

Increase of Ecological Safety, Reliability and Efficiency of Coal-Fired Boilers

Volkov E.P.,¹ Arkhipov A.M.,² Prokhorov V.B.,² Chernov S.L.²

¹Power Engineering Institute G.M. Krjijanovskogo, Moscow, Russia

²Moscow Power Engineering Institute (MPEI, National Research University),
Moscow, Russia

Abstract. The changes of environmental legislation of the Russian Federation will lead to a drastic increase of the ecological payments for environmental pollution in excess of technological standards. Significant excess in relative emissions of nitrogen oxides take place in burning solid fuel with liquid slag-tap removal. The purpose of this article was to develop technical solutions for low-cost reconstruction of the boilers to ensure efficient combustion of the fuel and technological standards of emissions of nitrogen oxides. As shown the use of straight-flow burners with compulsory optimization of the aerodynamics of the furnace and the organization of staged combustion of fuel will provide low nitrogen oxide emissions and efficient fuel combustion. Research on physical models has demonstrated the feasibility of increasing the angle of the pulverized coal burners down to 65-70°, and also achieved a more uniform distribution and increase the speed of the jets coming from upper and lower tertiary air vertical compartments of nozzles through the installation of the vertical extra sheets, which guide the flow in a space between jets. The results obtained allow the transfer of existing boilers with slag-tag removal to a solid with the installation of direct-flow burners and optimization of the aerodynamics of the furnace, which provides regulations for energy efficiency and ecological safety corresponding to the best, achieved technologies, and dramatically reduces environmental payments. The proposed technology in boiler BKZ-210-140F allowed reducing emissions of nitrogen oxides by more than 2 times when burning highly reactive Kuznetsk coal, as shown as an example.

Keywords: best available technologies, boilers, direct-flow burner, nitrogen oxides, coal burning.

Majorarea securității ecologice, fiabilității și eficienței cazanelor cu praf de cărbune

Volkov E.P.¹, Arkhipov A.M.², Prohorov V.², Chernov S.L.²

¹SAD Institutul de energetică în numele lui G.M. Krzhizhanovskii

Moscova, Federația Rusă

² Universitatea Națională de Cercetare „Institutul de Energetică din Moscova“

Moscova, Federația Rusă

Rezumat. În lucrare s-a demonstrat, că modificarea legislației privind mediu a Federației Ruse are ca urmare creșterea semnificativă a taxelor pentru poluarea mediului la depășirea normativelor tehnologice. Cea mai mare depășire a emisiilor specifice de oxizi de azot apar în timpul arderii în cazanele pe combustibil solid la evacuarea zgurii cu lichid. Pentru a asigura conformitatea cu standardele tehnologice și reducerea plățile de mediu se preconizează în anii următori reconstruirea unui număr mare de cazane ce necesită investiții semnificative. Scopul lucrării constă în a dezvolta o soluție tehnică low-cost pentru reconstrucția cazanului și asigurarea arderii eficiente și conformarea cu standardele tehnologice privind emisiile de oxizi de azot. S-a demonstrat, că pentru atingerea acestui scop cele mai eficiente se prezintă arzătoarele cu trecere directă cu optimizarea aerodinamică a focarului și implementarea arderii în trepte a combustibilului. Cercetările cu utilizarea modelelor fizice au demonstrat fezabilitatea creșterii unghiului de înclinare descendentă până la 65-70° pentru arzătoarele prafului de cărbune. Aceasta a asigurat o distribuție mai uniformă și creșterea vitezei fluxului din jeturi, care se formează de elementele din partea de sus și de jos alungite pe verticală a duzei de aer terțiar prin instalarea în compartimente a foilor suplimentare verticale, care direcționează fluxul în spațiu interrivulet. Utilizarea rezultatelor obținute în cazanele existente permit să se modifice tehnologia de îndepărtare lichidă a zgurii cu o tehnologie care nu utilizează lichidul. Prin aceasta se asigură corespunderea cerințelor standardelor de eficiența și siguranța ecologică, precum și reducerea semnificativă a plăților ecologice. S-au formulat prevederile de bază privind organizarea eficientă a arderii cu emisii reduse de oxizi de azot la aplicarea arzătoarelor cu curgere directă, inclusiv prin duze. Testarea soluției propuse s-a realizat cu utilizarea cazanului BKZ-210-140F. Rezultatele obținute a confirmat posibilitatea reducerii emisiilor de oxid de azot cu mai mult de 2 ori la arderea cărbunelui din bazinul Kuznetsk.

Cuvinte-cheie: tehnologie de ardere, praf de cărbune, cazan, cazan, arzător cu trecere directă, emisii, oxizi de azot.

**Повышение экологической безопасности, надёжности и экономичности пылеугольных котлов
Волков Э.П.¹, Архипов А.М.², Прохоров В.Б.², Чернов С.Л.²**

¹ОАО Энергетический институт имени Г.М. Кржижановского

²Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»
Москва, Россия

Аннотация. Показано, что изменения природоохранного законодательства РФ приведут к резкому возрастанию экологических платежей за загрязнение окружающей среды при превышении технологических нормативов. Наибольшие превышения по удельным выбросам оксидов азота имеют место при сжигании в котлах твердого топлива при жидком удалении шлака. Для обеспечения выполнения технологических нормативов и снижения экологических платежей в ближайшие годы предстоит реконструировать большое число котлов, что потребует значительных капитальных затрат. Целью настоящей статьи являлось разработка технических решений по малозатратной реконструкции котлов для обеспечения эффективного сжигания топлива и технологических нормативов выбросов оксидов азота. Показано, что применение прямоточных горелок с обязательной оптимизацией аэродинамики топки и организацией ступенчатого сжигания топлива позволяет обеспечить низкие выбросы оксидов азота и эффективное сжигание топлива. Исследования на физических моделях показали целесообразность увеличения угла наклона вниз пылеугольных горелок до 65-70°, а также было достигнуто более равномерное распределение и увеличение скорости струй, вытекающих из верхних и нижних вытянутых по вертикали отсеков сопел третичного воздуха за счет установки в отсеках вертикальных дополнительных листов, направляющих поток в межструйные пространства. Использование полученных результатов на действующих котлах позволяют осуществить перевод котлов с жидкого шлакоудаления на твердое с установкой прямоточных горелок и при оптимизации аэродинамики топки, что обеспечивает нормативы по эффективности и экологической безопасности, соответствующие наилучшим достигнутым технологиям, и резко сокращает экологические платежи. Сформулированы основные положения для организации эффективного сжигания топлива с низкими выбросами оксидов азота при применении прямоточных горелок и сопел. В качестве примера показано, что применение предлагаемой технологии на котле БКЗ-210-140Ф позволило снизить выбросы оксидов азота более чем в 2 раза при сжигании высокорекреационного кузнецкого угля.

Ключевые слова: наилучшие доступные технологии, котлы, прямоточные горелки, оксиды азота, сжигание угля.

Введение

В 2014 году произошли значительные изменения в природоохранном законодательстве Российской Федерации [1], которые предполагают переход от санитарно-гигиенических нормативов к техническим и технологическим. Целью этих изменений является улучшение экологической ситуации в стране за счет внедрения наилучших доступных технологий (НДТ) на промышленных предприятиях, создании условий, при которых предприятия будут экономически заинтересованы в модернизации и строительстве нового оборудования с показателями по энергоэффективности и экологической безопасности, соответствующими лучшим мировым образцам. До настоящего времени тепловые электростанции не были экономически заинтересованы во внедрении природоохранных мероприятий, так как затраты на внедрение значительно превосходили величину снижения платы за загрязнение окружающей среды.

I. ИЗМЕНЕНИЕ ПРИРОДООХРАННОГО ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА РФ

По новому природоохранному законодательству резко увеличиваются платежи за превышение технологических нормативов за загрязнение окружающей среды. Плата за выбросы, превышающие технологические нормативы, будет соизмерима с затратами на внедрение НДТ. С другой стороны, при внедрении НДТ и при обеспечении технологических нормативов предприятия будут освобождаться от платежей за загрязнение окружающей среды вплоть до компенсации затрат на внедрение. Это должно привести к экономической заинтересованности промышленных предприятий к внедрению НДТ и обеспечению технологических нормативов по охране окружающей среды.

Полностью новое природоохранное законодательство вступит в действие в 2020 году и к этому сроку должны быть разработаны новые нормативные документы.

Для каждой отрасли народного хозяйства должны быть разработаны справочники по Наилучшим доступным технологиям, разработаны и утверждены новые технологические нормативы по удельным выбросам, сбросам и отходам производства, а также другие нормативные материалы.

По действующему законодательству плата за выбросы вредных веществ рассчитывается в зависимости от концентрации вредных веществ в приземном слое атмосферы и никак не связана с выполнением технологических нормативов, т.е. если приземные концентрации вредного вещества не превышают предельно допустимые концентрации (ПДК), то считается, что предприятие укладывается в норматив и плата за выбросы вредных веществ рассчитывается с коэффициентом равным 1. На большинстве тепловых электростанций РФ установлены высотные дымовые трубы, что позволяет обеспечить приземные концентрации вредных веществ ниже ПДК и экологические платежи за выбросы вредных веществ в атмосферу являются минимальными. Поэтому внедрение даже малозатратных природоохранных мероприятий в настоящее время в большинстве случаев не окупается и предприятия экономически не заинтересованы в снижении выбросов вредных веществ в атмосферу.

Действующие технологические нормативы по удельным выбросам вредных веществ для котельных установок приведены в ГОСТ Р 50831-95 [2], где установлены нормативы удельных выбросов основных вредных веществ. Технологические нормативы по удельным выбросам оксидов азота на многих ТЭС не выполняются, поэтому с вводом в действие нового природоохранного законодательства могут резко возрасти экологические платежи за выбросы. Плата за выбросы вредных веществ, превышающих технологический норматив, по новому природоохранному законодательству будет рассчитываться с коэффициентом 100. Особенно сильно превышают технологические нормативы по удельным выбросам оксидов азота котлы, сжигающие твердое топливо, а наибольшие превышения имеют место при жидком удалении шлака (ЖШУ). Концентрация оксидов азота в дымовых газах котлов, работающих с жидким удалением шлака, обычно составляет 1200 – 1900 мг/м³, что в два-три раза превышает технологический норматив.

II. ОРГАНИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА

Для обеспечения выполнения технологических нормативов и снижения экологических платежей в ближайшие годы предстоит реконструировать большое число котлов, что потребует значительных капитальных затрат.

Основные теоретические подходы к решению задач эффективного сжигания топлива изложены в [3]. Моделирование процессов сжигания пылеугольного топлива как отдельно, так и в смеси с другим видом топлива приводится в [4-6]. Результаты моделирования топочных процессов конкретных котлов приведены в [7-8]. Методы моделирования процессов образования оксидов азота в топках котлов нашли отражение в работах [9-12].

В МЭИ накоплен большой опыт малозатратной реконструкции газомазутных и пылеугольных котлов с целью улучшения комплексных показателей их работы при применении прямоточных горелок и сопел, при этом уделялось первостепенное внимание обеспечению экологической безопасности котельного оборудования [13]. Прямоточные горелки позволяют эффективно и надежно сжигать твердое топливо только при организации эффективного взаимодействия горелочных и воздушных струй в объеме топочной камеры. В работах МЭИ оптимизация аэродинамики топки котлов проводилась на основании проведения исследований на физических и математических моделях топок котлов.

Для обеспечения эффективного сжигания топлива с низкими выбросами оксидов азота нами были установлены основные условия, которые необходимо обеспечить при применении прямоточных горелок и сопел:

1. Принятие минимального избытка первичного воздуха, задержка подмешивания к факелу вторичного воздуха и подача третичного воздуха на завершающем этапе горения в хвостовую часть факела. Обеспечение внутренней рециркуляции горячих топочных газов в корнях струй горелок и сопел. Это позволяет организовать ступенчатое сжигание топлива, обеспечивает быстрый его прогрев и раннее зажигание.

2. Значительный наклон пылеугольных горелок вниз, что позволяет увеличить время нахождения топлива в топочной камере и увеличить периметр зажигания. Увеличению периметра зажигания также может способствовать выполнение горелок вытянутой по

вертикали прямоугольной формы. Эти меры позволяют снизить недожог топлива, а также способствуют раннему зажиганию топлива и надежному его сжиганию.

3. Рассредоточение ядра факела по ширине, глубине и высоте топки. В объеме топки создается большое количество вихрей, вращающихся в противоположных направлениях, что способствует выравниваю температуры в объеме топки, снижению максимальной температуры и хорошему перемешиванию продуктов сгорания.

4. Исключение зон повышенного динамического давления факела с восстановительной средой на экранные трубы, что наряду с понижением температурного уровня снижает вероятность возникновения сероводородной коррозии и возможности шлакования экранов.

III. ПРИМЕРЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЛОЖЕНИЙ

Выполнение большинства указанных требований обеспечивает надежное, эффективное сжигание топлива с низкими удельными выбросами оксидов азота. Для подтверждения вышеизложенного приведем технические решения и результаты реконструкции котлов типа БКЗ-210-140 ФД (ст. №№ 1-4) и БКЗ-210-140Ф (ст. № 5) ОАО «Западно-Сибирская ТЭЦ».

Эти котлы до реконструкции были снабжены 6 пылегазозамутными вихревыми горелками улиточного типа, установленными по три на боковых стенах топки по схеме треугольника с вершиной внизу, причем верхние горелки имели отметку 10,7 м, а нижние — 9,8 м. Угольная пыль подавалась по кольцевому каналу прямоотком сбросным агентом пылесистем. Буферное (и растопочное) топливо — коксовый газ вводился в топку через кольцевой канал меньшего диаметра. По оси горелок были установлены форсунки парового распыла мазута, который является резервно-аварийным топливом. Основное буферное топливо — доменный газ и значительная часть воздуха подавались через четыре пятищелевые горелки доменного газа, установленные на отметке 10,5 м фронтальной стены топки котлов БКЗ-210-10ФД.

Определяющий недостаток исходной технологии сжигания — ввод в топочный объем разных видов топлива и воздуха во взаимно перпендикулярных плоскостях при сравнительно невысокой топке. В случаях сжигания промпродукта и окисленных кузнечных углей зажигание было неустойчивым, особенно в режимах с малой долей буферного коксового газа (имели место случаи погасания факела даже на средних нагрузках котла, порядка 170-180 т/ч). Факел затягивался в горизонтальный газход, происходило шлакование пароперегревателя и неконтролируемый рост температуры металла его труб выше нормативных значений, особенно в центральной зоне пароперегревателя. Содержание горючих в уносе, при больших долях сжигания доменного газа, нередко превышало 25 – 30 %. Котлы работали с повышенным удельным выбросом оксидов азота (до 800 – 850 мг/м³ при существующем нормативе 470 мг/м³).

Положение кардинально улучшилось после реконструкции указанных котлов с внедрением технологии трехступенчатого сжигания топлив в U-образном прямооточновихревом факеле. Суть технологии заключается в следующем. Восемь прямооточных горелок, представляющих собою прямоугольные сопла для ввода аэросмеси, были установлены на отметке 16,35 м фронтальной стены топки с наклоном вниз на 53° и размещены попарно над каждой горелкой доменного газа. На отметке 14,5 м задней стены соосно горелкам были установлены прямоугольные сопла третичного дутья, направленные горизонтально. Две трубки коксового газа Ø 76 мм и форсуночная труба были размещены под корпусом каждой горелки и направлены под небольшим углом к ее геометрической оси в вертикальной проекции.

На котле № 5 (БКЗ-210-140Ф) вместо отсутствующих горелок доменного газа были установлены в одних вертикальных плоскостях с горелками и соплами, имеющими на этом котле равномерный горизонтальный шаг, 8 сопел вторичного воздуха. Отметка их расположения составила 9,75 м при направлении осей сопел с наклоном вверх на 10°. Пылеугольные горелки были наклонены вниз на угол 65°.

Технологию сжигания на реконструированном котле № 5 можно охарактеризовать следующим образом.

Пылеугольная струя, вытекающая в топку со скоростью порядка 27 – 35 м/с при $\alpha_1 = 0,25 - 0,3$ надежно загорается на расстоянии не более 0,3 – 0,4 м (даже без подсветки коксовым газом и при уменьшении содержания летучих в угле). Этому способствуют повышенный (с учетом косога среза горелок) начальный периметр эжекции топочных газов, отсутствие экранирования струй аэросмеси вторичным воздухом и направление скорости свежей струи с наклоном вниз. На участке в 5 – 6 м (до встречи с вторичным воздухом, поступающим в топку из сопл вторичного воздуха) загоревшая пыль движется в условиях острой нехватки кислорода. На указанном пути происходит подавление образования топливных NO_x за счет восстановления оксидов азота продуктами недожога с образованием молекулярного азота.

Поток вторичного воздуха с $\alpha_2 = 0,55 - 0,60$ подмешивается к горящему факелу и движется вместе с ним к заднему экрану топки и вдоль него вверх, создавая подушку, препятствующую выпадению несгоревшей угольной пыли в холодную воронку, а также эрозионному и тепловому воздействию факела на задний экран. Подъемная ветвь факела взаимодействует со струями третичного дутья и отклоняется ими к фронтальному экрану топки, догорая за счет использования кислорода, содержащегося в третичном воздухе.

Часть хвостовых объемов факела вовлекается во 2-ой оборот вихря, повторно

двигаясь вниз (рис. 1а). До 25 – 30 % хвостовых частей струй третичного воздуха (в смеси с топочными газами) эжектируется корнями горелочных струй и также направляется в нижнюю часть топки (рис. 1 в, 1 г). Указанные особенности вихревой аэродинамики представлены в полном объеме на рис. 1 а, б, в, г, на которых можно видеть характер движения струй, зафиксированный при продувках на изотермической физической модели топки. Модель была изготовлена применительно к котлу № 5 по методике МЭИ [13].

Модельные исследования показали целесообразность увеличения угла наклона вниз пылеугольных горелок до 65 – 70° и выполнения равномерного горизонтального шага при размещении горелок и сопл. Кроме того, при наладке котла (на основе результатов повторных продувки модели) было оптимизировано движение струй, вытекающих из верхних и нижних вытянутых по вертикали отсеков сопл третичного воздуха. За счет установки в отсеках вертикальных направляющих листов было обеспечено увеличение скорости истечения струй с направлением их в межструйные пространства. В результате топочная аэродинамика факела оптимизировалась, в частности, был ликвидирован вынос вверх недожженной угольной пыли из корней горелочных струй хвостовыми массами струй третичного воздуха.

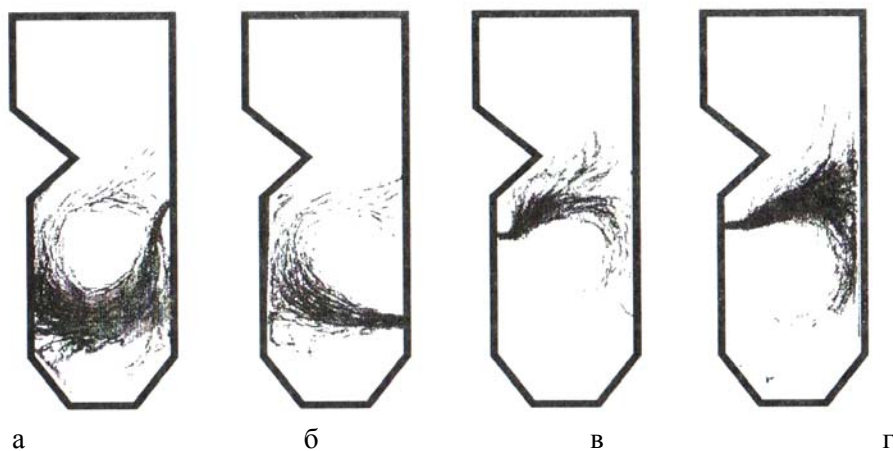


Рис.1. Характер движения в изотермической модели: а – горелочной струи; б – струи вторичного воздуха; в, г - струй, вытекающих из нижнего и верхнего отсеков сопл третичного воздуха.

Надежное зажигание угольной пыли, удлиненная траектория движения факела при трехстадийном вводе в него воздуха способствуют выравниванию температуры факела по высоте топки и своевременному дожиганию пыли. На рис. 2а приведены результаты пирометрии факела на котле № 5 при нагрузке 212 т/ч, расходе коксового газа около 2000 м³/ч, работе двух пылесистем и избытке воздуха за пароперегревателем $\alpha_{\text{пп}} = 1,275$.

Можно видеть, что зафиксированные температуры не сильно отличаются друг от друга по высоте топки. В районе лазов, расположенных в холодной воронке на отметке 7,6 м, температура составила 1200 – 1230 °С, а на отметке 19,6 м (напротив ширм, в районе фронтальных лючков) она имеет значения 1220 – 1240 °С. В диапазоне отметок 10,7 – 14,2 м температура факела у задней стены на 60 – 70 °С выше, чем у фронтальной, что свидетельствует о смещении U-образного факела во второй ступени горения к задней стене топки. Однако эта особенность аэродинамики не приводила к шлакованию заднего экрана.

На рис. 2б представлены экспериментальные зависимости основных показателей работы реконструированного котла № 5 от избытка воздуха за пароперегревателем $\alpha_{\text{пп}}$ при нагрузке 175 – 214 т/ч и тепловой доле коксового газа около 2 %. Можно видеть, что при эксплуатационном $\alpha_{\text{пп}} = 1,25 – 1,3$ удельный выброс оксидов азота $C_{\text{NO}_x} = 360 – 370$ мг/м³, мехнедожог $q_4 = 0,95 – 1,0$ %, а КПД котла «брутто» $\eta_{\text{бр}} = 91,7$ %. До реконструкции котла № 5 указанные параметры имели следующие значения: $C_{\text{NO}_x} = 800 – 850$ мг/м³, $q_4 = 2,0 – 2,5$ %, $\eta_{\text{бр}} = 88,5 – 890$ %.

Во время испытаний котла качество угля до и после реконструкции было примерно одинаковым со следующими средними значениями параметров: $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 4983$ ккал/кг; $W^{\text{р}} = 6,9$ %; $A^{\text{р}} = 26$ %; $V^{\text{р}} = 42,8$ %; $N^{\text{р}} = 2,5$ %. Сжигание буферного коксового газа составляло около 2 % по теплу.

Таким образом, можно сделать вывод, что в результате реконструкции котла №5 параметры его работы стали соответствовать критериям наилучших достигнутых технологий сжигания высокорекреационного кузнецкого угля:

концентрация $C_{\text{NO}_x} = 360 – 370$ мг/м³ (при существующем нормативе 470 мг/м³), $q_4 = 0,95 – 1,0$ % (при нормативе 1,5 % [14]), $\eta_{\text{бр}} = 91,7$ % (что отвечает расчетному показателю). При этом обеспечены бесшлаковочная работа экранов топки и пароперегревателя с допустимыми и стабильными температурами металла.

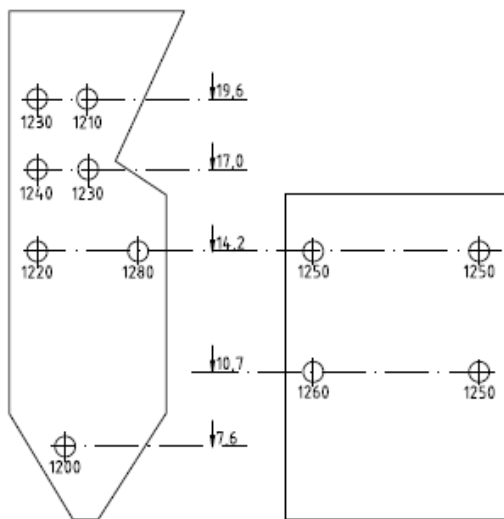
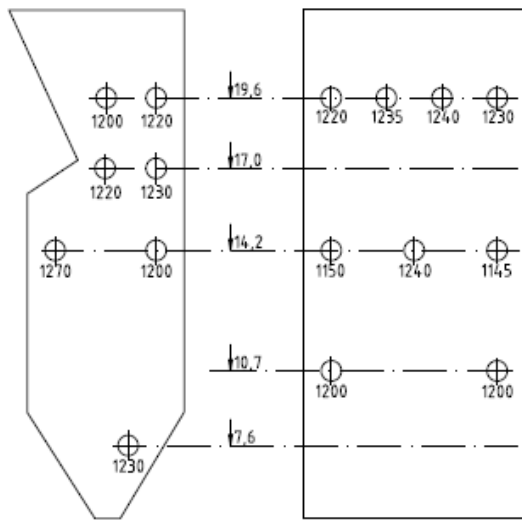
Работа котлов БКЗ-210-140ФД (ст. №№ 1 – 4) также существенно улучшилась после их реконструкции: удельный выброс оксидов азота уменьшился на 40-50% и составил 380 – 400 мг/м³, шлакование пароперегревателя прекратилось, а минимальная нагрузка котлов по условию обеспечения надежности пылеугольного факела без его подсветки мазутом, коксовым и доменным газами составила 140 т/ч, вместо исходной 170 т/ч.

В то же время не удалось сократить мехнедожог менее 2% (при нормативе 1,5%) по причине присутствия в топке громоздких и малоэффективных горелок доменного газа. В техническом задании на разработку мероприятий по реконструкции топочных устройств предусматривалось, что они должны быть малозатратными. Реконструктивные работы (в том числе изготовление горелок) осуществлялись Новокузнецким ремонтно-механическим предприятием под авторским контролем МЭИ.

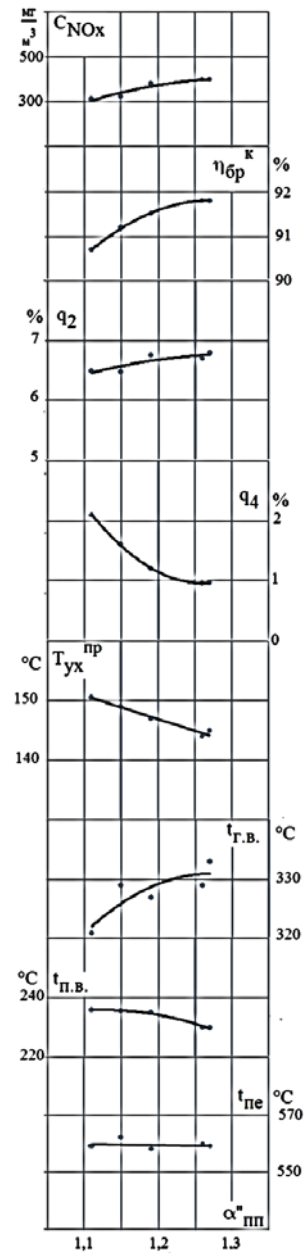
Целесообразно упомянуть о разработках МЭИ, связанных с успешной реконструкцией 4 котлов К-50-14-250 котельной г. Таштагол Кемеровской области. Котлы были снабжены 4 вихревыми горелками улиточного типа с периферийной подачей вторичного воздуха, установленными по две на боковых стенах топки. Основным топливом на этих котлах является высокорекреационный кузнецкий уголь, а растопочным – мазут. Недостатки работы указанных котлов заключались в повышенном содержании горючих в золе уноса (до 25 %) при значительных присосах холодного воздуха в газовый тракт на участке: топка-пароперегреватель, достигающих 30-35 %. Работа котлов характеризовалась высоким уровнем удельного выброса NO_x в атмосферу (до 800 мг/м³) и недостаточной маневренностью из-за высокой минимальной нагрузки без подсветки

пылеугольного факела мазутом по условию его стабильности (она составляла 30 – 32

т/ч при $D_{\text{ном}} = 50$ т/ч.).



а



б

Рис.2. Пирометрическая температура факела (а) и параметры работы реконструированного котла БКЗ-210-140Ф (ст. №5) в зависимости от избытка воздуха за пароперегревателем (б).

В процессе реконструкции среднеходовые валковые мельницы были подключены ко всем четырем прямоточным горелкам. Горелки были установлены на повышенных отметках боковых стен топки (по две) с существенным наклоном вниз. Ввиду поисков оптимальных решений имело место различие в компоновочных схемах и деталях конструкции горелок и

сопл на отдельных котлах [5]. Вместе с тем на всех реконструированных котлах горелки и сопла одноименных наименований были установлены на боковых стенах топок по встречно-смещенной схеме.

После осуществления наладочных мероприятий по горелкам и соплам с уменьшением их выходных сечений на

котле №3 были получены наилучшие показатели по маневренности и экономичности его работы. Так, минимальная нагрузка котла составила 19 – 20 т/ч, а мехнедожог не превысил 0,3 – 0,5 % в диапазоне нагрузок 20 – 50 т/ч (рис. 3). Следует отметить, что на реконструированных котлах К-50-14-250 наряду с реконструкцией топочных устройств была увеличена в 2 раза поверхность нагрева 2 ступени водяного экономайзера, из-за чего снизилась температура горячего воздуха (при нагрузке 20 т/ч она составила всего 250°C). Однако даже в этих условиях, когда температура аэросмеси была невысокой и составляла

порядка 65°C, мехнедожог не превысил 0,3%.

Приведенный на рис. 3 сравнительно высокий уровень удельного выброса NO_x ($C_{\text{nox}} = 515 \text{ мг/м}^3$ при $D = 50 \text{ т/ч}$) можно объяснить повышенным избытком первичного воздуха (порядка 0,45 – с учетом нерасчетных присосов воздуха в мельницы). Для уменьшения удельного выброса NO_x до нормативного уровня (470 мг/м^3) и допустимой в условиях прямого вдувания температуры аэросмеси вплоть до 170°C [15] целесообразно перейти на использование газовой сушилки угольной пыли в мельницах, что обеспечит выполнение технологических нормативов.

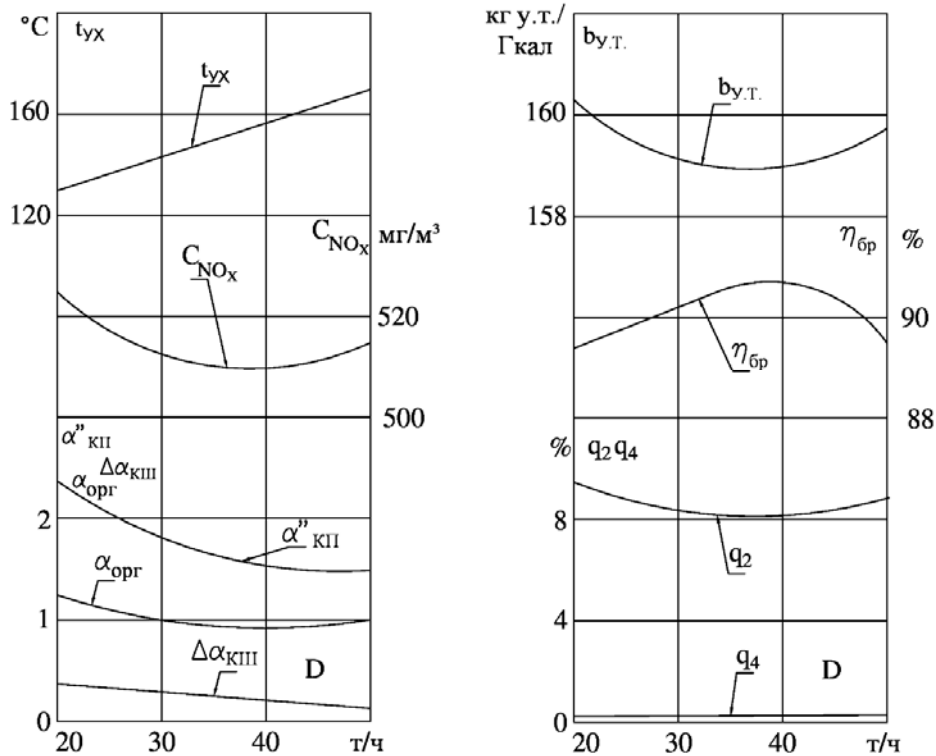


Рис.3. Показатели работы реконструированного котла № 3 в диапазоне нагрузок 20-50 т/ч.

Заключение

1. На многих ТЭС не выполняются технологические нормативы по удельным выбросам оксидов азота, что по новому природоохранному законодательству РФ приведет к резкому увеличению платы за выбросы вредных веществ. Особенно сильно превышаются технологические нормативы при сжигании твердого топлива и при жидком удалении шлака.

2. Для выполнения технологических нормативов и снижения экологических платежей потребуется реконструкция большого числа котлов. В МЭИ накоплен большой опыт малозатратной реконструкции котлов с целью улучшения комплексных показателей их работы при применении прямоточных горелок и сопел.

3. Показано, что при оптимизации аэродинамики топочной камеры, которая

осуществляется с помощью проведения исследований на физических и математических моделях, применение прямоточных горелок и сопел позволяет обеспечить эффективное и надежное сжигание топлива с низким уровнем выбросов оксидов азота. Предлагаемую технологию сжигания топлива можно отнести к наиболее доступным технологиям, так как она при относительно невысоких финансовых затратах на реконструкцию котлов позволяет обеспечить выполнение технологических нормативов по выбросам NO_x.

Литература (References)

- [1] Federal'nyi zakon №219, 22.07.2014
 О vnesenii izmeneniy v Federal'nyi zakon «Ob okhrane okruzhayushchey sredy» i otdel'nye zakonodatel'nye akty RF [On amendments to the Federal law “About environmental protection” and separate legislative acts of the Russian Federation. Law of the Russian Federation no 219]. Moscow 22.07.2014.
- [2] GOST R 50831-1995 Ustanovki kotel'nye. Teplomekhanicheskoe oborudovanie. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya [State standard R 50831-95. Boiler plants. Heat-mecanical equipment. General technical requirements]. Moscow, 1995. 14 p.
- [3] Spalding D.B. *Combustion and mass transfer*. Oxford: Pergamon Press, 1979. 352 p.
- [4] Jones J.M., Pourkashanian M., Williams A., Chakraborty R.K., Sykes Y., Laurence D. Modelling of coal combustion Process – a review of present status and future needs. *Proceedings 15-th Annual International Pittsburg Coal Conference*, Pittsburg, PA, USA, 1998, pp.1-20.
- [5] Di Nola G., de Yong W., Spliethoff H. TG-FTYR characterization of coal and biomass single fuels and blends under slow heating rate conditions: partitioning of the fuel bound nitrogen. *Fuel Process. Technol.* 2010, no. 91, pp.103-115.
- [6] Ma L., Gharebaghi M., Porter R., Pourkashanian M., Jones J.M., Williams A. Modelling methods for co-fired fuel furnaces. *Fuel*. 2009, no. 88, pp. 2448-2454.
- [7] Knaus H., Schnell U. Hein K.R.G. On the modeling of coal combustion in a 550 MW coal-fiered utility boiler. *International Journal of Progress in Compputational Fluid Daynamics*, 2001, no. 1, pp. 194-207
- [8] Yin C., Caillat S., Harion J.R., Dandonin B., Perez E. Investigation of the flow, combustion, heat-transfer and emission from a 609 MW utility tangentially fired pulverized coal boiler. *Fuel*, 2002, no. 8, pp. 997-100.
- [9] Alvarez L., Charebagh M., Jones J.M., Pourkashanian M, Williams A, Riaza J, et. al. Numerical investigation of NO emissions from an entrained flow reactor under oxycoal conditions. *Fuel Process. Technol.*, 2012, no. 93, pp. 53-64.
- [10] Cao H., Sun S., Liu Y., Wall T.F. Computational fluid dynamics modeling of NO_x reduction mechanism in oxi-fuel combustion. *Energy Fuels*, 2010, no. 24, pp.131-135.
- [11] Darwell Li, Ma L., Jones J.M., Pourkashanian M. Williams A. Some aspects of modeling NO_x formation arising from the combustion of 100% wood in a pulverized fuel furnace. *Combustion Science and Technology*, 2014, no.186 (4-5), pp. 672-683.

¹Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10463)

Сведения об авторах.



Волков Эдуард Петрович
 Академик РАН, доктор технических наук. Область научных интересов: энергетика, горение, пиролиз и газификация топлива, природоохранные технологии, моделирование. E-mail: volkov@eninnet.ru



Архипов Александр Михайлович
 Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник кафедры ТЭС (НИУ «МЭИ»). Область научных интересов: теплоэнергетика, котельные установки, топочная аэродинамика. E-mail: almiar16@yandex.ru



Прохоров Вадим Борисович
 Кандидат технических наук, профессор кафедры ТЭС МЭИ. Область научных интересов: теплоэнергетика, котельные установки, аэродинамика горения, охрана окружающей среды, моделирование, E-mail: ProkhorovVB@mpei.ru



Чернов Сергей Львович
 Кандидат технических наук, доцент кафедры ТЭС Московского энергетического института (НИУ «МЭИ»). Область научных интересов: теплоэнергетика, теплотехника, струйные и вихревые течения. E-mail: chernovSL@yandex.ru