

## Раздел третий

## ОБРАЩЕНИЕ С ЗОЛОШЛАКАМИ

## 3.2. Системы золошлакоудаления ТЭС

## 3.2.3. Шлакоудаление

## 3.2.3.1. О целесообразности перевода котлов на режим твердого шлакоудаления при реконструкции ТЭС

*А.М. Архипов, Ю.М. Липов, В.Я. Путилов, МЭИ(ТУ)  
Н.И. Соловьев, ОАО «ЦКБ Энергоремонт»*

## АННОТАЦИЯ

Предложены технические решения по переводу котлов П-50 и ТП-87, работающих на кузнечном тощем угле, на режим твердого шлакоудаления. Рассмотрены вопросы по оценке комплексной эффективности внедрения приведенных технических решений.

В последнее время в технической литературе (см., например, [1]) обсуждается проблема целесообразности перевода энергетических котлов на режим твердого шлакоудаления (ТШУ). Ниже представлены технические решения по переводу на ТШУ котлов П-50 (Каширская, Черепетская и др. ГРЭС) и ТП-87 (ТЭЦ-22 Мосэнерго, Тольяттинской и др. ТЭЦ). Указанные котлы были спроектированы на сжигание донецкого АШ в режиме жидкого шлакоудаления, но в настоящее время работают на кузнечном угле изменяющегося качества, в основном, на угле марки ТР.

В ближайшие годы намечается преимущественный ввод новых пылеугольных энергетических котлов из-за увеличения стоимости природного газа [1]. В связи с этим все большее значение приобретает проблема сжигания в энергетических котлах России проектных углей ухудшенного качества, а также не-проектных углей, в том числе промпродукта и шлама. Кроме того, общемировой тенденцией является ужесточение экологических требований к ТЭС в части нормативных уровней удельных выбросов оксидов азота и к рациональному использованию золошлаков. В этих условиях переход на сжигание углей в энергетических котлах с твердым шлакоудалением представляется наиболее оптимальным как с экологической, так и с экономической точки зрения.

Главным преимуществом котлов с ТШУ является возможность снижения выбросов оксидов азота в 2,5...3 раза без реализации дорогостоящих мероприятий.

При выводе шлака в твердом виде из холодной воронки котла появляется возможность использования пневмомеханической технологии шлакоудаления, что позволяет получить шлак с высокими потребительскими свойствами без ограничений по потерям при прокаливании и повысить КПД котла примерно на 0,4 %. Преимущества пневмомеханической технологии шлакоудаления достаточно подробно изложены в [2].

Следует отметить, что обеспечение экономичного и надежного факельного сжигания угольной пыли в режиме ТШУ при возможном увеличении влажности и зольности угля с уменьшением содержания летучих на рабочую массу также является серьезной проблемой. Это определяется опасностями ухудшения экономичности и надежности сжигания, снижения производительности мельничного оборудования и локального шлакования топочных экранов.

Комплексное решение указанной проблемы возможно на основе отдельной компоновки пылеугольных (ПУГ) и газомазутных горелок (ГМГ), играющих роль сопел вторичного воздуха при сжигании угольной пыли, причем и те и другие должны быть прямоточными. Раздельная компоновка пылеугольных и газомазутных горелок позволяет ускорить прогрев и зажигание потока аэромеси, поскольку ее масса не забалластирована вторичным воздухом. При этом для надежности зажигания факела и уменьшения его пульсаций скорость истечения пылеугольных струй может быть принята умеренной (не более 24 м/с). В то же время скорость на выходе из сопел вторичного воздуха, при условии, когда их струи не препятствуют распространению пламени, может быть повышенной для обеспечения надежного зажигания угольной пыли за счет интенсификации внутренней рециркуляции горячих газов.

Преимущество прямоточных горелок обусловлено простотой их конструкции и возможностью ориентирования струй в нужном направлении с целью обеспечения требуемой аэродинамики и температурного режима факела.

При проработке возможности перевода котлов П-50 и ТП-87 на ТШУ было рассмотрено несколько вариантов. На рис. 1, 2 представлен один из вариантов компоновочной схемы тангенциально направленных горелок и сопел применительно к котлу П-50 с организацией в топке пяти вихревых факелов. В трех из них реализуется первая ступень горения. Этот вариант может быть использован и на котле ТП-87 при некоторых изменениях не принципиального характера. На обоих котлах ликвидируется перерыв, выполняется холодная воронка, а ошипованные и футерованные экраны нижней части топки заменяются на гладкотрубные.

Особенности принятой компоновочной схемы с оценкой ее преимуществ отражены в табл.1.  
Таблица 1. Сравнительные характеристики котла П-50 с твердым и жидким шлакоудалением

Наименование параметра	Ед. изм.	Характеристика параметра	Преимущества предлагаемых решений
Тип предлагаемых пылеугольных горелок / существующих		Прямоточные щелевые/вихревые	Простота, надежность и ремонтпригодность конструкции.
Количество пылеугольных горелок	шт.	12	По числу питателей. Снижение количества горелок нежелательно из-за уменьшения надежности зажигания и маневренности котла.
Начальный периметр зажигания струи предлагаемых пылеугольных горелок	м	1,8	Больше, чем у струи существующей вихревой горелки примерно на 0,4 м.
Аэродинамическая характеристика источника зажигания свежей струи предлагаемой / существующей горелок		Принудительно-эжекционный / эжекционный	Более интенсивный и высокотемпературный, чем в зоне обратных токов вихревой горелки.
Вероятность сепарации несгоревшей пыли		Меньшая, чем у вихревой горелки	Из-за наличия воздушной подушки, образованной высокоскоростными струями газомазутных горелок 1 яруса и боковыми (по отношению вихревых зон) струями газовых горелок 2 яруса.
Величина недожога по содержанию горючих в уносе, особенно, при сжигании угля с повышенными зольностью и влажностью		Более низкая, чем на котлах с вихревыми горелками при стехиометрическом сжигании	Раннее зажигание угольной пыли; большая доля внутренней рециркуляции высокотемпературных газов; высокая интенсивность перемешивания факела в зоне третичного дутья; исключение выхода из первой ступени горения недожженной угольной пыли без перемешивания со вторичным и третичным воздухом.
Условия выгорания мелкой пыли сбросного воздуха		Обеспечены	По причине размещения пылепроводов сбросного воздуха в нижней части комбинированных сопел и интенсивного прогрева аэросмеси поднимающимся факелом за счет большого наклона сопел вниз.
Условия экономичного совместного сжигания высокорекреационного топлива (газ, мазут) и угольной пыли		Обеспечены	Горелки высокорекреационного топлива и пылеугольные горелки разделены. Продукты сгорания обоих видов топлива движутся вверх в вертикальных сегментах объема топки, в которые поярусно вводятся высокоскоростные воздушные потоки, турбулизируя факел.
Вероятность локального шлакования экранов в поясе размещения ПУГ		Вероятность мала	Двухъярусная компоновка ПУГ; технология ступенчатого сжигания угольной пыли с наличием 2 ступени горения ниже пояса размещения ПУГ и 3 ступени – выше него; отсутствие зон давления факела на топочные стены при их надежном экранировании воздушными струями.
Ожидаемые (существующие) удельные выбросы оксидов азота при сжигании угольной пыли / природного газа	мг/м <sup>3</sup>	Не более 350/125 (1300/ 700)	Технологии ступенчатого сжигания угольной пыли и природного газа; низкий (0,25) избыток воздуха на выходе из ПУГ, который не превышает содержания летучих в угле на его рабочую массу.
Возможность работы котла на угле ухудшенного качества		Имеется	Из-за особенности аэродинамики факела и перевода котла на режим ТШУ.
Ожидаемая/существующая температура газов вверху топки	°С	(1130...1150)/ (1200...1220)	Увеличение средней тепловой эффективности топочных экранов, аэродинамические преимущества предлагаемой технологии сжигания.
Товарные свойства летучей золы и шлака		Обеспечены	За счет дожигания ниже нормативных горючих в летучей золе в верхней части топки и использования установки пневмомеханического шлакоудаления.

Расчетные избытки / скорости воздуха (м/с) на выходе из горелок и сопел котла П-50 указаны ниже.

Вид сжигаемого топлива	уголь	прир. газ
Газомазутные горелки	0,20/40,7	0,23/45,6
Газовые горелки	0,20/40,7	0,22/45,6
Пылеугольные горелки	0,25/21,2	0,15/18,4
Комбинированные сопла	0,50/45,1	0,45/50,1
в т.ч. сбросные пылепроводы	0,25/25,6	0/0

Прямоточные пылеугольные горелки предлагается выполнить вытянутыми по вертикали, т.к. чем больше высота и меньше ширина корня струй, вы-

ходящих из ПУГ, тем больше начальный периметр эжекции и тем быстрее будет осуществлен прогрев и зажигание всей массы аэросмеси. Например, при принятых габаритах ПУГ (700x200 мм) начальный периметр эжекции одной струи составляет:  $0,7 \times 2 + 0,2 \times 2 = 1,8$  м. Диаметр рассекателя существующей вихревой горелки котла П-50 составляет порядка 450 мм. Поэтому начальный периметр эжекции (со стороны обратного тока в приосевой зоне, откуда происходит зажигание) будет равен  $0,45 \times 3,14 = 1,41$  м. Высота плоско-щелевых ПУГ

может быть принята равной 1000 мм, а ширина 140 мм. В этом случае начальный периметр эжекции увеличится до 2,28 м и повысится надежность зажигания. В предлагаемой топке хвостовые объемы струй ПУГ одной стены с учетом инерционности горящих частиц принудительно подводятся к корням струй ПУГ противоположной стены и эжектируются последними. При этом доля принудительной внутренней рециркуляции, характерной для аэродинамики тангенциально направленных струй, довольно высока с учетом высоких скоростей истечения вторичного воздуха. По оценочным расчетам температура эжектируемых продуктов сгорания составит около 1300 °С. Таким образом, конвективный источник зажигания в предлагаемой топке является более развитым и стабильным как по температуре, так и по массе, чем при сжигании углей ухудшенно-

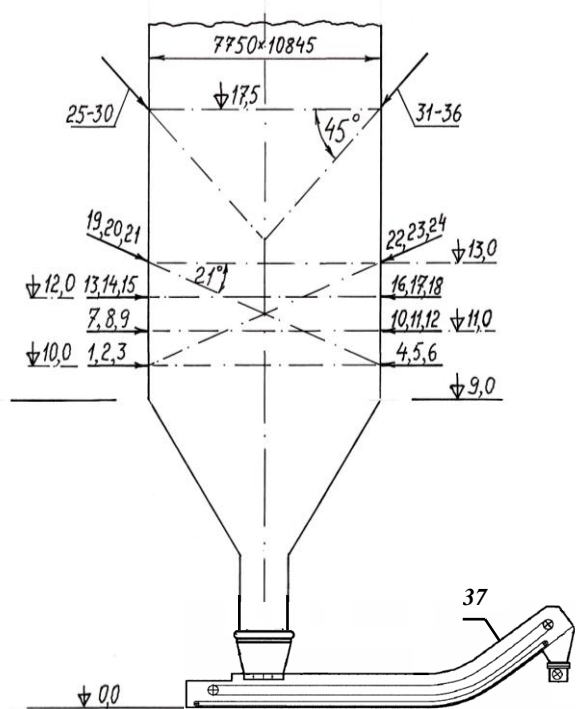


Рис. 1. Схема размещения горелок и сопел по высоте топки котла П-50:

1-6 — газомазутные горелки (при работе на угле — нижние сопла вторичного воздуха); 7-12 — пылеугольные горелки нижнего яруса; 13-18 — пылеугольные горелки верхнего яруса; 19-24 — газовые горелки верхнего яруса (при работе на угле — верхние сопла вторичного воздуха); 25-36 — комбинированные сопла сбросного-третичного воздуха; 37 — установка пневмомеханического шлакоудаления.

го качества в котлах с вихревыми горелками и жидким шлакоудалением.

С целью стабилизации горения в предлагаемой топке котла П-50 (даже при ухудшении качества угля) свежие факелы каждой из четырех ПУГ сконцентрированы в одной из трех вихревых зон первой ступени горения. Каждая такая зона образована за счет тангенциальной направленности по отношению условной поверхности вертикального тела вращения осей не только четырех ПУГ, но и четырех осесим-

метричных горелок высокорекреационного топлива. При сжигании угля последние выполняют роль сопел вторичного воздуха. Как это представлено на рис.1 и 2, пары газомазутных горелок (1,6; 2,5 и 3,4) выполняют в этом случае роль нижних сопел вторичного воздуха. Их высокоскоростные воздушные струи будут препятствовать сепарации несгоревшей пыли в холодную воронку из правой, центральной и левой вихревых зон первой ступени горения, соответственно. По-видимому, это будет обеспечиваться и при некотором угрублении угольной пыли, как намеренном (для уменьшения удельного расхода элек-

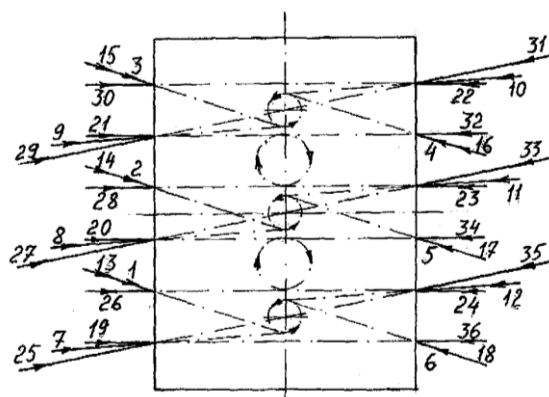


Рис. 2. Схема размещения горелок и сопел в проекции на горизонтальное сечение топки:

1-6 — газомазутные горелки (при работе на угле — нижние сопла вторичного воздуха); 7-12 — пылеугольные горелки нижнего яруса; 13-18 — пылеугольные горелки верхнего яруса; 19-24 — газовые горелки верхнего яруса (при работе на угле — верхние сопла вторичного воздуха); 25-36 — комбинированные сопла сбросного-третичного воздуха.

троэнергии на размол), так и вынужденном (из-за возможного ухудшения качества угля).

Пары наклоненных вниз газовых горелок верхнего яруса (19,24; 20,23 и 21,22) также предназначены для ввода в указанные вихревые зоны воздушных струй. Эти струи увеличивают интенсивность вихрей (т.е. величину принудительной внутренней рециркуляции — источника раннего зажигания), поскольку они направлены тангенциально к условной поверхности большего диаметра, чем пылеугольные струи (рис. 2). Кроме того, благодаря наклону вниз на угол порядка 20° (рис.1), они ограничивают вихревые факелы первой ступени горения с боков. Во-первых, это концентрирует ядра факелов, что важно для стабилизации горения, особенно при снижении качества угля. Во-вторых, это препятствует расширению факела с недожженной угольной пылью без взаимодействия со струями вторичного воздуха, что приводит к снижению содержания горючих в шлаке и летучей золе.

Пониженное содержание горючих в летучей золе обеспечивается также за счет создания над указанными вихревыми факелами зон повышенного давления воздуха. Оно обеспечивается, благодаря направлению в эти зоны высокоскоростных струй сбросного и третичного воздуха, вытекающего из

комбинированных сопел 25-36, размещенных на отметке 17,5 м и наклоненных вниз на угол 45° (рис. 1,2). Причем, струи, вытекающие из пар комбинированных сопел 25,35; 27,33 и 29,31 пересекают вертикальные оси вихревых факелов, препятствуя наиболее вероятному осевому выходу вверх недожженной угольной пыли. Пары комбинированных сопел 26,36; 28,34 и 30,32 препятствуют рассредоточенному по горизонтали выходу вверх недожженной угольной пыли, т.к. направлены по касательной относительно условного тела вращения повышенного диаметра. При этом направление тангенциальной закрутки противоположное, чем в вихревых зонах. Это обеспечивает повышенную турбулизацию догорающего факела и способствует выравниванию скоростных полей вверх топки.

Ввод в топку сбросного воздуха через комбинированные сопла, размещенные согласно рис. 1,2, является более оптимальным по сравнению с существующим на котлах П-50 и особенно ТП-87. На котлах П-50, имеющей ширину топки 10845 мм, боковые струи сбросного воздуха при ЖШУ, содержащие избыточный кислород, проникают в центральную по фронту топки зону, по всей видимости, в недостаточном количестве. Можно с уверенностью утверждать, что на котлах ТП-87 с более широкой топкой (14080 мм) эти боковые струи сбросного воздуха вообще не проникают в указанную зону топки. В связи с этим для обеспечения нормативного содержания горючих в летучей золе требуется некоторое увеличение суммарного избытка воздуха на выходе из топки.

При разработке компоновочной схемы комбинированных сопел был использован положительный опыт реконструкции котлов БКЗ-210-140ФД Западно-Сибирской ТЭЦ [3], в процессе которых разные виды топлива и воздушные потоки стали вводиться в топку в общих вертикальных слоях топочного объема. До реконструкции этих котлов указанные потоки вводились в топочный объем во взаимно перпендикулярных направлениях, что приводило к значительному мехнедожогу и шлакованию пароперегревателя.

Равномерный ввод сбросного воздуха через фронтальную и заднюю ее стены был успешно опробован во время первого этапа реконструкции котла ТП-87 (ст. №9) Западно-Сибирской ТЭЦ [3]. Указанный ввод был обеспечен за счет установки в приосевой зоне возле боковых стен топки четырех вертикальных делителей (по два на сторону), обеспечивающих каждый переход с трубы Ø 630x7 мм на три трубы Ø 325x6 мм. Предлагается использовать этот успешный опыт при реализации компоновочной схемы комбинированных сопел согласно рис.1,2. С учетом повышенной паропроизводительности одного корпуса котла П-50 (475 против 420 т/ч) сбросные пылепроводы следует выполнить из труб Ø 377x7 мм.

Принципиальная конструкция осесимметричных газомазутных горелок 1-6 (рис.1,2) и газовых горе-

лок 19-24 не требует пояснений. Указанные горелки успешно опробованы на большом количестве реконструированных котлов, в основном, Барнаульского котельного завода, которые были переведены на сжигание газа и мазута в прямоточно-вихревом факеле [3] и являются сертифицированными.

Были выполнены оценочные тепловые расчеты топочных камер котлов П-50 и ТП-87 в целом. При проведении расчетов величина мехнедожога принята на 0,5 % ниже нормативной [4], т.е. такой же, как и на котлах с жидким шлакоудалением (1,5 %). Это объясняется аэродинамическими преимуществами предлагаемой технологии сжигания тощего угля в условиях ТШУ, относящимися к надежности зажигания и дожигания угольной пыли.

При разработке мероприятий по переводу котлов на твердое шлакоудаление для конкретной ТЭС должны быть проведены модельные исследования топочной аэродинамики [3] и уточнены результаты оценочных тепловых расчетов с учетом конкретных марок сжигаемого топлива, величин поверхностей нагрева и т.п.

Перевод котлов на твердое шлакоудаление является положительным мероприятием, т.к. при этом снижается вероятность шлакования поверхностей пароперегревателя, особенно при возможном ухудшении качества угля, повышается надежность работы верхних трубных досок воздушного подогревателя и уменьшается температура уходящих газов. В настоящее время, например, на котлах ТП-87 с жидким шлакоудалением нередко происходят шлакование поверхностей и выбеги температур металла пароперегревателя сверх допустимых значений. Причем это происходит даже на котлах, на которых температура перегретого пара снижена до 545 °С в результате наращивания поверхности водяного экономайзера и вырезки части поверхности пароперегревателя.

При переводе котлов ТП-87 на ТШУ для обеспечения проектной температуры перегретого пара могут быть использованы отдельные или комбинации из следующих основных мероприятий:

- 1) повышение уровня расположения холодной воронки;
- 2) восстановление проектной поверхности нагрева пароперегревателя;
- 3) уменьшение поверхности нагрева водяного экономайзера до проектной;
- 4) уменьшение угла наклона комбинированных сопел по результатам модельных исследований аэродинамики топки;
- 5) отбор некоторой части насыщенного пара из барабана котла для использования его на собственные нужды ТЭС;
- 6) увеличение поверхности нагрева радиационного пароперегревателя.

Даже если использовать все указанные мероприятия при реконструкции котла ТП-87 с переводом на ТШУ можно не сомневаться, что они будут существенно менее затратны по сравнению со стоимостью

реализации традиционных методов сокращения удельных выбросов  $\text{NO}_x$  на котлах с жидким шлакоудалением. Дополнительным достоинством работы котла с ТШУ по предложенной технологии сжигания углей является возможность использования топлив с повышенной зольностью и влажностью при практическом сохранении экономичности.

При организации вывода шлака из холодной воронки котла в твердом виде и использовании технологии пневмомеханического шлакоудаления может произойти даже некоторое повышение КПД котла «брутто», в основном, за счет уменьшения потерь с теплом шлака и снижения содержания в нем горючих.

На рис. 3 представлена более простая компоновочная схема газомазутных и пылеугольных горелок, а также комбинированных сопел применительно к котлу ТП-87, на котором угольная пыль подается в топку по технологии пыли высокой концентрации (ПВК).

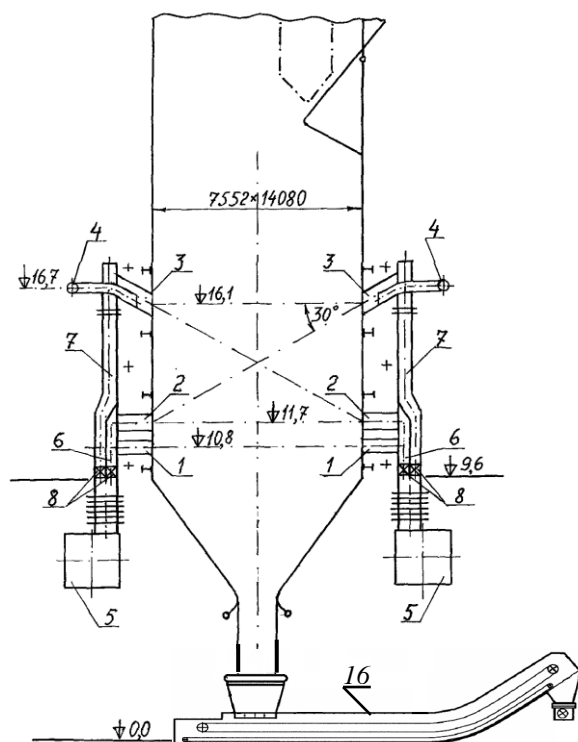


Рис. 3. Продольный разрез топki котла ТП-87 с твердым шлакоудалением:

1 — газомазутная горелка, 2 — пылеугольная горелка, 3 — комбинированное сопло, 4 — пылепровод сбросного воздуха  $\text{Ø } 377 \times 7$  мм, 5 — существующий воздушный коллектор, 6 — воздухопровод к горелкам, 7 — воздухопровод к комбинированным соплам, 8 — воздушный шибер, 9 — форсуночная труба, 10 — кольцевой горелочный коллектор природного газа, 11 — труба природного газа, 12 — труба пыли высокой концентрации, 13 — рассекатели из профиля уголкового типа, 14 — ось экранных труб, 15 — смотровая труба; 16 — установка пневмомеханического шлакоудаления.

Указанная технология подачи угольной пыли усугубляет проблемы раннего ее зажигания и пере-

мешивания с воздухом, т.к. начальный периметр зажигания в этом случае сравнительно мал. Особенно остро эта проблема проявляется на котлах, которые работают на угле с пониженной реакционной способностью, как кузнецкий уголь марки ТР [5]. Поэтому приведенное ниже обоснование предложенной технологии сжигания для котла ТП-87 направлено, в основном, на обеспечение интенсификации зажигания угольной пыли и ее перемешивания с воздухом.

В то же время именно подача угольной пыли по технологии ПВК дает дополнительные возможности снижения избытка первичного воздуха до уровня 0,1...0,15, что в процентном выражении оказывается меньше, чем содержание летучих на рабочую массу любой марки Кузнецкого угля. Это является гарантией существенного снижения образования топливных  $\text{NO}_x$ , поскольку согласно [6] интенсивность их образования пропорциональна квадрату избытка воздуха в зоне выхода летучих веществ. Предварительные расчеты образования  $\text{NO}_x$  в соответствии с [6] показали, что на выходе из реконструированного котла ТП-87 ТШУ концентрация  $\text{NO}_x$  не превысит  $300 \text{ мг/м}^3$ . Таким образом, произойдет снижение удельных выбросов  $\text{NO}_x$  в 4...5 раз по сравнению с котлами, работающими в режиме жидкого шлакоудаления.

В предложенной схеме использована аэродинамика встречно-смещенных струй горелок и сопел, размещенных по шесть на фронтальной и задней стенах топki напротив друг друга с горизонтальным шагом около 2200 мм, как и существующие горелки. Оптимальная аэродинамика встречно-смещенных струй обеспечивается за счет поворота осей горелок и сопел на 8,3 градуса, что успешно подтверждено при испытаниях после первого и второго этапов реконструкции котла ТП-87 (ст. №9) ЗСТЭЦ [3]. Газомазутные 1 и пылеугольные 2 горелки повернуты влево, а комбинированные сопла 3 — вправо. Крайние горелки и сопла попарно направлены параллельно боковым стенам топki для уменьшения наброса на них факела. Противоположный поворот предусмотрен для лучшего перемешивания топлива и воздуха (т.е. для интенсификации дожигания угля в зоне действия струй комбинированных сопел 3), а также для выравнивания скоростных полей сверху топki.

Как и в случае технологии, предложенной выше для котла П-50, в топке котла ТП-87 будет осуществляться принудительная эжекция, когда хвостовые объемы струй, вытекающих из горелок одной стены, подходят (с учетом инерционности пылинок) к корням струй горелок другой стены, эжектируются ими и поджигают их. Что касается перемешивания, то из теории турбулентных струй [7, 8] известно, что наибольшая ее интенсивность обеспечивается при встречно-смещенном движении струй. Важным вопросом для достижения желаемого эффекта является распределение угольной пыли по высоте прямо-

точной щелевой горелки. Возможны различные варианты решения этого вопроса.

Расчетные избытки / скорости воздуха (м/с) на выходе из горелок и сопел котла ТП-87 представлены ниже.

Топливо	уголь	прир. газ
Газомазутные горелки	0,49/39,6	0,41/31,6
Пылеугольные горелки	0,11/20,8	0,09/27,5
Комбинированные сопла	0,55/47,3	0,50/44,5
в т.ч. сбросные пылепроводы	0,25/30,5	0/0

Таким образом, на примерах предлагаемых технических решений по переводу на твердое шлакоудаление котлов типов П-50 и ТП-87 продемонстрированы возможные подходы для обеспечения надежной, экономичной и экологически эффективной их работы на угле с умеренной реакционной способностью (даже с повышенной зольностью и влажностью) и резервном топливе – природном газе.

При необходимости работы котлов на смеси указанных топлив должна осуществляться равномерная загрузка топki по ее ширине тем и другим топливом. На котле ТП-87 к расположенным друг напротив друга комбинированным соплам целесообразно подвести сбросные пылепроводы от мельниц А и Б, а по ширине топki осуществить поочередное подключение к соплам пылепроводов от той и другой мельницы.

## ВЫВОДЫ

1. На котлах П-50 и ТП-87 может быть осуществлена реконструкция топok по переводу их на режимы твердого шлакоудаления и ступенчатого сжигания с целью обеспечения снижения выбросов оксидов азота существенно ниже нормативных.
2. Основными работами при реконструкции являются: реализация новой компоновки и конструкции топочно-горелочных устройств, ликвидация пережима топочных стен, замена ошипованных и футерованных экранов на гладкотрубные, выполнение мероприятий по обеспечению температуры перегретого пара, выполнение холодной воронки и организация пневмомеханического шлакоудаления.
3. Комплексно эффективной является технология ступенчатого сжигания, реализованная за счет отдельной компоновки прямоточно-щелевых пылеугольных горелок, работающих при небольших избытках воздуха и умеренных скоростях истечения аэросмеси, и осесимметричных газомазутных горелок, выполняющих при сжигании угля функции сопел вторичного воздуха. При этом высокоскоростные воздушные струи газомазутных горелок образуют воздушную подушку, препятствующую выпадению несгоревшей угольной пыли в холодную воронку.
4. Дожигание горючих в летучей золе предлагается осуществить в зоне действия двенадцати высокоскоростных и движущихся с большим наклоном вниз струй из комбинированных сопел, размещенных равномерно на фронтальной и задней стенах на 3,5...4,5 м выше ПУГ. Каждое комбинированное сопло состоит из двух каналов, причем нижний из них предназначен для ввода сбросного, а верхний – третичного воздуха.
5. Дожигание горючих в шлаке и его охлаждение предлагается осуществить в установке пневмомеханического шлакоудаления с возвратом тепла в топку через холодную воронку котла. Кроме того, установка пневмомеханического шлакоудаления позволяет не только охладить шлак до отгрузочной температуры, но и измельчить его в соответствии с требованиями потребителей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Котлер В.Р., Штегман А.В.** Влияние технологии удаления шлака на вредные выбросы из энергетических котлов. / Сб. международного научно-практического семинара «Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование» под общей редакцией В.Я. Путилова, М., Издательский дом МЭИ, 2007, стр.46-50.
2. **Путилов В.Я., Путилова И.В.** Перспективные технологии шлакоудаления, стр. 174-180 в кн. Современные природоохранные технологии в электроэнергетике: Информационный сборник / Абрамов В.В. и др.; под общей редакцией В.Я. Путилова. — М.: Издательский дом МЭИ, 2007, 388 с.: ил.
3. **Архипов А.М., Соловьев Н.И. и др.** Эффективное снижение образования оксидов азота в топках котлов за счет аэродинамической оптимизации ступенчатого сжигания топлив, стр.101-123 в кн. Современные природоохранные технологии в электроэнергетике: Информационный сборник / Абрамов В.В. и др.; под общей редакцией В.Я. Путилова. — М.: Издательский дом МЭИ, 2007, 388 с.: ил.
4. **Тепловой** расчет котельных агрегатов (нормативный метод), «Энергия», М., 1973.
5. **Архипов А.М.** Возможные пути оптимизации ступенчатого сжигания угля с пониженным выходом летучих / Теплоэнергетика №1, 2009, стр. 60-62.
6. **Липов Ю.М., Третьяков Ю.М.** Методика теплового расчета топki и образования оксидов азота при ступенчатом сжигании топлива. — М.: Изд-во МЭИ, 1998 г.
7. **Абрамович Г.Н.** Теория турбулентных струй. Физматгиз, М., 1960.
8. **Исюмов М.А.** Компоновка и расчет горелочных устройств для сжигания топлива в системе встречно-смещенных струй.//Тр. МЭИ, 1972, стр. 103-111.

**О целесообразности** перевода котлов на режим твердого шлакоудаления при реконструкции ТЭС. А.М. Архипов, Ю.М. Липов, В.Я. Путилов и др. // Материалы II научно-практического семинара «Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование», Москва, 23–24 апреля 2009 г. — М.: Издательский дом МЭИ, 2009. С. 104 – 109.