удаляются при расшлаковке.

Утепленные зажигательные участки применяются для низкореакционных углей. Их использование во многом сводит на нет достоинства таких углей, которые не склонны к образованию прочных железистых отложений и имеют низкий шлакующий потенциал. В частности серьезные проблемы со шлакованием топок, вплоть до их реконструкции, наблюдались при сжигании кузнецких углей марок СС и Т и отсутствии при этом прочного первичного слоя. Уменьшение шлакования топок с утепленными участками достигается, в первую очередь, оптимизацией их расположения и размеров.

Температура поверхности металла труб определяется температурой рабочей среды, ее уровень значительно ниже, чем утепленных поверхностей и температурных условий начала шлакования. Тем не менее, в ряде случаев этот фактор заметно влияет на шлакование. Например, расположенный в верхней части топки настенный пароперегреватель котла ТП-109 находится в более зашлакованном состоянии, чем экраны соседних и расположенных ниже испарительных поверхностей.

В основном влияние температуры металла труб связывается с изменением возможности и темпа образования прочных первичных (железистых) отложений. Граничные условия образования таких отложений, подобно шлаковым, зависят от сочетания температуры газов и поверхности (рис. 5.10).

Приведенные на рис. 5.10 зависимости получены при исследованиях, выполненных в кратковременных опытах при помощи зондов. В количе-

ственном отношении они могут несколько отличаться от тех, что наблюдаются в длительной эксплуатации. Вместе с тем, можно сделать заключение, что при использовании достаточно холодных поверхностей нагрева образование железистых отложений можно, по-видимому, предотвратить.

Для проектируемых и реконструируемых котлов разработан ряд технических решений, направленных на уменьшение шлакования путем применения «холодных» поверхностей нагрева. В частности, в КПИ предложены компоновки пароперегревателя с размещением «холодных» поверхностей нагрева в зоне максимальных температур газов, что, однако, не оптимально с позиций теплообмена, в УралВТИ предложено использование таких поверхностей нагрева в качестве локальных защитных в местах максимального шлакования.

Образование первичного слоя и прочность его сцепления с трубами зависят от материала последних, и этот фактор может использоваться для локальной защиты особо опасных по шлакованию мест. Например, на ширмах котла П-57 образование железистых отложений в неоптимальных режимных условиях наблюдалось на трубах из стали перлитного класса. На аустенитных трубах, даже в зоне более высоких температур, их образование не происходило или было в значительно меньшей мере.

5.4. Ступенчатое сжигание и работа с недостатком воздуха

Во многих случаях причиной шлакования является работа котла с низким избытком воздуха, в том числе при ограничении тяги из-за высоких присосов воздуха или забивания регенеративных воздухоподогревателей. В свою очередь, работа с повышенными избытками воздуха, чаще всего в ущерб экономическим и экологическим показателям, является эффективным, а иногда и единственным доступным без реконструкции оборудования средством обеспечения бесшлаковочной работы котла.

Снижение избытков воздуха увеличивает шлакование в силу следующих факторов:

- рост температуры дымовых газов, если это заметно не уменьшает локальную степень выгорания топлива;
- возникновение условий или интенсификация образования прочных первичных отложений;
- приобретение летучей золой некоторых углей более шлакующих свойств.

При снижении избытков воздуха температура дымовых газов возрастает из-за уменьшения их объема. Например, в котле П-57 снижение избытка воздуха $\alpha_т''$ на $\Delta\alpha_{тп} = 0{,}05$ ($\approx 0{,}7$ % O_2) приводит к росту температуры $\vartheta_т''$ примерно на 10 °С, что эквивалентно изменению нагрузки блока на 17 МВт (3,4 %). Температура факела при этом возрастает примерно на 15 °С.

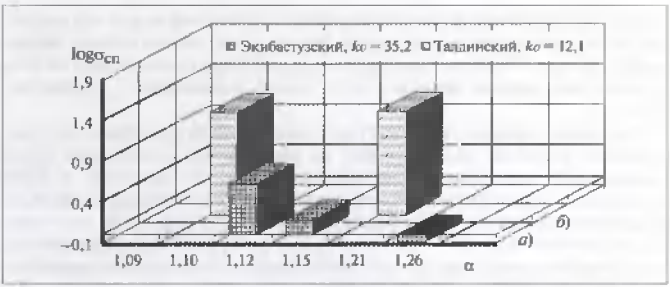


Рис. 5.11. **Прочность при спекании летучей золы (уноса), отобранной при сжигании углей с разными избытками воздуха:**

а — экибастузский уголь, $t_{сп}$ = 1180 °С; *б* — кузнецкий уголь, Талдинский разрез, $t_{сп}$ = 1150 °С

Следует однако иметь в виду, что в схемах со ступенчатым сжиганием топлива и подачей высокой доли рециркуляции в зону горения и в схемах с набросом факела на экраны эффект может быть противоположным, из-за изменения степени выгорания топлива и количества движения струй. С ростом количества воздуха в этих случаях возможно локальное повышение температуры и усиление шлакования из-за увеличения выгорания топлива.

Интенсификация образования железистых отложений при недостатке воздуха связывается с затягиванием выгорания пирита и преобразования (окисления) формирующих первичные отложения форм железа (FeS, FeO) в тугоплавкие оксиды (Fe_2O_3).

При нехватке или низких значениях избытка воздуха для ряда углей снижается температура начала шлакования, возрастает прочность отложений и спекаемость летучей золы. Зависимость шлакующих свойств летучей золы от избытка воздуха связывается с амфотерностью железа, изменением его валентности. Железо в двухвалентной форме Fe^{2+} является основанием, плавнем для золы кислого состава, который снижает плавкость золы и вязкость расплава. Окисление этого компонента до кислотной формы Fe^{3+} по мере увеличения избытка воздуха для углей с кислым составом золы повышает ее тугоплавкость, вязкость и температуру начала шлакования.

Для практики важно выделить следующие моменты:

- отмечена закономерность в том, что, чем менее шлакующий уголь, выше значение *ko*, тем сильнее влияние изменения избытка воздуха (рис. 5.11 и 5.12). Из исследовавшихся углей наиболее существенное влияние и, в частности, снижение $t_{шл}$ (более 50 °С) определено для экибастузского угля в диапазоне низких избытков воздуха $\alpha = 1{,}08 \div 1{,}2$ ($t_{шл}$ = 1200 °С при $\alpha > 1{,}15$ и $t_{шл}$ = 1120 °С при $\alpha \le 1{,}08$), что в совокупно-

сти с возникновением ситуации формирования железистых отложений при таком режиме сжигания лишает этот уголь статуса уникального нешлакующего угля. При более высоких значениях α влияние этого фактора проявляется, по-видимому, слабее. В отличие от этого, усиление шлакования при низких избытках воздуха при сжигании углей с высоким содержанием компонентов основного состава не связывается с заметным изменением свойств шлаковых отложений, в том числе температуры начала шлакования $t_{шл}$ [25];

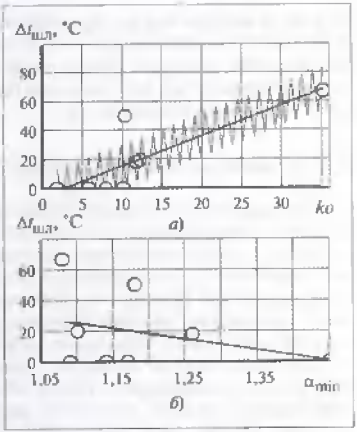


Рис. 5.12. **Изменение $t_{шл}$ при разных отношениях оксидов (кислых к основным) *ko* (*а*) и разном минимально достигнутом в опытах избытке воздуха α_{min} (*б*)**

• усиление шлакующих свойств летучей золы в зоне недостатка кислорода при организации ступенчатого сжигания практически не исчезает по ходу факела после прохождения летучей золы через зоны с повышенными избытками воздуха. Степень окисленности железа $O_{ст}$ и доля железа $Fe_{ст}$ в стекловидной фазе летучей золы, а также в двухвалентном состоянии Fe^{2+} в этой фазе при традиционном и ступенчатом сжигании показана на рис. 5.13.

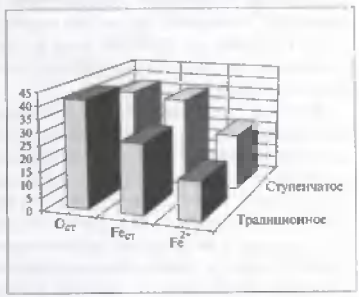


Рис. 5.13. **Окисленность железа в стекловидной фазе угля $O_{ст}$, доля железа в стекле $Fe_{ст}$ и доля двухвалентного железа в стекле при сжигании экибастузского угля в котле ПК-14 Верхне-Тагильской ГРЭС**

В заключение обратим особое внимание, что после работы с низкими избытками воздуха в случае образования прочных железистых отложений котел будет более подвержен шлакованию и после возвращения на режим с нормальными избытками воздуха. Как отмечалось, железистые отложения имеют коэффициент линейного расширения близкий к коэффициенту металла труб и прочно сцеплены с трубами в силу химического сродства. Такие отложения после образова-

ния могут сохраняться на экранах в течение длительного времени (годы) и усиливать шлакование при работе с оптимальными режимами. Подобная ситуация, например, имела место на котле П-57 после относительно длительной работы с низкими избытками воздуха ($\alpha < 1{,}08$) в целях снижения выбросов оксидов азота.

5.5. Тонкость помола топлива

При традиционном сжигании тонкость помола топлива неоднозначно влияет на шлакование через изменение распределения температуры газов по топке, условия загрязнения топочных экранов мелко дисперсионными непрочными загрязнениями и фактор образования прочных железистых отложений. Влияния тонкости помола в эксплуатационном диапазоне ее изменения при пылеугольном сжигании на шлакующие свойства летучей золы в части формирования и упрочнения шлаковых отложений экспериментально не выявлено. При сжигании дробленого азейского угля в низкотемпературных топках образование шлаковых отложений не наблюдалось во всем диапазоне, развиваемых в топке температур до $\vartheta = 1100$ °С [26]. При пылеугольном сжигании этого угля значение $t_{шл} = 995$ °С.

Утрубление помола, с одной стороны, затягивает воспламенение и выгорание топлива и смещает зону расположения максимальных температур вверх. С другой стороны, при этом уменьшается образование тонкодисперсных отложений (загрязнение) и увеличивается тепловосприятие экранов. Суммарный эффект на температуру газов на выходе из топки для разных котлов, по крайней мере в численном отношении, различается. Обычно для относительно крупных котлов температура $\vartheta_т''$ с утублением помола снижается.

Важным дополнительным фактором влияния тонкости помола на шлакование топки является изменение условий образования прочных железистых отложений. Как отмечалось (см. гл. 3) на конкретных поверхностях нагрева образуются отложения, интенсивность формирования которых выше. При утублении помола топлива интенсивность образования непрочных отложений из мелкодисперсной золы уменьшается, а прочных железистых увеличивается за счет затягивания процесса преобразования железосодержащих минералов. В результате появления прочных железистых отложений шлакование топочных экранов возрастает, и температура газов $\vartheta_т''$ может увеличиться до уровня, превышающего тот, который достигается при ухудшении теплообмена за счет интенсификации образования непрочных отложений из мелкой фракции золы.

Таким образом, в зависимости от места расположения шлакования в топке, характеристики угля и топочной камеры для уменьшения шлакования может использоваться как уменьшение тонкости помола топлива в одних случаях, так и утублением помола в других.

При шлаковании топки в зоне горения и холодной воронки помол топлива следует утублять в пределах допустимого по устойчивости процес-

са горения и экономичности, поскольку утонение пыли закономерно приводит к увеличению температуры газов в зоне горения. Этот фактор при прочих равных условиях оказался решающим в части возникновения или усиления шлакования поверхностей нагрева зоны активного горения, как это имело место на котлах БКЗ-160 Согринской ТЭЦ [27] и в опытах на котле ПК-39 при сжигании экибастузского угля.

Рис. 5.14. **Ротационный классификатор пыли**

При образовании прочных железистых отложений и усиления в силу этого шлакования топки и поверхностей, расположенных в выходном окне топки, может оказаться полезным уменьшение тонкости помола. В отличие от этого шлакование поверхностей нагрева на выходе из топки при сжигании углей не склонных к образованию прочных железистых отложений, а также при использовании углей со средней склонностью к образованию железистых отложений в топках с низкими тепловыми напряжениями сечения q_F может быть снижено при огрублении помола.

На отечественных котлах, за исключением периода наладки оборудования, оперативное воздействие на шлакование изменением тонкости помола топлива используется редко, что связано с трудностями регулирования положения створок существующих сепараторов. Внедрение топочных мероприятий по снижению оксидов азота обострило проблему обеспечения эффективного выгорания топлива. Для улучшения ситуации, в первую очередь для низкореакционных углей, в мире широкое распространение в последнее время получили ротационные классификаторы (рис. 5.14), регулирование тонкости помола которыми осуществляется со щита управления за счет изменения частоты вращения ротора. При этом оперативный персонал получил возможность существенного влияния на ситуацию по шлакованию, и это широко используется на практике.

5.6. Скорость газов, омывание поверхностей нагрева

Увеличение скорости газов, активное омывание поверхностей нагрева уменьшает образование отложений из мелкой, химически инертной золы. В противоположность этому при наличии в летучей золе в достаточном количестве матричных и липких частиц увеличение скорости интенсифицирует процесс шлакования и упрочнение отложений. В последнем случае интенсивное образование отложений наблюдается в первую оче-

редь в местах активного динамического взаимодействия факела и поверхности. К таким местам относятся нижние скаты аэродинамических выступов, лобовые трубы ширм, фестона и пакетов пароперегревателя, трубы вышедшие из ранжира, а также участки экранов на соседних с горелками стенах в местах касания факела и противоположной стенке при недостаточной глубине топки.

Шлакование может быть уменьшено путем оптимизации компоновки, конструкции и режима работы горелок (поворот горелок, изменение угла раскрытия факела и его дальнобойности и др.).

Создание застойных зон (плохо обтекаемые тела, аэродинамически неактивный след за близко расположенными к поверхности ширмами, кормовая часть труб) интенсифицирует образование отложений из мелкой золы. Для углей с высоким содержанием кальция, склонных к образованию сульфатно-кальциевых отложений, последующая сульфатизация и упрочнение рыхлых отложений ведет к образованию мощных завалов и ограничению нагрузки, если своевременно до достижения высокой прочности не проводится их профилактическая очистка.

5.7. Неравномерное распределение топлива и воздуха по горелкам

В § 5.1 рассматривалась возможность уменьшения шлакования путем организации неравномерного распределения топлива и воздуха по горелкам. В отличие от этого неконтролируемая неравномерность распределения топлива и воздуха является одной из основных причин недопустимого шлакования топочных камер, поскольку при этом создаются локальные зоны с недостатком кислорода и высокими температурами дымовых газов. Такой же эффект может иметь не оптимальное отключение части горелок при сохранении нагрузки котла, который усиливается в силу неблагоприятного изменения газодинамики топки. При одинаковом в качественном отношении влиянии неравномерности распределения топлива и воздуха, наиболее тяжелые последствия имеет неравномерность распределения топлива, при которой температурное поле изменяется в большей мере.

Рассмотрим источники и влияние неравномерности распределения топлива более подробно на примере котла ПК-39 при сжигании экибастузского угля, наименее шлакующего из используемых.

Корпус котла ПК-39 имеет двухярусное встречное расположение горелок и оборудован четырехскатным подом с горизонтальной навивкой труб, который близко расположен к горелкам (рис. 5.15). При сжигании более шлакующих углей топки с подобной конструктивной неоптимальностью (ПК-40) оказались неработоспособными по условиям шлакования и были реконструированы. При сжигании экибастузского угля в котлах рассматриваемого типа на разных станциях ситуация по шлакованию кардинально различалась: от эксплуатационно чистого состояния до регулярных вынужденных остановов на расшлаковку, что, главным обра-

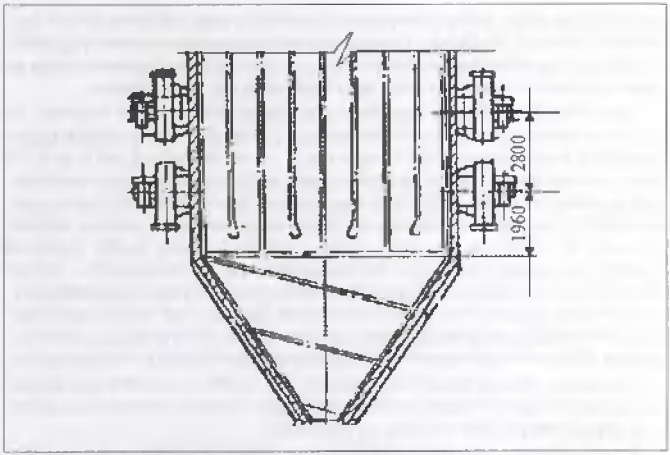


Рис. 5.15. **Схема нижней части и холодной воронки топки котла ПК-39-II**

зом, связывается с различным уровнем неравномерности распределения топлива.

На котлах ПК-39 Троицкой ГРЭС, оборудованных промбункерами пыли и пылепитателями, не наблюдалось шлакование топок за длительный период их эксплуатации, за исключением эпизодов поступления непроектного более шлакующего топлива.

Интенсивное шлакование наблюдалось на котлах Ермаковской (ныне ТЭС Аксу) и Рефтинской ГРЭС. При этом при максимальной температуре факела на уровне несколько выше второго яруса горелок и максимального темпа образования здесь отложений, аварийная ситуация вплоть до останова котлов возникает при закреплении шлака в местах примыкания холодной воронки к экранам, особенно, в углах топки. В проектном исполнении котлов Рефтинской ГРЭС со схемой прямого вдувания и четырьмя молотковыми мельницами, предусматривалось распределение пыли по трем пылепроводам, которые подключались к горелкам, расположенным на разных ярусах и на противоположных стенах топки. По условиям ремонтопригодности и обслуживания такая схема была заменена схемой подачи пыли от одной пылесистемы на все три горелки одного из ярусов с той или другой стороны топки. При такой схеме раздачи характер шлакования и места расположения очагов шлакования по периметру на разных однотипных котлах различались.

Основным источником неблагоприятной неравномерности распределения топлива является работа котла с тремя пылесистемами, две из которых работают на горелки нижнего яруса. Шлакование имеет место только

при таком режиме, в котором тепловыделение в нижней части топки возрастает с 50 до 66 % общего. Однако при сжигании нешлакующего экибастузского угля такая неравномерность для данной конструкции топки не является критической, и котлы могут работать без шлакования.

Следующий источник неравномерности распределения топлива по горелкам связан с неудовлетворительным распределением пыли в пыледелителях конфузорного типа ($\Delta g = (m_{max} - m_{min})/\Sigma m = 0{,}189$ и до 0,3 в отдельных опытах). При этом пылепровод, в который поступает наибольшее количество пыли, априорно неизвестен, что определяет разное расположение очагов шлакования по периметру топки на разных котлах. Третьим источником неравномерного распределения пыли является текущий отличающийся износ бил пылесистем и, соответственно, их разная производительность. Интенсивно шлакующийся котел характеризуется работой в указанном трехмельничном режиме, при этом пылесистемы, работающие на нижний ярус, имеют повышенную производительность и неудовлетворительное распределение аэросмеси в пыледелителе.

Очевидно, что для более шлакующих, чем экибастузский углей интенсивное шлакование может наблюдаться при наличии значительно меньшей неравномерности топлива по горелкам.

В приведенном примере неравномерность распределения топлива (тепловыделения) по периметру топки создается за счет неудовлетворительной работы пыледелителей. В других схемах неравномерность по периметру может создаваться за счет останова пылесистемы, подключенной к вертикальному блоку горелок. В тангенциальных топках при симметричном расположении горелок в углах топочной камеры отключение одной из пылесистем ведет к смещению факела в сторону неработающей горелки даже при 100 %-ном открытии шибера вторичного воздуха этой горелки [28].

5.8. Попеременное и в смеси сжигание углей

На ряде электростанций используются угли, которые поступают с разных месторождений и шлакующие свойства которых могут различаться. Естественно, что поступление более шлакующего угля может обострить или создать проблему шлакования.

Особое внимание обратим на то, что при возврате после сжигания более шлакующего угля на традиционное топливо, шлакование может не исчезнуть и даже усугубиться на длительный период. Так, при сжигании в топке угля с высокой склонностью к образованию железистых отложений и возникновении при этом прочных первичных отложений, можно ожидать шлакования и после возврата к традиционному углю, не дающему таких отложений. В качестве примера неудачной комбинации можно привести вариант попеременного и в смеси неопределенной пропорции сжигания кизеловского угля с высокой склонностью к формированию железистых отложений, но тугоплавкой золой и малошлакующего куз-

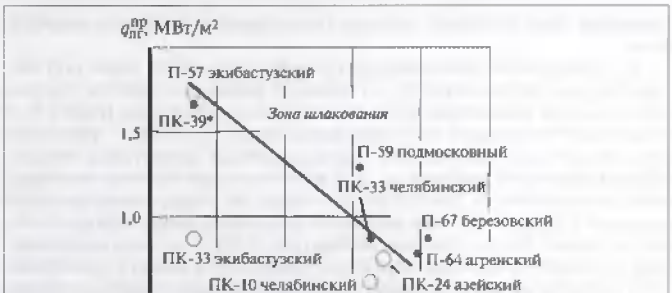


Рис. 5.16. **Связь шлакующих свойств углей R_{st}, теплового напряжения зоны активного горения $q_{пг}$ и ситуации по шлакованию топки на примере котлов ЗИО (точки — интенсивное шлакование; кружки — проблемы шлакования нет) (ПК-39* — трехмельничный режим, при котором две мельницы работают на горелки нижнего яруса)**

нецкого угля не образующего прочных первичных отложений с менее тугоплавкой золой в котле ТП-92 Яйвинской ГРЭС.

Смешение углей широко используется в мире, в том числе и для уменьшения шлакующих свойств опасных в этом отношении топлив. Вместе с тем, шлакующие свойства углей (температура начала шлакования, прочность отложений) имеют экстремальную зависимость от состава, и в неблагоприятном случае (при ошибочном составе смеси) шлакующие свойства смеси могут быть больше, чем исходных углей. В частности, могут ухудшаться некоторые показатели шлакующих свойств даже у наиболее шлакующих углей при добавлении к ним малошлакующего. В настоящее время накоплен экспериментальный материал по шлакующим свойствам угольных смесей [29] и решению о переходе на сжигание тех или иных смесей должна предшествовать, как минимум, расчетно-аналитическая проработка.

Конструктивные недостатки. Повышенное шлакование некоторых котлов имеет объективный характер из-за несоответствия их характеристик шлакующим свойствам используемого топлива. В первую очередь это касается выбора тепловых напряжений топочной камеры и температур газов по тракту котла. Для исключения недопустимого шлакования топки в нашей стране регламентируются допустимые тепловые напряжения зоны активного горения $q_{пг}$ и сечения топки $q_{т}$. Зависимость ситуации по шлакованию топки от сочетания теплового напряжения зоны горения и шлакующих свойств углей на примере котлов ЗИО показана на рис. 5.16. С увеличением шлакующих свойств топлива в топке должна поддерживаться менее высокая температура факела, что достигается уве-

личением зоны активного горения (уменьшением теплового напряжения).

В существующих рекомендациях по проектированию топок [21] значения $q_{лг}$ и q_F даны дискретно в табличной форме при делении углей на ограниченное количество групп по шлакующим свойствам (табл.5.2). В широко используемом в настоящее время методе УралВТИ — Уральской теплотехнической лаборатории — рекомендуемые (допустимые по условиям шлакования) значения $q_{лг}$, q_F и дополнительно значения теплового напряжения пояса от горелок нижнего яруса до начала скатов холодной воронки $q_{г\text{-}хв}$ даются в виде уравнения граничной линии между зонами шлакования и бесшлаковочной работы (рис. 5.16). В частности для ситуаций образования прочных первичных отложений в котлах с традиционным сжиганием и многоярусным встречном или угловом расположением горелок, воздушной сушкой топлива и при отсутствии рециркуляции газов в нижнюю часть топки уравнения приведенных значений допустимых по условиям шлакования тепловых напряжений $q^{пр}$, МВт/м^2, имеют вид:

$$q_F^{пр} \le 6{,}82 - 5{,}32P_{Fe}; \tag{5.1}$$

$$q_{лг}^{пр} \le 1{,}98 - 1{,}65R_{sl}; \tag{5.2}$$

$$q_{г\text{-}хв}^{пр} \le 3{,}0 - 1{,}8R_{sl}. \tag{5.3}$$

Для отличающихся конструкций и режимов работы топки рекомендуемые по условиям шлакования тепловые напряжения q_F, $q_{лг}$ определяются путем умножения значений $q^{пр}$ на поправочные коэффициенты. Рекомендуемые тепловые напряжения топки базируются на отечественном опыте проектирования и эксплуатации котлов, предназначены для конструкторов оборудования и, по сути, являются гарантийными. Безаварийная по условиям шлакования работа топки может быть обеспечена при иных сочетаниях тепловых напряжений, а также при оптимизации

Таблица 5.2. **Рекомендуемые методическими указаниями значения $q_{лг}$ [21]**

Топливо	Расположение горелок	
	однофронтальное	встречное и тангенциальное
Бурые шлакующие угли (канско-ачинские с газовой сушкой, подмосковный) и сланцы*	0,7	0,8 – 0,9
Каменные угли типа ГСШ**	0,8 – 0,95	0,95 – 1,05
То же, типа СС***	1,1	1,1 – 1,35

* Меньшие значения для березовского угля и сланца.
** Меньшие значения для сильно шлакующих каменных углей.
*** Большие значения для углей типа экибастузского.

элементов конструкции и режимов работы при более высоких значениях тепловых напряжений.

Шлакование реальной топки зависит от многих факторов и условие «тепловые напряжения ниже граничных» не является достаточным. В соответствии с изложенным, для анализа ситуации при переходе на альтернативное топливо предложен алгоритм с учетом фактической ситуации по шлакованию [30]. Например алгоритм для топочной камеры следующий.

Рассчитываются фактические $q^{\text{факт}}$ и допустимые $q^{\text{доп}}$ по условиям шлакования тепловые напряжения топочной камеры по сведениям об используемом (проектном) $q_{\text{п}}^{\text{доп}}$ и альтернативном $q_{\text{а}}^{\text{доп}}$ углях, где q — тепловые напряжения q_F, $q_{\text{лг}}$ и $q_{\text{г-хв}}$. Ранжируются сведения о существующей ситуации по шлакованию: $U = -1$ при отсутствии проблем шлакования. $U = 0$ при эпизодическом или локальном шлаковании, $U = 1$ при существовании проблемы шлакования. Если проблема шлакования проявляется в ограничении мощности, то задается это ограничение как $u_{\text{п}} = Q_{\text{ка}}^{\max\text{-шл}}/Q_{\text{ка}}$; в иных случаях $u_{\text{п}} = 1$.

Процедура анализа различается в зависимости от ранга проблемы. Для шлакующих котлов ($U = 1$) определяются относительные разности тепловых напряжений $dq = (q_{\text{а}}^{\text{доп}} - q_{\text{п}}^{\text{доп}})/q^{\text{факт}}$ и выбирается алгебраически минимальное значение относительной разности $dq^{\min}$ из значений dq_F, $dq_{\text{лг}}$, $dq_{\text{г-хв}}$. Ограничение нагрузки по условиям шлакования вычисляется как: $u_{\text{а}} = u_{\text{п}} + dq^{\min}$. При $u_{\text{а}} \le 0{,}6$ прогнозируется неприменимость альтернативного угля без реконструкции оборудования, при $u_{\text{а}} \ge 1$ констатируется снятие ограничений по условиям шлакования топки.

Для варианта топки без проблем шлакования ($U < 0$) дополнительно определяются соотношения фактических и допустимых для альтернативного угля тепловых напряжений:

$$dq^{\text{факт}} = (q_{\text{а}}^{\text{доп}} - q^{\text{факт}})/q^{\text{факт}}.$$

Очевидно, что при $dq \ge 0$ или $dq^{\text{факт}} \ge 0$ проблем шлакования топки не возникает. При $dq^{\text{факт}} = -0{,}15 \div 0$ делается заключение о возможности сжигания альтернативного угля без ограничения мощности с возможной необходимостью оптимизации режимов и средств очистки. При $dq^{\text{факт}} < (-0{,}15)$ ограничение бесшлаковочной мощности оценивается как $u_{\text{а}} = 1{,}15 + dq^{\text{факт}}$ и даются рекомендации о проведении работ по оптимизации режимов, средств очистки и конструкции. При $dq^{\text{факт}} < (-0{,}4)$ делается заключение о неприменимости альтернативного угля без реконструкции оборудования.

Краткая информация о допустимых по условиям шлакования температурах газов по тракту котла приводилась выше. Превышение на практике допустимых значений связано либо с неверной оптимистической оценкой шлакующих свойств топлива, или, чаще с превышением фактических температур газов расчетных значений. Последнее обусловлено

меньшим по сравнению с проектным тепловосприятием предыдущих по тракту котла поверхностей нагрева. До настоящего времени рекомендации по выбору коэффициентов тепловой эффективности экранов не достаточно детализированы и практически не учитывают различие характеристик топок, режимов их работы и шлакующих, загрязняющих свойств углей. Разработки Уральской теплотехнической лаборатории по уточнению и детализации значений тепловой эффективности экранов применительно к третьей редакции нормативного метода теплового расчета котлов [31] приведены в [32, 33]. Отметим однако, что эти рекомендации не прошли широкой апробации и возможно их уточнение.

Ряд возможных неоптимальных конструктивных решений по топочной камере и газоходам приводится в в гл. 1 и выше в параграфах этой главы. Кратко, с некоторыми дополнениями, их перечень приведен ниже:

- наличие неохлаждаемых участков, выполненных из алюмосиликатных материалов, в зоне высоких температур; неоптимальные размеры и применение зажигательных участков;
- выполнение выступающих в топочный объем разводок экранных труб, неудовлетворительная рихтовка экранов и пакетов при ремонтах;
- близкое расположение холодной воронки и их рассекателей к горелкам;
- неоптимальное сочетание характеристик горелок с расстояниями до боковых стен и глубиной топки;
- установка тангенциальных горелок с меньшими по сравнению с рекомендуемыми углами наклона к примыкающей стене;
- наличие поверхностей и узлов, с которых затруднено удаление шлака (четырехскатные холодные воронки, горизонтальные участки перевала, неоптимальные конструкции «корзинок» фестона и т. п.);
- размещение шлакуемых поверхностей за поверхностями нагрева с меньшим шагом (размещение ширм за фестоном), размещение шлакуемых поверхностей над более плотными пакетами;
- неоптимальные тесные шаги пакетов ширм и вертикального пароперегревателя;
- создание аэродинамически неактивных зон в зонах пониженных температур (близкое расположение ширм к конвективному пакету как на котле ПК-24, неоптимальная аэродинамика выходного участка топки и перевала и т. п.). Наибольшие неблагоприятные последствия такого неоптимального решения проявляются при сжигании углей с высоким содержанием в минеральной части сульфатизируемых элементов.

Вне газоходов конструктивные недостатки с позиций шлакования включают технические решения, способствующие неравномерному распределению воздуха и топлива по горелкам и в выходном сечении горелок (неоптимальные пыледелители, сложные тракты с поворотами, существенное влияние останова пылесистемы на аэродинамику и/или температурное поле и другие).

ГЛАВА ШЕСТАЯ

Мониторинг и контроль шлакования

Оперативный контроль ситуации по шлакованию и загрязнению позволяет оптимизировать работу котла и средств очистки, а также в ряде случаев обеспечивает исключение аварийных ситуаций по шлакованию. Однако, несмотря на большое количество примеров успешного внедрения различных решений, образование отложений традиционно относится к одному из эксплуатационных параметров, наиболее трудно поддающемуся количественной оценке. Кроме того, даже сильно шлакующиеся отечественные котлы, как правило, не оборудованы необходимыми средствами мониторинга, имеющиеся возможности штатного контроля используются недостаточно, к оператору информация поступает в неявном виде, в форме сведений об изменении параметров рабочей среды и газов.

В силу разнообразия шлакующих и загрязняющих свойств углей, особенностей поверхностей нагрева и характера их шлакования оправдано многообразие применяемых средств и методов контроля. Системы контроля могут представлять собой как простые устройства с использованием без дополнительной обработки одного сигнала, так и системы с измерением большого количества параметров, последующей обработкой результатов по программам и их хранением для использования при последующем анализе.

В системах контроля шлакования применяются разные показатели и принципы работы. Приведенный в этой главе материал не претендует на сколь-либо полный обзор известных средств контроля. В нем, преимущественно на примере внедренных и апробированных разработок Урал-ВТИ, демонстрируется разнообразие используемых подходов и возможность организации контроля для любых ситуаций и конструкций котлов (рис. 6.1).

Можно выделить три направления мониторинга:

- мониторинг условий, определяющих шлакование (состав газовой среды, температура факела);
- прямой или косвенный мониторинг шлакующих свойств;
- мониторинг ситуации по шлакованию (наличие, размеры, место расположения отложений, тепловая эффективность, газодинамическое сопротивление).

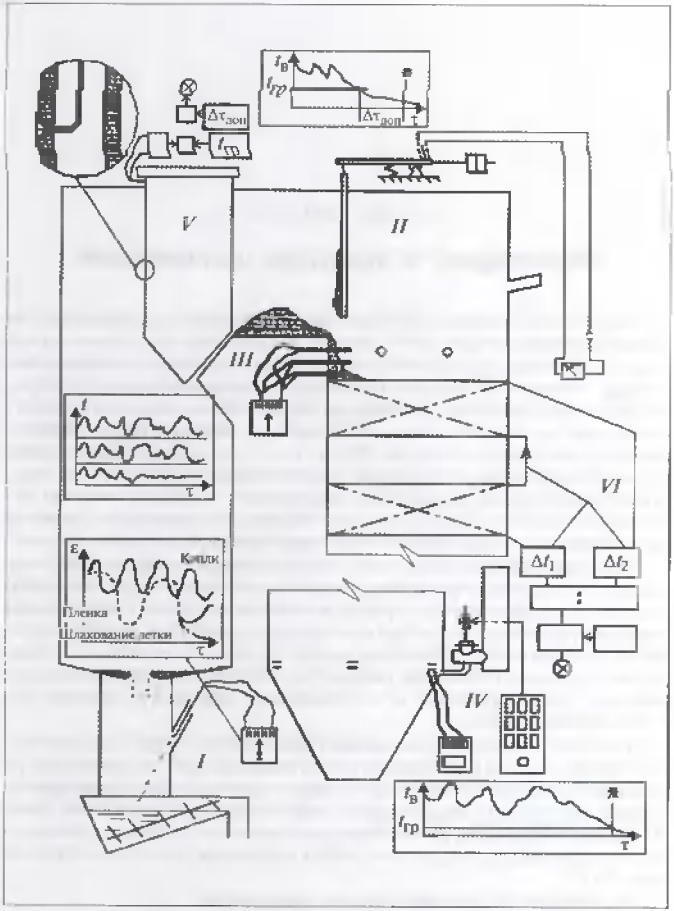


Рис. 6.1. **Примеры организации контроля шлакования и жидкого шлакоудаления:**

I — контроль ЖШУ фотодатчиками; *II* — механический индикатор шлакования; *III* — контроль по инерционности теплоприемников; *IV* — автоматизированная система расшлаковки с контролем по $t_ж$; *V* — контроль по совокупности $t_ж$ и времени пребывания в зашлакованном состоянии; *VI* — контроль по тепловосприятию

Мониторинг условий. Измерение температуры газов по газоходам котла используется как для контроля условий шлакования, так и для контроля ситуации. Традиционно на всех котлах используется измерение температуры дымовых газов, чаще в поворотном газоходе при помощи неохлаждаемых термопар. По опыту устанавливается некоторое допустимое значение, при превышении которого принимаются те или иные меры по снижению шлакования вплоть до разгрузки котла. Не оптимальность собственно такого мониторинга определяется измерением температуры в локальных точках и неоднозначной связью температур за пароперегревателем и на выходе из топки, где чаще и наблюдаются проблемы со шлакованием. Для улучшения мониторинга используется компьютерный расчет полей температур по показаниям нескольких датчиков.

Очевидно, что недостаток системы контроля шлакования только по измерению температуры связан с отсутствием учета изменения шлакующих свойств сжигаемого угля. В силу этого вносятся неоправданные ограничения в работу котла при сжигании менее шлакующего топлива, чем среднее, и при этом не исключается создание аварийных ситуаций при поступлении более шлакующего.

Мониторинг шлакующих свойств. ***Механические индикаторы шлакования.*** Внезапное, спорадическое шлакование горизонтального конвективного пароперегревателя ряда котлов обусловлено сжиганием углей с переменными шлакующими свойствами, в первую очередь температуры начала шлакования. Традиционный контроль по температуре газов в этих условиях неэффективен, либо вносит неоправданные ограничения в работу котла. Например, при поступлении разных партий кузнецкого угля пароперегреватель может оставаться чистым при показаниях штатной термопары в поворотном газоходе $t_3 = 870$ °С ($\vartheta = 1020$ °С) в одни периоды и шлаковаться при $t_3 = 830$ °С ($\vartheta = 980$ °С) в другие.

Для контроля условий, определяющих шлакование, и шлакующих свойств углей используются индикаторы шлакования, которые представляют собой подвижно закрепленные зонды различных конструкций, размещенные на части длины в газоходе (*И* на рис. 6.2). На щит котла передается преобразованный сигнал о перемещении зонда при шлаковании, которое происходит из-за изменения его массы. Зонды индикаторов установливаются таким образом, что их шлакование соответствует периодам шлакования контролируемой поверхности. Обдувка пароперегревателя проводится по выведенному на блочный щит сигналу индикаторов. Проведение обдувки по сигналу индикаторов позволяет не только исключить случаи аварийной зашлаковки, но и существенно уменьшить число включений аппаратов очистки. Так, на котлах ПК-40 до внедрения индикаторов обдувка проводилась ежесменно, а с индикаторами в среднем 10 раз в месяц. При этом при поступлении шлакующего угля она может выполняться по несколько раз в смену и не включаться неделями при сжигании менее шлакующего.

Косвенный контроль изменения шлакующих свойств. На зарубежных ТЭС внедряются методы косвенного контроля изменения шлакующих

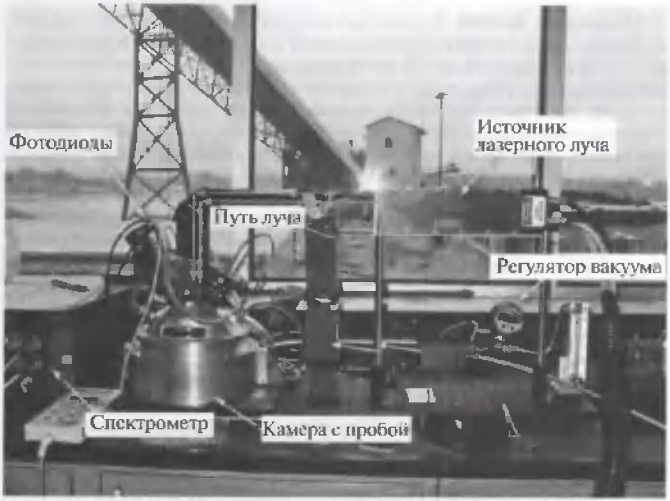


Рис. 6.2. **Установка по анализу шлакующей способности углей на основе технологии LIBS на ТЭС Brayton Point Power Station в США**

свойств. В таких методах в режиме текущего времени определяются отдельные элементы состава минеральной части поступающего угля, в частности, при помощи лазерного спектрометра (рис. 6.2). В анализаторе лазерный импульс очень высокой энергии (несколько мегаджоулей) испаряет уголь до состояния плазмы. В следующие миллисекунды плазма остывает, испуская излучение, соответствующее элементному составу. Детектор фиксирует излучение и компьютер рассчитывает концентрацию элементов в веществе [34]. Метод позволяет определять большое количество элементов и не требует специального разрешения на использование, так как в нем нет радиоактивных веществ.

По составу вычисляются индексы шлакования [35] или температуры плавкости и допустимые температуры для конкретных зон котла (обычно допустимая температура на выходе из топки) [34]. Информация отражается на экране. Если измеренная температура в верхней части топки превосходит допускаемую, рассчитанную по составу, рекомендуется выполнять ряд режимных мероприятий, результат которых отражается в режиме реального времени. Подобный контроль при попеременном сжигании углей известного стабильного состава или их смесей в разных пропорциях успешно применяется и без онлайнового контроля поступающего угля.

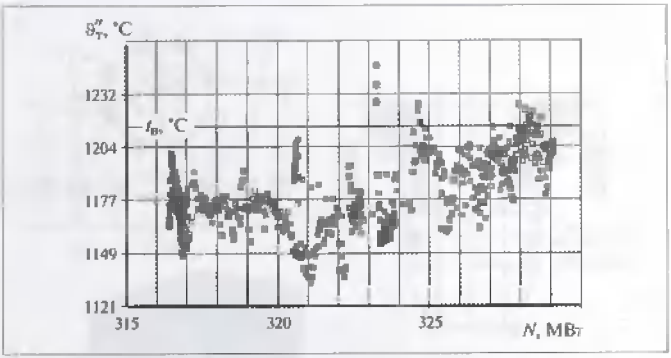


Рис. 6.3. **Контроль условий шлакования путем сравнения измеренной в газоходе котла температуры $\vartheta''_т$ с расчетной температурой $t_в$, характеризующей шлакующие свойства топлива. Зависимость показателей от нагрузки [34]**

Реализованы системы, в которых расчетная температура сравнивается с измеренной в контрольной точке (сечении). Пример показан на рис. 6.3.

Непосредственное измерение шлакующих свойств летучей золы в котле при помощи индикаторов шлакования представляется более достоверным и дешевым методом. Естественно, что в зависимости от ставящихся задач конструкция и принцип действия индикаторов должны модифицироваться.

Мониторинг ситуации по шлакованию. ***Оптические, радиационные методы.*** Оптико-телевизионный контроль шлакования топочных экранов не получил широкого распространения на отечественных ТЭС. Это связано как с его относительно высокой стоимостью и сложностью, так и с неэффективностью при сжигании достаточно зольных углей, обусловливающих высокую оптическую плотность факела.

За рубежом такие системы используются и совершенствуются. В частности, мониторинг выполняется при помощи оптических устройств с использованием камер с частотой 3,9 мкм (Internal Cameras). Специальные камеры с инфракрасным спектром оборудованы фильтрами, которые позволяют производить мониторинг отложений на поверхностях нагрева через пламя. Камеры устанавливаются в лючках проблемных зон, либо в местах и количестве, позволяющем адекватно отражать все важные зоны котла [36].

Для контроля равномерности температурного поля в сечении топки, т. е. условия, определяющего шлакование, применяются стационарно установленные по периметру газохода пирометры. В частности, такой метод применен на котле с кольцевой топкой БКЗ-820. Внедренный пирометрический измерительный комплекс (ПИК-3) решает задачу стационарного контроля пирометрической температуры, определения про-

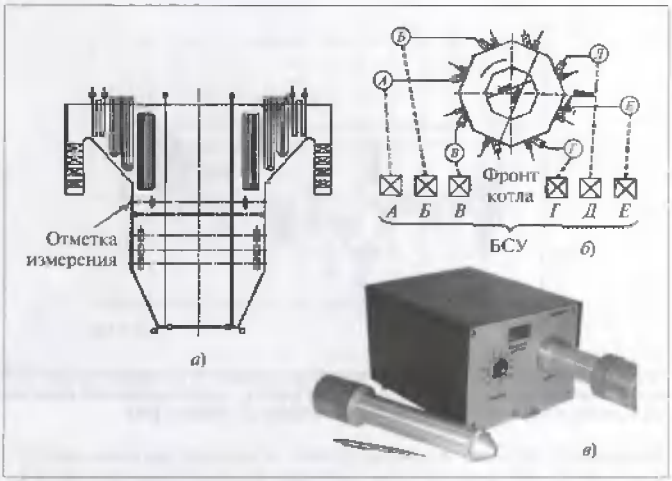


Рис. 6.4. **Схема контроля температурного поля в топке котла БКЗ-820 (*а*), схема размещения датчиков (*б*), пирометрический датчик (*в*)**

странственного положения и перекоса температурного поля в топке, а также длительного хранения и статистической обработки информации [37]. Комплекс содержит 16 пирометрических датчиков, установленных на экранах по периметру топки (рис. 6.4). В качестве фотоприемного устройства используется фотодиод. Конструкция корпуса пирометра обеспечивает защиту электронного устройства от поступления пыли и тепла без использования системы обдува сжатым воздухом и защитного стекла перед фотоприемником.

Оперативная информация поступает в реальном времени на экран монитора комплекса, отображая состояние контролируемых параметров котельного агрегата и комплекса в целом. Различные варианты визуализации дают возможность всесторонне оценить распределение температур по периметру топки.

Применение простых зондов с фотоприемниками оказалось весьма эффективным для контроля выхода жидкого шлака. Разработанный в УралВТИ метод характеризуется тем, что измерения проводятся не в направлении вытекающего шлака, летки, а в противо-положном, в направлении зеркала воды в грануляторе — транспортере (см. *1* на рис. 6.1). Такое решение позволило не только добиться высокой разрешающей способности метода, но и повысить надежность работы фотоприемников.

Датчики выполнены в виде небольших зондов с вмонтированными фотодиодами инфракрасного диапазона. Система позволяет дистанци-

онно и безинерционно контролировать появление «плавающего» шлака, характер вытекания расплава, степень зашлаковки летки. Полезную информацию содержит как значение светового потока, так и частота ее изменения. Так, расплав удаляется в виде капель, если уровень потока высокий, а период изменения небольшой. Уменьшение светового потока и увеличение периода его изменения соответствует переходу в режим пленочного шлакоудаления. Очень высокий уровень светового потока характерен для периода появления «плавающего» шлака, а низкий — для перекрытия летки застывшим шлаком.

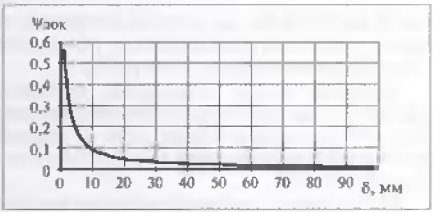


Рис. 6.5. **Характер изменения коэффициента тепловой эффективности от толщины шлаковых отложений**

Локальные тепловые потоки, температура металла труб. Для характеристики загрязнения поверхностей нагрева в локальных зонах может использоваться локальный коэффициент тепловой эффективности $\psi^{лок}$, определяемый как отношение воспринятого и падающего тепловых потоков $\psi^{лок} = q^{восп}/q^{пад}$. Есть примеры успешной реализации такого контроля, хотя необходимо отметить трудности его осуществления «в чистом виде» из-за сложностей длительного непрерывного измерения падающих тепловых потоков. Дополнительно отметим низкую информативность показателя $\psi^{лок}$ для контроля развитых шлаковых отложений. Такое положение связано с тем, что в силу высокого термического сопротивления отложений тепловая эффективность поверхности нагрева $\psi^{лок}$ резко изменяется при небольших по толщине отложениях, при эксплуатационно чистом состоянии поверхности ($\delta < 10$ мм). Дальнейший рост отложений слабо влияет на коэффициент $\psi^{лок}$, и при $\delta > 40 \div 50$ мм он остается практически неизменным (рис. 6.5).

Для организации надежной и информативной системы контроля шлакования на конкретном объекте могут использоваться приближенные, упрощенные показатели, необходимые для определения коэффициента $\psi^{лок}$, или часть из них. В частности, во внедренных на ряде котлов системах Киевского политехнического института для оценки падающего теплового потока использованы пирометры. Возможность использования пирометров для длительного мониторинга рассмотрена выше. В разработке СибВТИ применительно к контролю шлакования топочных экранов котла П-67 падающие тепловые потоки определяются дискретно по показаниям очищенных «базовых» вставок, расположенных в зоне эффективной очистки существующими аппаратами. По сути разработка СибВТИ представляет вариант более простых и, следовательно, более надежных систем, в которых могут использоваться данные только о воспри-

нятом тепловом потоке, которые определяются, преимущественно, при помощи температурных вставок в трубах экранной системы, или только о наружной температуре металла труб $t_м$.

Измерение только воспринятого теплового потока $q^{восп}$ характерно для систем, где для контроля шлакования используются сравнительные результаты по двум датчикам, один из которых принимается в качестве эталонного и располагается в зоне отсутствия шлакования или поддерживается чистым.

Для зон топки, в которых изменение воспринятого теплового потока в результате шлакования существенно больше изменений за счет варьирования в достаточно широком диапазоне режимных факторов может применяться контроль с использованием одного показателя в виде температуры наружной поверхности металла труб поверхностей нагрева $t_м$.

Такая система по разработке УралВТИ была успешно внедрена на ряде котлов типа ПК-39 в период существования проблем с их шлакованием. Изучение шлакования этих котлов (см. гл. 3 и 5) показало, что аварийная ситуация происходит при закреплении шлаковых отложений в нижней части топки. По результатам наладки оптимальной была признана схема расположения по периметру топки пар датчиков (один над другим) в месте примыкания экранов к холодной воронке. Уменьшение температуры $t_м$ одного из датчиков (температурной вставки) ниже критического $t_{кр}$, экспериментально определенного значения используется для автоматизированного включения средств очистки (см. *IV* на рис. 6.1). По более «мягкому» алгоритму средства очистки включаются при разрастании очага шлакования до уровня верхней вставки, что фиксируется по сближению показаний пары вставок.

При достаточном количестве температурных вставок, как в чешской разработке [38], на табло можно представлять наглядную картину распределения шлакования по экранам. Например, лампочки на схеме экранов имеют красный цвет при $t_м < t_{кр}$ и зеленый при обратном соотношении.

Измерение температуры металла с использованием температурных вставок применяется и для контроля шлакования ширм. При исследованиях шлакования на котлах П-57 установлено, что образование золошлаковых отложений на конвективных поверхностях нагрева обусловлено формированием больших и прочных шлаковых отложений на ширмах. По показаниям вставок и фиксации ситуации по шлакованию выявлено, что режим с циклическим изменением температуры, характерном для процесса «шлакование — самораспшаковка», не ведет к образованию отложений на конвективных поверхностях. Его фиксация может рассматриваться как опережающая информация о приближении к граничным условиям. Опасным по шлакованию является режим, в котором температура стабилизируется на низком уровне из-за редкой и неполной самораспшаковки отложений. С учетом сказанного разработана система контроля (см. *V* на рис. 6.1), в которой, помимо регистрации $t_м$, измеряется интервал времени τ, в течение которого $t_м$ сохраняет значения ниже критического (датчик в зашлакованном состоянии). Если τ больше задан-

ной, экспериментально обоснованного значения, вырабатывается дополнительный сигнал.

Тепловосприятие поверхностей нагрева. Опытные операторы могут судить об условиях шлакования и загрязнения поверхностей нагрева, на основании вторичных эксплуатационных показателей работы котла, таких как изменение температур по газовому и пароводяному тракту котла. Более успешно эта задача может решаться применением компьютерных систем обработки информации, в которых тепловой расчет котла и отдельных поверхностей выполняется с использованием текущих эксплуатационных показателей и при необходимости доступных дополнительных измерений.

В мире разработано много компьютерных систем, где котел используется как «измерительный инструмент» для оценки шлакования. В частности, в разработке компании Бабкок и Вилькокс [39] для анализа теплообмена в топке и последовательно пакет за пакетом в конвективных поверхностях используются измерения температуры, давления, потока и газовый анализ. Нормированное значение загрязнения каждой поверхности на мониторе представляется как сравнение результатов анализа четырех последних временных интервалов (рис. 6.6; значения в правой колонке для каждой поверхности самые новые). Благодаря представлению результатов таким образом, можно иметь информацию не только о ситуации на текущий момент, но и о тенденции и степени изменения показателей.

Достаточно точное определение тепловой эффективности контролируемой поверхности нагрева как показателя ее загрязнения, требует измерения и обработки большого количества параметров работы котла, рабочей среды и дымовых газов. Поскольку измерения проводятся в области шлакования, то применяется сложная аппаратура. Например, в разработке США для измерения среднего уровня температур газов и ее неравномерности используются радиационные пирометры, с введением поправок на зольность и состав газов, и датчики падающих тепловых потоков.

В то же время для широкого круга задач контроля загрязнения и шлакования достаточно совокупности соответствующим образом обработанных сведений о значении температур рабочей среды по отдельным участкам пароводяного тракта. В отдельных случаях, например, применительно к контролю загрязнения экранов барабанных котлов по схеме Сибэнергомаш — УралВТИ, они могут дополняться измерениями температур газового тракта в зонах ниже начала шлакования.

Контроль загрязнения конвективных и полурадиационных поверхностей нагрева может базироваться на соотношении тепловосприятий «эталонной» и контролируемой секций. В качестве «эталонной», как это предложено УралВТИ, выбирается наименее подверженная загрязнению секция, определяемая эмпирическим путем. Простой пример такой схемы показан на рис. 6.1 (*VI*).

Газодинамическое сопротивление. Контроль загрязнения по изменениям сопротивления газового тракта эффективен для поверхностей нагрева, имеющих значительное исходное сопротивление, например, для регенеративных воздухоподогревателей. Для поверхностей пароперегревателя с низким исходным сопротивлением начало фиксации отложений наблюдается, когда процесс шлакования зашел достаточно далеко и перекрыто не менее 20% сечения газохода. Разрешающая способность метода может быть повышена более чем вдвое за счет применения относительных показателей и оптимизации выбора мест измерения (учета закономерного перераспределения статического давления по поперечному сечению газохода при шлаковании).

Контроль с использованием оригинальных показателей. В конкретных условиях для контроля шлакования могут применяться показатели, не связанные очевидным образом с температурным состоянием отложений, сопротивлением газового тракта. Приведем некоторые из примеров, классифицированные здесь как использование оригинальных (или нетрадиционных) показателей.

Для контроля размеров золошлаковых образований в зоне температур ниже шлакования $S_{ф.ш}$ в недоступных для наблюдения местах или в условиях оптически плотного факела в УралВТИ разработан и внедрен способ, основанный на изменении инерционности термоприемников. Анализируются изменения показаний нескольких термоприемников при обычных колебаниях в параметрах работы котла. Граница отложений определяется по положению термопары (см. *III* на рис. 6.1), показания которой более инерционны.

В немецкой разработке [40] для контроля используется собственная частота колебаний системы, которая существенно отличается для чистой и загрязненной системы. Для этого системе, содержащей поверхности нагрева, периодически наносятся колебательные возмущения низкой частоты, и определяется собственная частота колебаний. При заметном отклонении собственной частоты системы от частоты, отвечающей ее чистому состоянию, включаются средства очистки. В США разработан метод, по которому масса отложений на поверхности нагрева определяется в зависимости от темпа изменения температур датчика, приваренного к плавнику экрана и периодически подогреваемого электрическим нагревателем.

Оптимизация работы средств очистки. Совершенствование очистки поверхностей нагрева помимо конструкции обдувочных аппаратов, в первую очередь касается системы управления их работой. В начале главы продекларировано, что контроль шлакования позволяет оптимизировать работу средств очистки. Прежде всего, это касается согласования периодов включения аппаратов очистки и регламента их работы с результатами мониторинга ситуации по шлакованию или шлакующих свойств топлива.

В приведенных примерах организации контроля шлакования (индикатор шлакования на котлах ПК-40, система контроля шлакования экранов котла ПК-39) очистка конкретной поверхности нагрева активизиру-

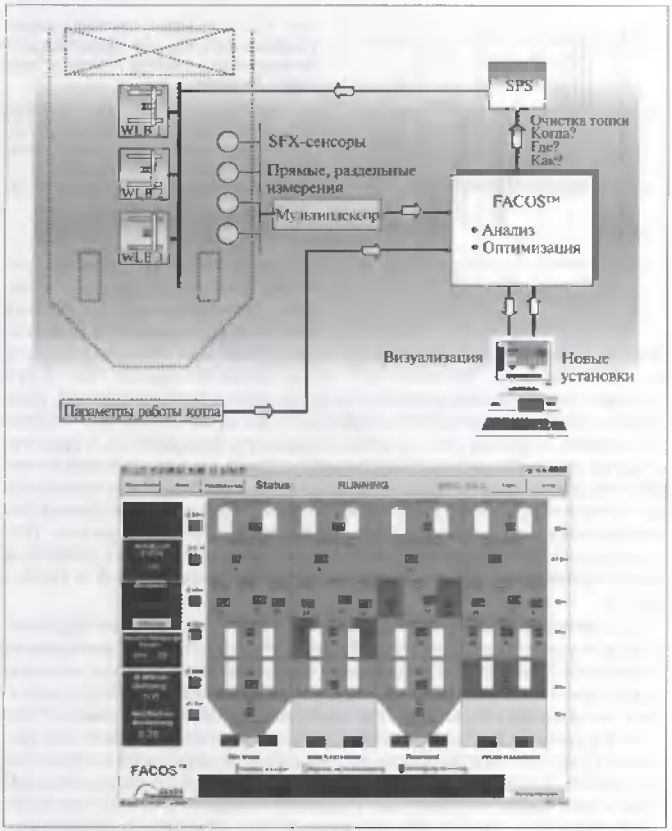


Рис. 6.6. **Принцип работы системы FACOS и отражение результатов мониторинга шлакования и очистки на экране**

ется при достижении показателем, используемым для анализа шлакования, критического (допустимого) значения. В настоящее время в нашей стране компания Клайд Бергеманн успешно внедряет систему FACOS (см. рис. 6.6).

Для оптимизации работы средств очистки могут применяться более сложные алгоритмы принятия решения по показателям системы контро-

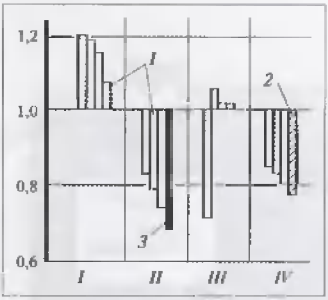


Рис. 6.7. **Сведения о степени чистоты (загрязнения), как они представляются оператору в системе контроля Бабкок – Вилькокс:**

I — топочные экраны; *II* — ширмы; *III* — вторичный пароперегреватель; *IV* — первичный пароперегреватель; *1* — небольшое загрязнение; *2* — среднее загрязнение; *3* — сильное загрязнение

ля шлакования. В частности, используются алгоритмы, по которым параметры работы средств очистки (интенсивность очистки) зависят от уровня показателя системы контроля. Для примера в системе контроля Бабкок – Вилькокс нормализованные показатели (рис. 6.7) в зависимости от значения разделены на группы по степени чистоты. Если степень чистоты всех поверхностей отнесена к эксплуатационно чистому состоянию, то режим работы котла сохраняется неизменным, а средства очистки при необходимости включаются только для оптимизации других рабочих параметров, например, температуры перегрева. Если показатели указывают на среднюю (умеренную) степень загрязнения, то обдувают те поверхности, где эти показатели относительно неблагоприятные. При показателях, указывающих на сильное загрязнение, проводят усиленную концентрированную обдувку соответствующих поверхностей и котла в целом.

Для оптимизации включения средств очистки также может использоваться не уровень значений контролируемых показателей, а динамика их изменения. В британской разработке [41] оптимизация очистки исходила из предпосылки, что существует оптимальный момент включения очистки и эта ситуация соответствует моменту изменения темпа снижения теплового потока по мере шлакования. Авторы разработки считают, что этот момент соответствует переходу отложений на поверхности в спекшееся состояние. Для выявления этого момента используется математическая обработка данных об изменении теплового потока во времени при помощи компьютера, причем для каждого датчика абсолютные значения не совпадают (рис. 6.8).

Включение аппаратов очистки по этому алгоритму (два включения в сутки) позволило примерно втрое (2 и 6 циклов соответственно) снизить число циклов обдувки по сравнению с использованием сведений об уменьшении теплового потока до некоторого допустимого значения. При этом, несмотря на уменьшение циклов обдувки, тепловосприятие экранов за фиксированный период времени увеличилось.

Развитием методов контроля является разработка и внедрение так называемых методов «интеллектуальной» очистки. Эффективность очист-

Рис. 6.8. **Изменение теплового потока при проведении обдувки по достижении заданного критического значения потока и по алгоритму «оптимального момента обдувки». Эффект оптимизированного алгоритма за одинаковый период (сутки):**

1 — оптимизированная обдувка; *2* — неоптимизированная обдувка

ки повышается при внедрении систем, в которых очистка выполняется по программам искусственного интеллекта. Особенно эффективны такие системы при серьезных проблемах с образованием отложений и при использовании углей переменного качества. Такие системы работают по прямому и косвенному принципам. В системах по прямому принципу компьютерными программами воспроизводятся действия опытного оператора. В косвенных системах используется математическое моделирование, математика нечеткой логики и нейронных сетей, теоретические представления, экспертные системы. Такие системы на основе опыта «обучаются», вырабатывают алгоритм, как максимально уменьшить рост отложений [42].

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

Очистка поверхностей нагрева

Повышение эффективности средств очистки поверхностей нагрева включает в себя совершенствование системы управления их работой, что рассмотрено в гл. 6, и конструкции аппаратов.

Для сильно шлакующих углей нет и, очевидно, нецелесообразно создание мощных котлов успешно эксплуатируемых без средств очистки. Для новых котлов, предназначенных для использования углей с умеренными шлакующими свойствами, выбор активных (температуры, тепловые напряжения по газовому тракту, его размеры; технологии сжигания; конструкции узлов и элементов) или пассивных (средства очистки) методов решения проблем шлакования определяется экономическими факторами, традициями и прогрессом в создании оптимальных конструкций котлов и средств очистки.

Для действующих котлов применение средств очистки определяется сложившейся ситуацией по шлакованию. В отечественной энергетике сжигается большое количество углей с низкими или не высокими шлакующими свойствами и оправдано ограниченное использование средств очистки.

Перечень используемых средств и область их применения приведены в табл. 7.1. По основным из них, не касаясь многочисленных конструктивных различий, ниже дана дополнительная информация и приведены иллюстрации.

Наиболее часто используется очистка путем разрушения отложений кинетической энергией струй, в качестве рабочего тела используется пар различных параметров. К числу недостатков этого метода относится низкая плотность пара, что вызывает необходимость создания высоких (в том числе сверхзвуковых) скоростей течения и повышенный износ очищаемых поверхностей эжектируемыми частичками летучей золы. Струйная энергия также весьма быстро затухает по глубине плотных пакетов. Сказанное определяет применение этого метода преимущественно для локальной очистки экранов маловыдвижными аппаратами и полурадиационных и конвективных поверхностей пароперегревателей с использованием глубоковыдвижных аппаратов, которые вводятся в газоход на период проведения очистки.

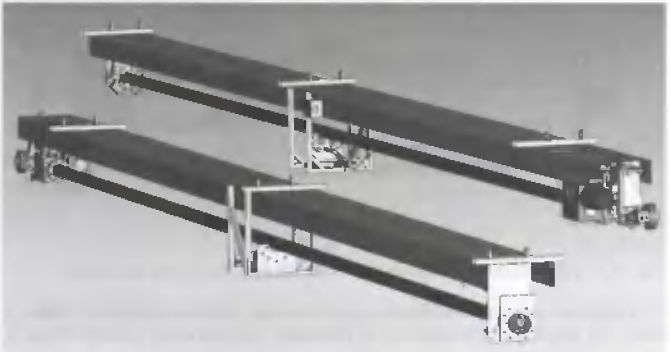


Рис. 7.1. **Аппарат глубоковыдвижной паровой обдувки Красноярского машиностроительного завода с выдвижением сопловой головки до 12 м серии 221ЭОБ120.00.00.000**

Глубоковыдвижные аппараты характеризуются двухсопловой головкой, винтовым полнооборотным или секторным движением обдувочной трубы с вводом/выводом ее из газохода. На отечественном рынке глубоковыдвижные аппараты представлены аппаратами Красноярского машиностроительного завода (рис. 7.1) и компании Клайд Бергеманн (рис. 7.2).

За рубежом также используются [43] винтовые невыдвижные, ротационные невыдвижные и траверсные паровые обдувочные аппараты. В винтовом аппарате труба имеет сопла, расположенные в шахматном порядке.

Таблица 7.1. Средства очистки поверхностей нагрева котлов

Тип аппаратов или устройств	Область применения
Паровая или воздушная обдувка	Все поверхности нагрева
Водяная обдувка	Топочные экраны
Газо- и пневмоимпульсная очистка	Полурадиационные и конвективные поверхности нагрева (под давлением), РВП
Стационарная, пушечная обдувка	Полурадиационные и конвективные поверхности нагрева (под давлением)
Дробевая очистка	Поверхности нагрева конвективной шахты и ТВП
Вибрационная очистка	Полурадиационные и конвективные ширмы
Звуковая очистка	Поверхности нагрева конвективной шахты и РВП

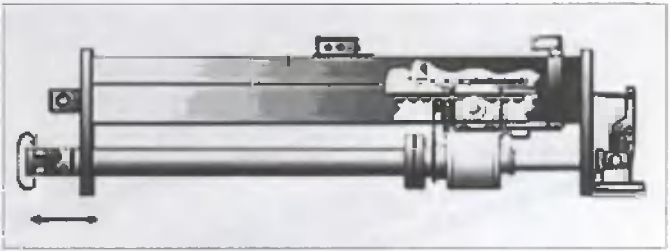


Рис. 7.2. **Глубоко выдвижной аппарат паровой очистки Клайд Бергеманн**

Ход обдувочной трубы выбирается равным расстоянию между соплами, и часть ее постоянно находится в газоходе. Допустимая температура до 900 °С. Ротационные невыдвижные аппараты применяются для очистки поверхностей нагрева с малым загрязнением в зоне температур ниже 800 °С. Обдувочная труба постоянно расположена в газоходе и имеет только вращательное движение; каждому промежутку между трубами соответствует одно сопло на трубе. Траверсный аппарат выполняется на основе глубоковыдвижного аппарата, но без вращательного движения. Траверса — в форме грабель с большим количеством сопел — применяется для очистки пакетов и ребристых труб. Используется при низких температурах и небольших загрязнениях. Грабельный многосопловой аппарат обдувки для очистки трубчатых водоподогревателей сегодня выпускается и Красноярским машиностроительным заводом по разработке «ОКБ Зенит» [44].

Условия эффективного применения паровой обдувки, заимствованные из презентации СибВТИ, следующие:

- выдерживание температуры газов на входе в обдуваемую поверхность нагрева не выше допустимой по условиям шлакования и загрязнения;
- применение для обдуваемых поверхностей нагрева сравнительно свободных пучков труб, в особенности для пароперегревателей; ширина поперечного зазора между трубами пароперегревателей должна выбираться не менее 50 мм, и для поверхностей в зоне температур газов более 800 °С — не менее 100 мм;
- применение аппаратов со сравнительно малыми шагами перемещения сопловой головки (для глубоковыдвижных и винтовых невыдвижных аппаратов); для современных аппаратов рекомендуется шаг перемещения за один оборот — 50 – 60 мм со смещением траектории струи на полшага в точке реверса обдувочной трубы;
- оптимальный выбор компоновки и числа аппаратов, в том числе:
  - по оценкам эффективного радиуса действия с максимально полным охватом всей поверхности нагрева очищаемого трубного пучка;

° по схеме расположения и включения аппаратов — для последовательной обдувки поверхностей нагрева по ходу газов. Для наиболее интенсивно загрязняемых поверхностей целесообразна установка аппаратов перед и за поверхностью;

° установка аппаратов на расстоянии от обдуваемой поверхности, превышающем длину начального участка паровой струи (с учетом прогиба и биения сопловой головки) и обычно не менее 400 мм;

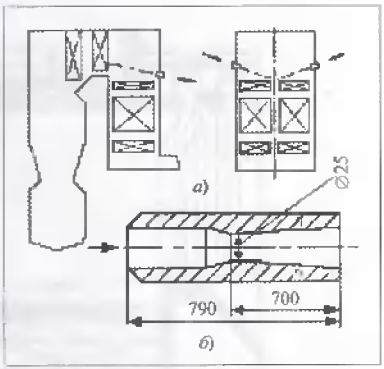


Рис. 7.3. **Схема пушечной обдувки:**

а — схема котла и компоновки сопел; *б* — обдувочное сопло

• выбор оптимальных параметров: диаметра сопл и давления пара перед соплами за встроенным клапаном аппарата: по оценкам эффективного радиуса действия, по расходу пара, по условиям коррозионного и эрозионного износа. В большинстве случаев давление пара выбирают не выше 1,6 МПа; для малозольных топлив с невысокой абразивностью золы — до 2 – 2,5 МПа;

• выбор температуры пара из условия отсутствия влаги в паровой струе в выходном срезе сопла. Обычно обдувку проводят перегретым паром с температурой не ниже 330 °С;

• тщательное и полное дренирование и прогрев трубопроводов подвода пара к аппаратам перед проведением и во время обдувки; контроль температуры и давления в трубопроводах; выдерживание выбранного давления пара в аппаратах для всех нагрузок котла, при которых производится обдувка; установка при необходимости специальных регуляторов давления;

• регулярное применение обдувки с заданной по режимной карте периодичностью.

Для разрушения локальных очагов шлакования также применяются аппараты пушечной обдувки (рис. 7.3), мощные струи из которых сохраняют кинетическую энергию на большом расстоянии.

С позиций повышения кинетической энергии предпочтительным является использование в качестве рабочего тела сжатого воздуха, обладающего, по сравнению с паром, большей плотностью. Внедрению воздушной очистки препятствует необходимость применения дополнительного воздухонапорного оборудования. В определенной мере этот недостаток преодолен в пневмоимпульсной системе очистки УралВТИ [45], в которой необходимая энергия накапливается в ресиверах, подключенных к

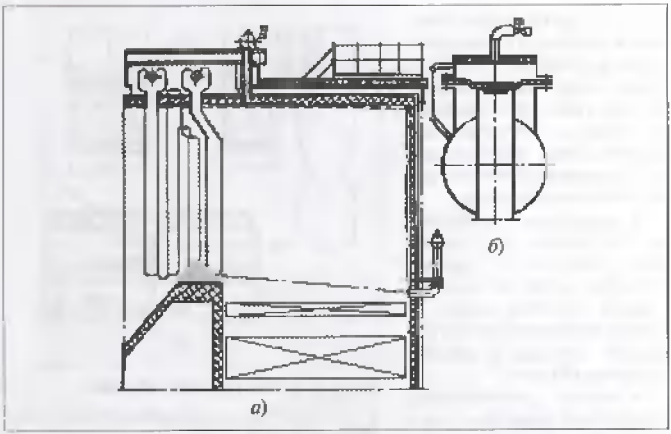


Рис. 7.4. **Пневмоимпульсная установка для очистки поверхностей нагрева котла:** *а* — схема компоновки ПИУ на котле ПК-40; *б* — конструкция быстродействующего клапана мембранного типа

стандартной разводке сжатого воздуха в котельных цехах, и залпово вводится в газоход при срабатывании простого быстродействующего клапана, который может быть изготовлен в условиях ТЭС из транспортерной ленты (рис. 7.4).

В этой пневмоимпульсной установке (ПИУ) основное разрушение отложений происходит за счет кинетической энергии струи и в значительно меньшей мере за счет генерируемой волновой энергии. Волновая энергия ПИУ, сопоставимая с энергией газоимпульсных установок, достигается при давлении воздуха 10 – 12 атм. Очевидно, что при этом требуется установка специальных воздуходувок и линий разводки. В современных пневмоимпульсных системах, разрабатываемых Институтом теоретической и прикладной механики (ИПТМ) СОРАН [47, 48] используется давление воздуха от 10 до 40 ати при этом генерируются ударные волны, эффективно разрушающие отложения. При конструктивных отличиях быстродействующих клапанов, принцип их срабатывания за счет создания перепада давления на рабочем органе после открытия управляющего клапана тот же, что и в используемой на различных котлах разработке Урал-ВТИ. По опыту внедрения газоимульсных установок энергия ударных волн должна ограничиваться уровнем, обеспечивающим сохранность обмуровки. Общий вид пневмоимпульсных генераторов ИПТМ СОРАН, показан на рис. 7.5.

Струйными паровыми аппаратами очистки разрушаются шлаковые и менее прочные отложения. Для разрушения прочных первичных отложе-

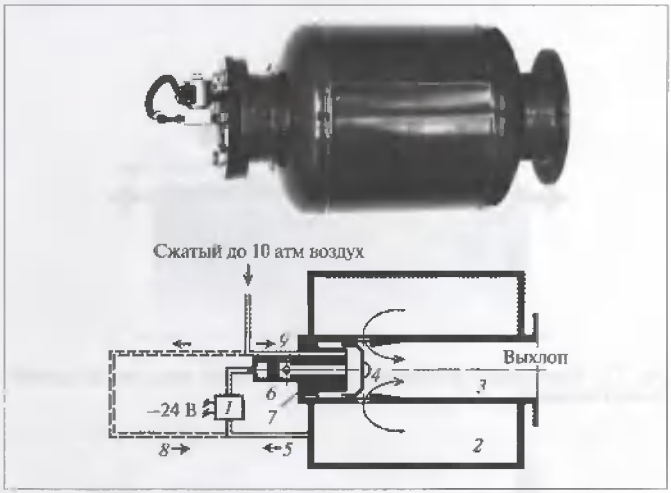


Рис. 7.5. **Схема подключения и работы пневмоимпульсного генератора ПГ-25/8:**

1 — электромагнитный распределитель; *2* — форкамера; *3* — выхлопное сопло; *4* — запорный клапан; *5* — управление от форкамеры; *6* — клапан сброса; *7* — гайка запорной пробки; *8* — управление от воздушной магистрали; *9* — заполнение форкамеры

ний их энергии недостаточно. Очистку экранов, включая прочные первичные отложения, осуществляют при помощи аппаратов водяной очистки. В качестве рабочего агента используется холодная техническая вода с давлением 1 – 2 МПа.

Разрушение отложений водой преимущественно осуществляется за счет термошока, при котором отложения при быстром охлаждении растрескиваются. По другому механизму (рис. 7.6) вода при воздействии на поверхность проникает внутрь отложений, испаряется и за счет увеличения объема разрушает отложения. При этом по опыту компании Клайд Бергеманн решающим фактором эффективности очистки является угол падения струи.

Применяются маловыдвижные и дальнобойные аппараты водяной очистки.

Маловыдвижные аппараты водяной очистки, очищают поверхность, на которой они расположены («на себя») при выдвижении сопловой головки в топку, и служат для локальной очистки (рис. 7.7). Эффективный радиус обдувки современных аппаратов до 4 – 5 м. Их работа основывается на том же принципе, что и паровых аппаратов. В показанной на

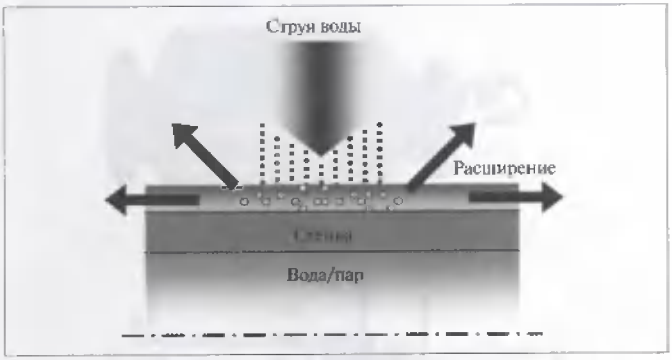


Рис. 7.6. **Иллюстрация разрушения отложений струей воды (из презентации Клайд Бергеманн)**

Рис. 7.7. **Схема обдувки (*а*); вид маловыдвижного аппарата водяной обдувки (*б*)**

рис. 7.7, *а* схеме очистки аппаратом Клайд Бергеманн вращающая труба с винтовым приводом перемещает сопловую головку при закрытом вентиле приблизительно на 40 мм за экран внутрь топки. При продолжающемся вращательном движении открывается вентиль. В зависимости от установочного угла сопел и возможного хода головки, струя воды описывает различные спирали на поверхности экрана.

Дальнобойные аппараты осуществляют обдувку противоположных и боковых стен топки без выдвижения сопловой головки в топку (рис. 7.8). Эффективная дальность боя струи современных аппаратов 25 – 30 м.

При этом по сравнению с настенными маловыдвижными аппаратами зона эффективной очистки «водяных пушек» значительно больше, что

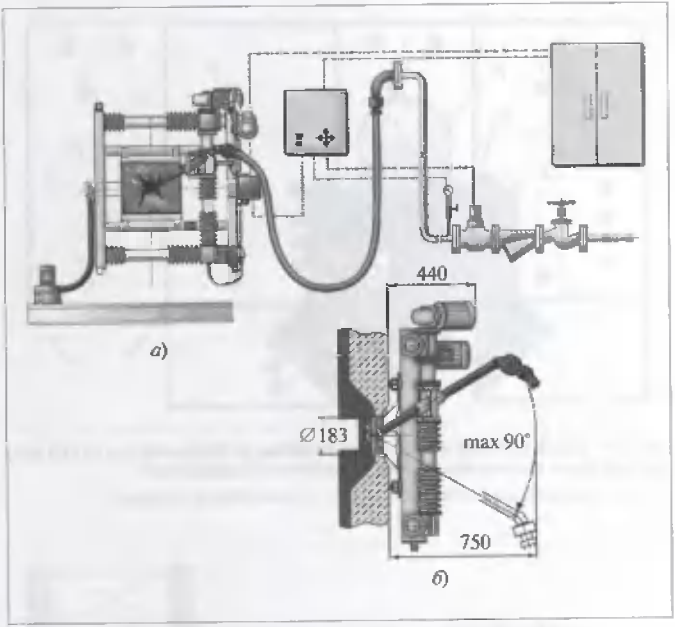


Рис. 7.8. **Дальнобойный аппарат водяной очистки Клайд Бергеманн:**
а — схема аппарата; *б* — узел ввода сопла

позволяет кардинально уменьшить число аппаратов очистки (рис. 7.9). Обычно для очистки топки достаточно 4 — 8 аппаратов. Дальнобойные и выдвижные аппараты могут применяться как самостоятельно, так и в сочетании друг с другом для повышения эффективности очистки и большей полноты охвата стен топки.

Для уменьшения отрицательных воздействий термошока на металл труб, при которых происходит усталостные разрушения, оптимизируется размер и параметры водяной струи, скорость ее перемещения по экрану и, как показал опыт эксплуатации аппаратов на котле П-67 при сжигании березовского угля, должно предотвращаться попадание струи на экранные участки, свободные от отложений [48].

Для очистки поверхностей нагрева также применяется волновая энергия, возникающая при сжигании в режиме близком к детанационному природного газа или водорода в расположенных вне газоходов котла ка-

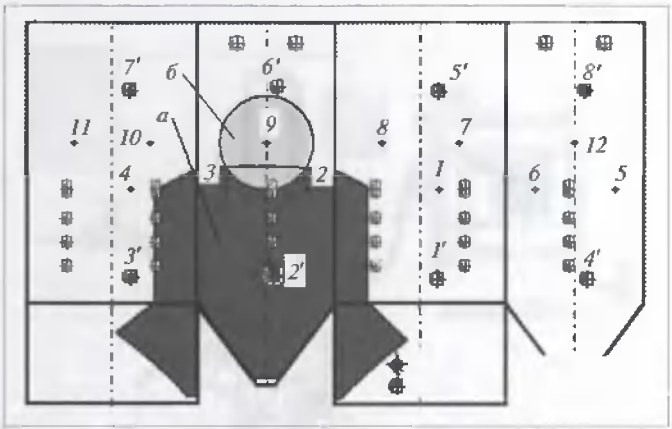


Рис. 7.9. **Схема топочной камеры и рассчитанные по программе Jets (ВТИ) зоны очистки одним дальнобойным (*а*) и выдвижным (*б*) аппаратами:**

1 — 12 — выдвижные аппараты; *1' — 8'* — дальнобойные аппараты

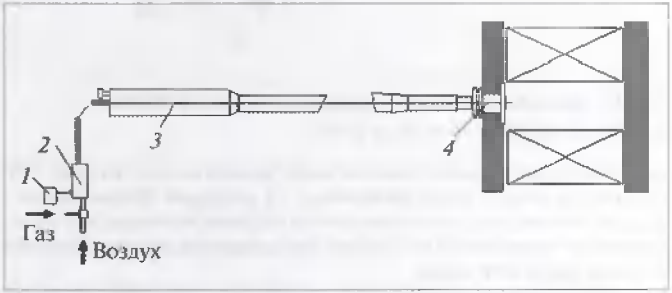


Рис. 7.10. **Схема газоимпульсной очистки:**

1 — источник импульсов высокого напряжения; *2* — узел подготовки и зажигания смеси; *3* — форкамера; *4* — сопло

мерах нестационарного горения (газоимпульсные методы очистки — ГИО, рис. 7.10).

В отличие от струи, волны сферически распространяются по всему объему газохода и в плотных пакетах, что предопределяет их преимущественное применение для очистки плотных пакетов регенеративных возду-

хоподогревателей (термоимпульсная очистка) и конвективных поверхностей нагрева. К естественным недостаткам метода следует отнести воздействие волновой энергии не только на поверхности нагрева, но и на неохлаждаемые элементы стен. С использованием обогащенного кислородом воздуха в аппаратах нестационарного горения можно достичь достаточно высокой энергии ударных волн. Однако, с учетом воздействия волн на обмуровку стен, энергия газоимпульсных методов и область применения ограничиваются очисткой от непрочных отложений. Прежде всего, такая очистка целесообразна в котлах, сжигающих угли с высокой склонностью к образованию сульфатно-кальциевых отложений. Регулярная очистка непрочных отложений предотвращает их развитие со временем в прочные сульфатно-кальциевые.

Приложения

Приложение 1. Примеры описаний ситуаций по шлакованию топочных камер

Объект (уголь)	Зона горения топки	Верхняя часть
ПК-39 (экибастузский)	Гребни и самораспшлаковывающийся слой шлаковых отложений. Интенсивный рост шлаковых отложений, закрепившихся на скатах и в углах холодной воронки	Рыхлые отложения
ТП-81, ПК-10 (кузнецкий СС)	Саморазрушающиеся гребни и шлаковые покрытия на охлаждаемых трубах. Рост шлаковых образований до значительных размеров на ошипованных участках, скатах холодной воронки, неохлаждаемых участках	Рыхлые отложения
БКЗ-210, ПК-10Ш (челябинский), ТП-170 (кызылкийский)	Слой обогащенных железистых отложений с локально выступающими гребнями шлака (ПК-10Ш), образование мощных шлаковых наростов на неохлаждаемых участках, экранах, расположенных напротив горелок (БКЗ-210). Интенсивное шлакование неэкранированных участков у амбразур горелок; шлиц заднего дутья (ТП-170)	Постепеный переход от слоя обогащенных железистых отложений к слою рыхлых отложений
ПК-24 (азейский)	При оптимальных режимах сжигания шлакование топки не лимитирует работу котла. В эти периоды имеется слой первичных железистых отложений по всей площади экранов и шлаковые отложения на более широких стенах. Шлаковые отложения относительно непрочные и их толщина не превышает 100 – 150 мм. Аварийные ситуации связаны с разрушением экранной системы холодной воронки падающими глыбами проплавленного шлака, которые образуются при нарушениях топочного процесса и неоптимальных режимах. В частности, такие явления наблюдались при снижении избытков воздуха до $\alpha''_{\text{пп}} = 1{,}09$	
П-59 (подмосковный)	Интенсивное шлакование топки наблюдалось даже на пониженной нагрузке примерно 0,75 номинальной. Происходило образование железистых отложений ($Fe_2O_3 = 80$ %). Значительные шлаковые наросты формировались на экранах ниже ↓25 м почти по всему периметру топки. Наибольшее шлакование имело место на боковых стенах над горелками и воздушными соплами, в углах топки. Толщина отложений составляла 150 – 500 мм и они имели оплавленную поверхность; стекающий шлак образовывал на скатах холодной воронки глыбы шлака размером в несколько метров. Плиты шлака из очагов шлакования и шлаковые образования со скатов холодной воронки имели высокую прочность и при падении перекрывали горловину холодной воронки, из-за чего происходили аварийные остановы котлов	Выше ↓25 м все стены топки вплоть до выходного окна покрывались непрочными шлаковыми отложениями толщиной 50 – 100 мм

П-67 (березовский)	В первый период эксплуатации гребневидные отложения имели низкую прочность и локальное расположение. Постепенно формировался слой железистых отложений (Fe_2O_3 = 74,7 %) высокой прочности, отложения с высокой степенью сульфатизации (K_{SO_3} = 77 %), шлакование котла существенно возросло. Ширмовые поверхности находились в эксплуатационно чистом состоянии. На трубах конвективных поверхностей отложения были рыхлыми. Далее загрязнение и шлакование котла существенно возросло. На экранах топки образовывались отложения с высокой степенью сульфатизации (K_{SO_3} = 77 %), интенсивно шлаковались неочищаемые участки экранов, мощные глыбы шлака образовывались на скатах холодной воронки. При снижении нагрузки системы шлакоудаления не справлялись с выпадающим в устье шлаком. В результате повышенного шлакования топки температура газов $\vartheta''_т$ выросла на 75 °С выше проектной. Примерно на 100 °С выше расчетной была температура факела, а коэффициент тепловой эффективности Ψ на уровне 0,26 – 0,3. На конвективных поверхностях нагрева наблюдались характерные, при сжигании КАУ сульфатно-связанные отложения, которые часто заполняют продольные промежутки между трубами пакетов.

Примечание. Приводимые ситуации соответствуют определенным периодам времени. В силу внедрения мероприятий, средств очистки, изменения топливного баланса ситуация в настоящее и иные периоды времени может не соответствовать приводимой.

Приложение 2. Примеры описаний ситуаций по образованию отложений по газоходу за топкой

Объект (уголь)	Фестон, ширмы, вертикальный пароперегреватель	Поверхности нагрева в конвективной шахте
П-57 (экибастузский)	Саморазрушающиеся гребни шлаковых отложений. Накопление кусков шлака и летучей золы на неохлаждаемом скате за фестоном. Обогащенные железистые отложения на трубах из стали перлитного класса при низких избытках воздуха	Рыхлые отложения. Накопление кусков шлака и летучей золы при интенсивном образовании золошлакового завала в поворотном газоходе
ПК-40 (кузнецкий)	Шлаковые образования значительных размеров на входных участках ширм при $\vartheta''_т \geq$ 1200 ÷ 1250 °С	Рыхлые отложения. Рост очагов шлаковых отложений вплоть до перекрытия сечения при $\vartheta > t_{шл}$

П-50 (донецкий АШ)	При средней температуре газов на входе 1315 °С и максимальной в центральной части до 1350 °С происходит значительное шлакование ширм. Шлак висит на подвесных трубах и захватывает один-два нижних змеевика ширм по всей длине средних ширм. С приближением к боковым стенам длина зашлакованных участков ширм уменьшается. Между шлаковыми образованиями соседних ширм, обычно, имеется просвет 100 – 150 мм, но между некоторыми из них сечение может быть перекрыто полностью. Из-за шлакования ширм происходит образование завала на наклонном и горизонтальном участках поворотного газохода, а также наблюдается падение глыб шлака на под	Рыхлые отложения
ПК-24 (азейский)	*Ширмы*: Гребни обогащенных железистых отложений на входном участке ширм, рыхлый налет на участке над КПП	На горизонтальном пароперегревателе образуется слой обогащенных железистых отложений и гребни обогащенных Са сульфатизированных отложений в аэродинамически активной зоне. Менее прочные, обогащенные компонентами основного состава и SO_3 отложения в аэродинамически неактивной зоне
ТП-170 (башкирский)	*Фестон*: Слой прочных отложений на на всех четырех рядах фестона. Большие гребни шлаковых отложений. Шлакование неохлаждаемого наклонного ската. *Вертикальный пароперегреватель*: Слой прочных первичных отложений на лобовых трубах, остроконечные гребни поверх него. Большие (до 500 мм) образования шлаковых отложений на части газохода. Межтрубное пространство пакета заполнено шлаковыми отложениями с узкими проходами для газа	
П-67 (березовский)	Особенностью шлакования и загрязнения при сжигании КАУ является медленное образование прочных отложений на чистых трубах. Ситуация кардинально изменяется с течением времени по мере формирования первичного слоя	

П-67 (березовский)	В первый период эксплуатации ширмовые поверхности находились в эксплуатационно чистом состоянии	На трубах конвективных поверхностей на лобовой стороне отложения были сыпучими, рыхлые тыловые отложения в некоторых местах образовывали перемычки между трубами. На трубах экономайзера отложения также были рыхлыми
	После длительной эксплуатации: ширмы второй ступени, находящиеся в зоне температур газов выше температуры начала шлакования, имеют низкую тепловую эффективность ($\psi_{ш2} = 0,28$)	Наиболее низкий коэффициент тепловой эффективности имеет конвективный пароперегреватель с горизонтальными пакетами за поворотной камерой в связи с образованием между трубами в продольном направлении прочных сульфатносвязанных отложений (перемычек), которые со временем забивают и межтрубные проходы, если не выполняется механическая очистка в периоды остановов котла

Приложение 3. Химический состав минеральной части углей в опытах и экспериментально или экспертно определенные показатели их шлакующих и загрязняющих свойств.

Таблица П3.1

Уголь	A^d, %	Химический состав (по массе) минеральной части, %							
		SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O
Челябинский Б3Р	43	55,58	24,94	1,21	9,64	3,26	2,62	1,82	0,93
Приозерный Б2Р	24,5	57,6	17,02	1,07	11,78	7,71	2,68	0,43	1,71
Кузнецкие угли:									
СС2ССОК1 разрез Сибиргинский	20	55,61	25,05	1,00	6.11	8.02	1,40	1,80	1,00
ТР, шахта Шушталепская	21	59,32	22,16	1,01	7,96	4,07	2,33	2,05	1.1
ДГР, разрез Талдинский Северный	20,7	58,87	24,49	1,24	8,42	2.93	1.26	1,65	1,15
Башкирский Б1Р	23	51,08	25,3	2,14	2,45	15,88	1,79	0,8	0,56
Кызылкийский Б3СШ	28	54,72	17,06	1,11	14,31	7,46	2,76	1,74	0,84
Экибастузский КСН	40	61,45	28,38	1,22	6,36	1,08	0,6	0,63	0,28
Подмосковный Б2	37,5	45,29	35,66	0,96	10,38	4,82	1,45	0,72	0,72
Ангренский Б2	24,7	49,98	24,99	0,68	10,75	8,37	2,81	1,26	1,17
Азейский Б2Р	19	55,89	29,8	0,95	4,98	5,64	1,66	0,66	0,42
Канско-ачинские угли 2БР:									
разрез Березовский	6,4	34,16	8,616	0,47	11,42	38,67	6,22	0,39	0,05
разрез Бородинский пласт Бородинский 1	5,1	23,86	3,5	0,22	16,31	46,89	8,86	0,05	0,32
разрез Бородинский пласт Бородинский II	12,7	63,78	18,38	1,13	4,243	9,377	2,02	0,78	0,288
Минусинский ДР	20	50,9	23,88	1,11	11,52	6,41	3,97	1,12	1,09

Таблица П3.2

Уголь	A^d, %	S_p^{daf}, %	Na_2O^a, %	$CaO^{раст}$, %	$t_{шл}$, °С	t_{12}, °С	Нормированные индексы			
							P_{Fe}	P_{Ca}	P_{Na}^{Σ}	R_{st}
Челябинский Б3Р	43	0,75	0,74	3,1	990*	1090	0,6	0,25	0,25	0,6
Приозерный Б2Р	24,5	0,48	1,59	7,29	975	1150	0,6	-	0,5	0,7
Кузнецкие угли:										
СС2ССОК1 разрез Сибиргинский	20	—	—	7,26	1040*	1215	0,2	0,25	0,25	0,5
ТР, шахта Шушталепская	21	—	—	3,69	1020	—	0,2	0,25	0,25	0,5
ДГР, разрез Талдинский Северный	20,7	0,17	0,16	2,35	1040	1230	0,2	0,25	0,25	0,5
Башкирский, Б1Р	23	—	—	—	1000	1200	0,6	—	—	0,6
Кызылкийский Б3СШ	28	1,9	—	—	970	1140	0,8	0,6	—	0,6
Экибастузский КСН	40	0,71	0,24	1,04	1200*	1300	0,3	0,25	0,25	0,25
Подмосковный Б2	37,5	3,13	0,27	4,24	1090*	1125	0,8	0,25	0,25	0,6
Ангренский Б2	24,7	2,02	1,01	8,25	995	1130	0,7	0,4	0,5	0,8
Азейский Б2Р	19	0,43	0,27	5,53	995	-	0,6	0,5	0,25	0,6
Канско-ачинские угли, 2БР:										
разрез Березовский	6,4	0,46	0,03	38,4	985	1160	0,7	0,8	0,25	0,8
разрез Бородинский пласт Бородинский 1	5,1	0,06	0,05	46,8	—	—	0,6	0,7	0,25	0,7
разрез Бородинский пласт Бородинский II	12,7	0,17	0,16	9,31	975	1130	0,5	0,7	0,25	0,7
Минусинский ДР	20	—	0,88	5,98			0,2	—	—	0,6

* Химический состав (отношение *ko*) в опытах по измерению $t_{шл}$ отличался от приведенного.

Приложение 4. Химический состав минеральной части ряда углей и расчетные показатели их шлакующих и загрязняющих свойств

Таблица П4.1

Уголь	A^d, %	Химический состав (по массе) минеральной части, %							
		SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O
Подмосковный	37,5	45,29	35,66	0,96	10,38	4,82	1,45	1,02	0,44
Интинский	32,5	54,6	18,6	0,8	14,1	6,9	2,3	1,3	1,4
Челябинский	49,8	59,2	27,6	0,9	5,5	1,2	2,5	2,3	0,8
Башкирский (бабаевский)	23	54,1	24,0	2,1	2,6	13,9	2,0	0,7	0,6
Экибастузский	45	61,05	27,86	1,14	7,27	1,01	0,69	0,78	0,21
Приозерный (тургайский)	25	54,1	26,2	2,6	7,1	5,6	1,9	0,4	2,1
Майкубенский	22	57,99	24,42	1,25	7,7	3,4	2,13	2,14	0,96
Кузнецкие угли:									
Талдинский-Северный	18,0	59,0	24,3	1,3	8,1	3,0	1,4	1,7	1,2
Ерунаковское месторождение	18,0	61.0	25,0	1.0	6.4	2.6	1.5	1,7	0.8
разрез Бачатский	10,0	58,1	29,7	0.9	6.6	1.9	0.7	1.3	0.8
разрез Сибиргинский	20	56,0	27,8	1,0	6,3	3,7	2,5	1,4	1,3
Минусинский	20	49,6	28,7	1,4	7,6	7,5	3,9	0,6	0,7
Нерюнгринский	18	54,6	23,3	1,1	11,4	5,8	2,6	0,6	0,6
Азейский	22	52,76	28,74	0,4	7,24	7,94	2,11	0,6	0,2
Южно-Якутский (Сыллахский)	26,2	50,6	23,3	0,9	11,8	8,0	3,0	1,0	1,4
Харанорский	21,0	58,6	23,5	0,7	5,2	6,9	2,7	1,6	0,8
Бородинский	10,5	54,3	12.2	0,82	5,66	22,76	3,81	0,21	0,31
Березовский	5,6	17,2	10,0	0,5	8,1	56,3	7,1	0,2	0,6

Таблица П4.2

Уголь	k_O	S_p^{daf}, %	Na_2O^a, %	$CaO^{вост}$, %	$t_{шл}$, °C	t_{12}, °C	Нормированные индексы			
							P_{Fe}	P_{Ca}	P_{Na}^{R}	R_{sl}
Подмосковный	10,6	3,24	0,16	4,24	1027	1136	0,76	0,44	0,23	0,55
Интинский	6,22	2,8	—	—	993	1142	0,65	0,32	0,43	0,76
Челябинский	12,9	—	—	—	1045	1204	0,37	0,18	0,32	0,50
Башкирский (бабаевский)	4,66	—	—	—	981	1161	0,68	0,56	0,32	0,66
Экибастузский	33,48	0,66	0,18	0,98	1205	1297	0,01	0,25	0,24	0,19
Приозерный (тургайский)	8,29	—	—	—	1009	1165	0,58	0,21	0,51	0,61
Майкубенский	9,69	—	—	—	1020	1197	0,0	0,29	0,36	0,55
Кузнецкие угли:										
разрез Талдинский-Северный	11,59	—	0,18	—	1035	1207	0,0	0,38	0,24	0,56
Ерунаковское месторождение	13,18	—	—	—	1047	1212	0,0	0,33	0,28	0,53
разрез Бачатский	18,87	—	—	—	1092	1235	0,2	0,22	0,35	0,48
разрез Сибиргинский	9,53	—	—	—	1019	1200	0,0	0,24	0,42	0,58
Минусинский	6,28	—	—	—	994	1174	0,35	0,42	0,34	0,67
Нерюнгринский	8,23	—	—	—	1009	1189	0,04	0,40	0,32	0,60
Азейский	7,55	0,43	0,13	7,79	1004	1162	0,57	0,54	0,22	0,71
Южно-Якутский (Сыллахский)	5,58	0,05	—	—	988	1168	0	0,34	0,44	0,63
Харанорский	6,9	—	—	—	999	1179	0,40	0,41	0,34	0,58
Бородинский	2,49	—	—	—	965	1130	0,54	0,59	0,4	0,75
Березовский	0,43	0,2	—	—	1052	1130	0,70	0,81	0,4	0,86

Список литературы

1. **Алехнович А. Н.** Актуальные вопросы исследования шлакующих свойств углей и шлакования котлов // Электрические станции. 2011. № 9. С. 2 – 7.
2. **Barnes I.** Slagging and fouling in coal-fired boilers // Profiles IEA, PF 09-04, United Kingdom, June 2009.
3. **Van Alphen Ch.** Factors influencing fly ash formation and slag deposit formation (slagging) on combusting a South African pulverised fuel in a 200 MWE boiler // University of the Witwatersrand, Johannesburg, UAF, 2005 (диссертация на степень доктора философии).
4. **Залкинд И. Я., Вдовченко В. С., Дик Э. П.** Зола и шлаки в котельных топках. М.: Энергоатомиздат, 1988.
5. **Gupta R.** Advanced Coal Characterization: A Review / 2006 Sino-Australia Symposium on Advanced Coal Utilization Technology, July 12 – 14, 2006, Wuhan, China.
6. **Энергетические угли** восточной части России и Казахстана: Справочник / В. В. Богомолов, Н. В. Артемьева, А. Н. Алехнович и др. — Челябинск: УралВТИ, 2004.
7. **Энергетическое топливо СССР** (ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут, горючий газ): Справочник / В. С. Вдовченко, М. И. Мартынова, Н. В. Новицкий, Г. Д. Юшина. М.: Энергоатомиздат, 1991.
8. **ГОСТ 30-404–94.** Определение форм серы.
9. **Шлакование** и образование отложений в газовом тракте котлам / А. Н. Алехнович, В. В. Богомолов, В. Е. Гладков, Н. В Артемьева // Теплоэнергетика, 1997. № 3.
10. **Алехнович А. Н.** Шлакование энергетических котлов. Челябинск: ЧФПЭИпк, 2006.
11. **Алехнович А. Н., Артемьева Н. В. Богомолов В. В.** Оценка разновидностей серы в энергетических углях // В кн.: Горение твердого топлива. Сборник докладов VII Всероссийской конференции. Новосибирск, 2009. Ч. 3.
12. **Wigley F., Williamson J.** The Characterisation of Fly Ash Samples and Their Relationship to the Coals and Deposits from UK Boiler Trials // In J. Williamson and F. Wigley (Eds.). The Impact of Ash Deposition on Coal Fired Plants. Washington: Taylor & Francis, 1994. P. 385 – 398.
13. **Zygarlicke Ch. J.** Predicting ash behavior in conventional power systems: putting models in work // Impact of mineral impurities in solid fuel combustion / Edited by R. Gupta, T. Wall, L. Baxter, Proceeding of an Engineering Foundation Conference on Mineral Matter in Fuels, USA, Hawaii, Kona, November 2 – 7, 1997.

14. **Benson S. A., Holm P. L.** Comparison of inorganic constituents in three low-rank coals // Ind. Eng. Chem. Prod. Dev. 1985. № 24. P. 145 – 149.
15. **Исследования** энергетических углей методом химического фракционирования и оценка их загрязняющих свойств / А. Н. Алехнович, В. М. Талова, В. В. Богомолов, В. Е. Гладков // Теплоэнергетика, 2001. № 5. С. 55 – 63.
16. **Алехнович А. Н.** Вероятностная модель формирования шлаковых отложений // Электрические станции. 1995. № 2. С. 16 – 20.
17. **Benson S. A.** Ash Formation and Behavior in Utility Boilers // Microbeam Technologies Inc. Newsletter Articles. 2001.
18. **Full scale** deposition trials at 150 MW_e PF-boiler co-firing coal and straw: Summary of results / K. H. Andersen, F. J. Frandsen, P. F. B. Hansen, K. Dam-Johansen // Impact of mineral impurities in solid fuel combustion. New York: Kluwer academic / Plenum Publishers, 1999. P. 367 – 381.
19. **Review** of models and tools for slagging and fouling prediction for biomass co-combustion / A. F. Stam, W. R. Livingston, M. F. G. Cremers, G. Brem // IEA Bioenergy Network, Arnhem, December 2009.
20. **The Slaggings** Behaviour of Coal Blends in the Pilot-Scale Combustion Test Facility / A. N. Alekhnovich, V. V. Bogomolov, N. V. Artemjeva, V. E. Gladkov // Impact of mineral impurities in solid fuel combustion. New York: Kluwer academic / Plenum Publishers, 1999. P. 471 – 483.
21. **Методические указания** по проектированию топочных устройств энергетических котлов. С-Пб.: ВТИ-ЦКТИ, 1996.
22. **Алехнович А. Н., Майданик М. Н.** Усовершенствованный алгоритм и компьютерная программа прогнозирования шлакования и шлакующих свойств углей // В кн.: Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов: Сборник тезисов докладов третьей научно-практической конференции. Челябинск: УралВТИ. 2001. Т. 1. С. 53 – 62.
23. **Повышение** эффективности работы котлов в результате применения системы нижнего дутья конструкции НПО ЦКТИ / Е. Э. Гильде, Н. С. Клепиков, Л. Н. Гусев, А. А. и др. // Теплоэнергетика, 2003. № 2. С. 55 – 57.
24. **Богомолов В. В., Родионов В. А.** Возможность повышения бесшлаковочной мощности котла ТП-230 за счет оптимизации режимных параметров // Электрические станции. 1998. № 4. С. 10 – 14.
25. **Исследование** работы котла БКЗ-500-140-1 на пониженных избытках воздуха при сжигании ирша-бородинского угля / С. Г. Козлов, М. С. Пронин, С. И. Корнейчук, Е. Г. Алфимов // В кн.: Повышение эффективности и экологической безопасности сжигания углей на электростанциях Сибири. Красноярск: СибВТИ. 1995. С. 40 – 48.

26. **Богомолов В. В., Иванова Н. И., Алехнович А. Н.** Исследование свойств золы и загрязнения пароперегревателя котла ПК-24 при сжигании смеси азейского и черемховского углей // Теплоэнергетика, 1984. № 4. С. 42 – 45.
27. **Исследование** шлакования котлов БКЗ-160 Согринской ТЭЦ и разработка мероприятий по его снижению / В. В. Богомолов, А. Н. Алехнович, А. Ю. Кузнецов, О. В. Богомолов // Электрические станции, 2011. № 11. С. 18 – 24.
28. **Шлакование** топочной камеры при сжигании березовского угля / Ю. Л. Маршак, С. Г. Козлов, Э. П. Дик и др. // Теплоэнергетика, 1980. № 1.
29. **Исследования** шлакующих свойств смесей / А. Н. Алехнович, В. В. Богомолов, Н. В. Артемьева, В. Е. Гладков // Теплоэнергетика, 2000. № 8.
30. **Алехнович А. Н., Артемьева Н. В., Богомолов В. В.** Шлакующие свойства углей и их учет при анализе возможности использования непроектных топлив // Электрические станции, 2006. № 3.
31. **Тепловой расчет** котельных агрегатов (нормативный метод) — изд. 3-е, перераб. и доп. С-Пб.: НПО ЦКТИ, 1998.
32. **Алехнович А. Н.** Термическое сопротивление отложений и коэффициент тепловой эффективности топочных экранов пылеугольных котлов // В кн. Горение твердого топлива. Новосибирск, 2006. Т. 3. С. 163 — 171.
33. **Алехнович А. Н., Артемьева Н. В., Чернецкий М. Ю.** Уточнение показателей загрязнения и шлакования для слабошлакующих углей применительно к нормативному и зональным методам теплового расчета топочных камер и математическим моделям / Сборник докладов V научно-практической конференции «Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы». Челябинск: ИЦЭУ. 2011. Т. II. С. 57 – 65.
34. **Neville A.** New Laser Technology Helps Reduce Coal-Slagging Headaches // Power, 2009. 1. February.
35. **Prediction** of the slagging state on coal-fired boilers based on vague sets / Xu Zhi-ming, Wen Xiao-qiang, Zhang Ai-ping, et al. // Proceeding of International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning VIII. Austria, Schlandming. 2009. June 14 – 19.
36. **Hansen T., Blankinship S.** Infrared Camera Performs Double Duty / Power Engineering, 2006. V. 110. № 7, P. 88 – 89.
37. **Стационарный** пирометрический контроль кольцевой топки пылеугольного котельного агрегата паропроизводительностью 820 т/ч / А. В. Боровский, С. А. Дружинин, Д. П. Мядзелец, В. Н. Филиппов // Теплоэнергетика, 2002. № 8. С. 42 – 47.
38. **Duska I.** Vermeidung von Verschlackungserscheinungen in Feuerraumen und Rauchgasruckfuhrungen. // Energietechnik, 1983. № 8. S. 300 – 303.

39. **Steam**, its generation and use. 40th edition. Babcock &Wilcox // Fuel Ash Effect on Boiler Design and Operation. P. 20.17 – 20.18.
40. **Способ** наблюдения за появлением нарушений в работе установки вследствие загрязнений с помощью контактной (ударной) установки // РЖ Энергетика. 10Р55П. 1995.
41. **Davidson I. S.** A Practical On-line Solution of Control Ash Deposition // In J. Williamson and F. Wigley (Eds.). The Impact of Ash Deposition on Coal Fired Plants. Washington: Taylor & Francis, 1994. P. 693 – 702.
42. **Teruel E., Cortes C., Diez L. I., Arauzo I.** Monitoring and prediction of fouling in coal-fired utility boilers using neural networks // Chemical Engineering Science, 2005. V. 60. № 18. P. 5035 – 5048.
43. **Мессинг М., Юрвес А.** Системы очистки поверхностей нагрева фирмы Клайд Бергеманн ГМБХ // В кн.: Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов: Сборник тезисов научных докладов III научно-практической конференции. Челябинск: УралВТИ. 2001. Т. II. С. 105 – 114.
44. **Уваричев В. А.** Новые системы в котлоочистке // Сборник докладов V научно-практической конференции «Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы». Челябинск: ИЦЭУ. 2011. Т. I. С. 1 – 7.
45. **Пневмоимпульсная** установка для очистки поверхностей нагрева котлов / В. Я. Лысков, А. Н. Алехнович, В. А. Кочетов и др. // Энергетик, 1979. № 4. С. 21 – 22.
46. **Пневмоимпульсные** системы очистки конвективной шахты котла П-67 / В. И. Звегинцев, В. Ф. Чиркашенко, В. В. Харченко, Ф. А. Серант // В кн.: Эксплуатация и модернизация энергоблоков 800 МВт: Сборник тезисов докладов научно-практической конференции // Шарыпово. 2002.
47. **Шабанов И. И.** Проблемы реализации пневмоимпульсных систем очистки конвективных поверхностей котельных агрегатов // Сборник докладов V научно-практической конференции «Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы». Челябинск: ИЦЭУ. 2011. Т. I. С. 27 – 33.
48. **Очистка** топочных экранов котла П-67 при пониженных нагрузках / В. В. Васильев, П. Ю. Гребеньков, М. Н. Майданик и др. // В кн.: Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов: Сборник тезисов докладов научно-практической конференции // Челябинск. 2001. Т. II. С. 132 – 141.

Содержание

Предисловие 3

ГЛАВА ПЕРВАЯ. **Примеры шлакования и загрязнения энергетических котлов** 4

ГЛАВА ВТОРАЯ. **Краткие сведения о минеральной части углей** . . 14

ГЛАВА ТРЕТЬЯ. **Условия и механизм образования отложений разных типов** 24

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ. **Показатели шлакующих и загрязняющих свойств углей.** 38

ГЛАВА ПЯТАЯ. **Влияние конструктивных и режимных факторов на шлакование и загрязнение** 53

5.1. Температура газов 54

5.2. Температурный уровень сжигания газа. 61

5.3. Температура и материал поверхности 61

5.4. Ступенчатое сжигание и работа с недостатком воздуха. . . 63

5.5. Тонкость помола топлива 66

5.6. Скорость газов, омывание поверхностей нагрева 67

5.7. Неравномерное распределение топлива и воздуха по горелкам 68

5.8. Попеременное и в смеси сжигание углей. 70

ГЛАВА ШЕСТАЯ. **Мониторинг и контроль шлакования**. 75

ГЛАВА СЕДЬМАЯ. **Очистка поверхностей нагрева** 88

Приложения 98
Приложение 1. Примеры описаний ситуаций по шлакованию топочных камер 98
Приложение 2. Примеры описаний ситуаций по образованию отложений по газоходу за топкой 99
Приложение 3. Химический состав минеральной части углей в опытах и экспериментально или экспертно определенные показатели их шлакующих и загрязняющих свойств 102
Приложение 4. Химический состав минеральной части ряда углей и расчетные показатели их шлакующих и загрязняющих свойств 104
Список литературы 106

Библиотечка электротехника
Приложение к производственно-массовому журналу «Энергетик»

АЛЕХНОВИЧ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ

Шлакование пылеугольных энергетических котлов

АДРЕС РЕДАКЦИИ:
115280, Москва, ул. Автозаводская, 14
Тел. (495) 675-19-06, тел./факс 234-74-21

Редакторы: Л. Л. Жданова, Н. В. Ольшанская

Сдано в набор 28.07.13. Подписано в печать 10.09.13.
Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.
Печ. л. 7,0. Заказ БЭТ/8(176)-2013.
Макет выполнен издательством «Фолиум»: 127238, Москва, Дмитровское ш., 157.
Отпечатано типографией издательства «Фолиум»: 127238, Москва, Дмитровское ш., 157.

Журнал «Энергетика за рубежом»

Приложение к журналу «Энергетик»

Подписывайтесь на специальное приложение к журналу «Энергетик» — **«Энергетика за рубежом»**. Это приложение выходит **один раз в два месяца.**

Журнал «Энергетика за рубежом» знакомит читателей с важнейшими проблемами современной зарубежной электроэнергетики:

— *развитие и надежность энергосистем и энергообъединений;*
— *особенности и новшества экономических и рыночных отношений в электроэнергетике;*
— *опыт внедрения прогрессивных технологий в энергетическое производство;*
— *модернизация и реконструкция (перемаркировка) оборудования электростанций, электрических и тепловых сетей;*
— *распространение нетрадиционных и возобновляемых источников энергии;*
— *энергосбережение, рациональное расходование топлива и экологические аспекты энергетики.*

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи по объединенному каталогу **«ПРЕССА РОССИИ». Том 1. Российские и зарубежные газеты и журналы.**

Подписной индекс журнала «Энергетика за рубежом» — *приложения к журналу «Энергетик»*

87261

Об авторе

Алехнович
Александр Николаевич —

профессор кафедры эксплуатации и наладки теплоэнергетического оборудования Челябинского филиала Петербургского энергетического института повышения квалификации, директор Уральской теплотехнической лаборатории, доктор техн. наук.

Автор более 200 печатных трудов, в том числе справочников, нормативных документов, учебных пособий. Разработанные методы прогнозирования шлакующих свойств углей и шлакования, программы прогнозирования вязкости шлаков и маневренности топок широко используются при разработке топочно-горелочных устройств котлов. По инициативе А. Н. Алехновича и под его руководством в 1992 – 2011 гг. проведены пять научно-практических конференций «Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов», материалы которых опубликованы в сборниках и отраслевых журналах.

Требования времени по улучшению экологических и экономических показателей угольных ТЭС диктуют необходимость прогресса в вопросах понимания шлаковых котлов