УДК 621.9:621.048

О ПРОБЛЕМЕ ПОДАВЛЕНИЯ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА НА УГОЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ ПОСТСОВЕТСКИХ СТРАН

Потапов В.Н., Костюнин В.В.

ООО «Вихревые системы», Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

На базе анализа опасности токсичных веществ, выбрасываемых в атмосферу котлами тепловых электростанций (ТЭС) на разных углях, уточнены изменения всей концепции ТЭС и роль подавления выбросов оксидов азота в решении экологических проблем. Рассмотрены некоторые аэродинамические проблемы закрученных потоков при создании новых горелок для экологически чистого сжигания углей.

ВВЕДЕНИЕ

При планировании электростанций для новой энергетики и при разработке мер для модернизации существующих ТЭС следует выбирать только лишь комплексные технологии, реально обеспечивающие радикальное улучшение базовых экономических и экологических показателей ТЭС на перспективу, разумеется, и с учетом защиты климата. При этом следует основательно уточнить и твердо проводить политику, рассчитанную не только на решение наиболее острых текущих технологических или экономических задач, но и на достаточно дальнюю перспективу - на решение ключевых экологических проблем энергетики. При такой стратегии проблема подавления на ТЭС выбросов оксидов азота NO_x угольными котлами, многие годы считавшаяся, да и по сей день часто и считающейся чуть ли не самой важной у инженеров советской и постсоветской эпохи, окажется не только второстепенной по своей значимости для повышения общей экологической безопасности ТЭС и ее конкурентоспособности на рынках вторичной энергии. Причем одновременно становятся бесперспективными и неэффективными большинство самых популярных сегодня приемов для подавления NO_x при сжигании, прежде всего твердых топлив, а основные конструкции топочно-горелочных устройств, разработанных в советскую эпоху, оказываются совершенно неприемлемыми для реализации самых эффективных современных и, тем более, перспективных схем сжигания углей.

ОБЩИЙ ВЗГЛЯД НА ПРОБЛЕМУ

Токсичность основных вредных или опасных веществ в продуктах сгорания котлов, сжигающих различные виды твердых топлив можно принять обратно пропорциональной установленным ПДК в приземном слое атмосферного воздуха. Опасность этих веществ, например, в рамках их номенклатуры в действующих стандартах стран Евросоюза (ЕС), можно показать в виде простой линейки, в порядке возрастания опасности основных веществ, выбросы которых подлежат контролю и ограничению. В самом простом виде такая линейка опасности будет выглядеть следующим образом:

$CO < SO_x < NO_x < HCl < HF <$ условно,
тяжелые металлы $< Tl, Hg, < C_{20}H_{12} <<<<<$
диоксины

Каждый знак **<** означает возрастание опасности вещества или их группы примерно на порядок. Что касается диоксинов, то для большинства мощных котлов с хорошей настройкой и автоматизацией процессов горения, их можно проигнорировать. Но проблема выбросов *HF, HCl, Tl, Hg,* и, условно, тяжелых металлов, а также, конечно, канцерогенов группы $C_{20}H_{12}$, далее уже не может игнорироваться. Обычные уловки с прямым умолчанием выбросов этих веществ по причине их малой доли в валовой массе всех выбросов котлов ТЭС считаем далее недопустимыми. Отметим, что большинство этих веществ, кроме $C_{20}H_{12}$, почти на 100% удаляются на современных угольных ТЭС внедрением самых эффективных технологий мокро - известняковой сероочистки (МИСО), наряду с использованием эффективных золоуловителей, конечно, со сбросом очищенных холодных газов через современные градирни и с очень глубокой утилизацией теплоты очищаемых продуктов сгорания и превращением до 90% известняка, вводимого в систему МИСО, в гипс, причем обязательно товарного качества. Что касается снижения выбросов Tl или Hg, то их также можно снизить в МИСО, хотя и в меньшей мере.

© Потапов В.Н., Костюнин В.В.

При этом правильный выбор типа МИСО и схемы ее включения в тепловую схему ТЭС уже является для самой современной ТЭС системообразующим фактором, от которого далее зависит оптимальная мощность энергоблоков, их количество, система технического водоснабжения и комбинированной выработки для коммерческих рынков двух видов энергии (электричества и теплоты). Тип и схема МИСО влияет на компоновку главного корпуса и даже на наличие на ТЭС дымовых труб.

Выбор эффективного интегрального комплекса всех технологий подавления NO_x золоулавливания и сероочистки будет необходим и на следующем этапе развития всей концепции ТЭС, например, при внедрении промывки дымовых газов аминами или, тем более, при внедрении технологий типа “clean coal” с тем или иным способом «отсечения» CO_2 от уже очищенных дымовых газов или в самой схеме переработки или сжигания твердого топлива.

После реализации всех перечисленных, на наш взгляд, первоочередных мер (по внедрению МИСО и сопутствующих технологий), и следует, наконец, решать задачу радикального подавления выбросов NO_x и, конечно, только одновременно, в прямой связке с принятыми технологиями золоулавливания и МИСО. При этом одновременно и обязательно следует решить проблему радикального снижения выбросов гораздо более токсичной, чем NO_x группы продуктов неполноты сгорания топлива, для простоты - суммы CO и $C_{20}H_{12}$. Все эти решения в комплексе, конечно, будут влиять на пластичность работы ТЭС на разные сегменты рынка электрической энергии.

Радикальное снижение выбросов NO_x до уровня современных требований стандартов ЕС или ряда городов стран ЕС одними лишь схемами двух- или трехстадийного сжигания считаем невозможным, а переход постсоветских стран, хотя бы европейских, на такие же стандарты, как в ЕС, рано или поздно совершенно неизбежен. Но при таком развитии все ТЭС постсоветских стран неконкурентоспособны, и это нанесет непоправимый ущерб экономикам этих стран. На наш взгляд, не решит эту проблему и внедрение любых технологий низкотемпературного сжигания в топках ЦКС или КС, использование которых выявит на ТЭС еще одну новую тяжелую экологическую проблему, связанную с утилизацией шлаков, содержащих большие объемы химически активных веществ из-за содержания в шлаках как активных Ca или Mg, так и вместе с ними всех иных токсичных веществ исходной минеральной части топлива. Очевидно, что за рядом исключений схемы сжигания ЦКС и КС недостаточно снижают концентрации в дымовых газах NO_x и оксидов серы (SO_2) и, тем более, не устраняют выбросы других, на порядки более опасных кислот - HF и HCl. Если ориентироваться даже только лишь на современные нормы концентраций NO_x и других загрязнителей дымовых газов, принятые в странах ЕС и в ряде городов ЕС, то все перечисленные нами технологии сжигания углей уже сегодня не удовлетворяют современным требованиям, и при их внедрении рано или поздно потребуют установки дополнительных дорогих систем доочистки газов. А существенное снижение КПД нетто котлов ТЭС при использовании известных низкотемпературных технологий (особенно топок ЦКС и КС) по сравнению с современными топками факельного сжигания приведет к существенного постоянному перерасходу топлива в эксплуатации ТЭС, что повысит выбросы CO_2.

Из всех вредных выбросов наименее токсичен CO. Но объемы его выбросов на котлах советской постройки, топками КС, ЦКС или иными топками (с холодными вихрями) могут быть на порядки выше, чем объемы выбросов NO_x. Считаем, что проблеме выбросов NO_x в последние 30-40 лет оказано непропорционально большое внимание в постсоветских странах при отсутствии на ТЭС этих стран систем МИСО и схем глубокой утилизации низкопотенциальной теплоты дымовых газов, часто вместе с недостаточным улавливанием золы.

Указать оптимальное соотношение выбросов NO_x и CO для условий разных ТЭС затруднено и различно у разных топок, а российские стандарты на котлы, например, в отличие от стран Евросоюза, пока не требуют постоянного инструментального контроля концентраций CO в дымовых газах. Бесконтрольные выбросы CO реально могут быть гораздо опаснее, чем умеренные выбросы NO_x. Высокие концентрации CO в продуктах сгорания определенно могут указывать на неконтролируемое увеличенное, даже на порядки, содержание в них сверхопасных ПАУ типа $C_{20}H_{12}$. С этих позиций следует с большой осторожностью относиться к технологиям низкотемпературного сжигания, даже к таким, уже достаточно хорошо отработанным, как КС, ЦКС или ВИР, прежде всего при оценке их перспектив внедрения на мощных паровых котлах как новых, так и старых ТЭС.

ПЕРСПЕКТИВНЫЙ СПОСОБ СЖИГАНИЯ И ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ

Лучший на сегодня способ сжигания топлив на котлах ТЭС для нас пока очевиден – это, конечно, только факельное сжигание угольной пыли, но по современным и экологически самым безопасным схемам. Способ этот в мире называют различно: нестехиометрическим сжиганием или ступенчатым вводом воздуха, иногда двухзонным сжиганием (не путать с банальным двухстадийным сжиганием). Иначе, это стадийное, а точнее - многостадийное сжигание топлив в восстановительной атмосфере (обозначим далее как СВА). В мире пока нет иных реально коммерчески пригодных схем сжигания, позволивших достичь на практике тех же уровней экономичности и экологической безопасности в

рамках весьма умеренных капиталовложений для реализации, чем использование схем технологии СВА. К сожалению, многие топки котлов советской постройки совсем непригодны к реализации этих технологий, так как топки эти часто имеют малую высоту и неудачное (но стандартное) соотношение размеров стен и высоты котла, высокие объемные теплонапряжения, а конструкции стандартных или «остированных» горелок, совершенно не пригодны для реализации требований по организации схем сжигания любых технологий СВА. Отметим лишь невозможность или недостаточные возможности по управлению горелками интенсивностью крутки их индивидуальных горящих факелов и, тем более, их отдельных зон. А это крайне важно для управления и настройки процессов смешения хотя бы в самых важных зонах горящих факелов, критических при формировании в этих зонах особых, специальных уровней избытков воздуха и температур, которые требуются при реализаций технологий СВА. Именно это необходимо для ступенчатого подавления или восстановления уже образовавшихся NO_x в технике СВА, например, в рамках ставшей традиционной схемы разделения механизмов образования NO_x на термические, топливные или быстрые. Главное, что должно быть организовано при общем недостатке воздуха в горящем факеле горелки или в нижней части топки, - это поддержание восстановительной атмосферы в этих зонах высоких концентраций восстановительных газов H_2 и CO, обязательных для организации глубокого восстановления NO_x в молекулярный азот уже во время горения топлива в самых разных стадиях выгорания твердого топлива и, конечно, при выходе летучих. В верхней части топки следует организовать продуманный двух или четырехсторонний ступенчатый, управляемый ввод воздуха в топку для полного доокисления остатков восстановительной атмосферы, причем только при умеренных температурах (около 1000°C). В разных схемах реализации СВА это делается, как правило, перед выходом продуктов сгорания из высоких камерных топок, кроме, пожалуй, первого опыта сверхглубокого подавления NO и CO при сжигании бурых углей на мощном котле ТЭС Jaenscherwalde примерно 20 лет тому назад, который потребовал иных, радикальных решений по вводу воздуха.

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИ СОЗДАНИИ ГОРЕЛОК ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ СХЕМ СВА

При изучении холодных и горячих (с горением) моделей новых конструкций вихревых горелок и новых схем управления структурой и круткой закрученных потоков и формируемых на их основе горящих факелов нами выявлены некоторые факты, которые позволили отработать промежуточные решения, пригодные для создания новых мощных горелок для экологически чистого сжигания газа и углей в разных схемах технологий СВА. В данном тексте выделим пока лишь два но, на наш взгляд, важных положения, полезных в деле оптимизации некоторых конструкций вихревых горелок, а также и для оптимизации схем сжигания топлив в объемах индивидуальных факелов горелок разных типов. К этим положениям можно отнести наличие в любом закрученном потоке с естественным приосевым обратным током (приосевой зоны эжекции факела вихревой горелки) выявленной нами характерной узкой кольцевой области сильного ослабления турбулентного обмена. Во-вторых, это выявленная и исследованная нами явная некорректность проводимых в исследованиях оценок момента вращения, переносимого закрученным потоком по оси в устройствах с разным способом закрутки основного воздушного (газового) потока.

Нами были использованы разные расчетные модели определения турбулентных характеристик потока, основанные на представлениях о влиянии на низ поперечных градиентов скоростей при обработке полученных нами экспериментальных данных о полях скоростей и давлений в потоках на холодных моделях новых типов горелок. Эти расчеты показали, что в очень характерной зоне локализации в сильно закрученном потоке нулевых значений радиальных скоростей резко затухает радиальный турбулентный массоперенос. Сам же закрученный поток этой зоной можно разделить на расширяющуюся внутреннюю область вихря и на сжимающую ее периферийную кольцевую область с пониженной интенсивностью местной крутки. Местная крутка внутренней части потока при этом распределена крайне неравномерно. На один-два порядка интенсивнее, чем периферия всего потока, может быть закручена кольцевая область между внешней границей приосевого обратного тока и областью максимальных значений тангенциальных скоростей. Эта зона повышенной интенсивности местной крутки газа примерно совпадает с узкой характерной кольцевой зоной максимальных радиальных скоростей в этой расширяющейся центральной части потока, которая локализована вне внешней границы приосевого обратного тока, но вблизи нее. Наши расчеты показали, что именно здесь, в сильнозакрученном потоке, достигают своих максимальных значений большинство, чаще всего рассматриваемых, турбулентных характеристик. Их существенное снижение (но в рамках корректности расчетных схем) имеет место непосредственно у оси вращения, и эта зона ослабления турбулентного переноса занимает небольшую центральную часть приосевого обратного тока. О самих механизмах турбулентного обмена на оси вращения потока в рамках использованных расчетных моделей и ряда конкретных экспериментальных материалов пока судить некорректно. Усиление турбулентного обмена на периферии интегрального закрученного

потока требует дополнительных специальных мер, которые нами также были разработаны и даже опробованы на практике.

Понятно, что даже в упрошенном представлении мы видим реальные направления для механизмов управления процессами поддержания оптимальных избытков воздуха в нестехиометрических факелах в схемах сжигания СВА, без чего совсем невозможно избирательное подавление образования по группам реакций термических, быстрых и топливных NO_x.

Другой эффект, полезный для создания горелок с камерными завихрителями, был установлен нами при анализе течения потока воздуха (струи) вдоль криволинейной стенки в стандартной улитке. Более подробная обработка экспериментальных данных показала наличие новой для нас концептуальной проблемы – интенсивность крутки части потока от оси вращения до криволинейной стенки улитки, рассчитанная по радиальным распределением в потоке момента вращения, сильно изменяется по мере движения газовой струи вдоль криволинейной стенки улитки, а сама величина момента вращения потока, идущего вдоль стенки, зависит от принятой модели определения момента вращения. В самых популярных ныне представлениях, которые обычно заимствованы, главным образом, из англоязычной литературы по вихревым пеленам за движущимися телами или по мощным атмосферным вихрям, в выражении осевого потока момента вращения используют обычно произведение тангенциальной и вращательной скоростей. Такой вихрь, момент вращения и крутку мы для простоты условно для себя называем объемными. В более традиционных представлениях момента вращения для камер, где его рассчитывают через квадрат тангенциальной скорости, рассчитанную крутку и момент вращения мы условно называем плоскими. На рис. 1 показано распределение интенсивности крутки, найденной нами по экспериментальным данным для струи (от стенки до оси вращения) идущей с поворотом вдоль криволинейно стенки стандартной улитки в этих двух разных представлениях момента и крутки вихря в одном режиме, а в качестве параметра или числа крутки использован традиционный подход Чигера, Дубова, Бэра, Червинского.

Очевидны сильные различия данных на этих диаграммах, что может влиять на выводы, которые можно сделать о факеле, формируемого одной и той же горелкой. На верхней гистограмме видно, что использование модели «объемного» момента и при сохранении баланса момента вращения и осевого потока количества движения в значительной части объема потока, действительная крутка сохраняется по мере движения струи вдоль стенки улитки, хотя численно эта крутка оказалась в 15-18 раз ниже крутки итогового вихря в выходном окне цилиндра, установленного за улиткой. Двукратный рост числа крутки струи при почти полном ее обороте в улитке связан с резким усилением осевого импульса вихря именно в этой зоне. Это противоречит обычным представлениям о закрутке потока в улитке. Но мы считаем, что именно это ясно указывает на главный механизм выноса твердой фазы из многочисленных камерных вихревых аппаратов, работающих на двухфазных потоках.

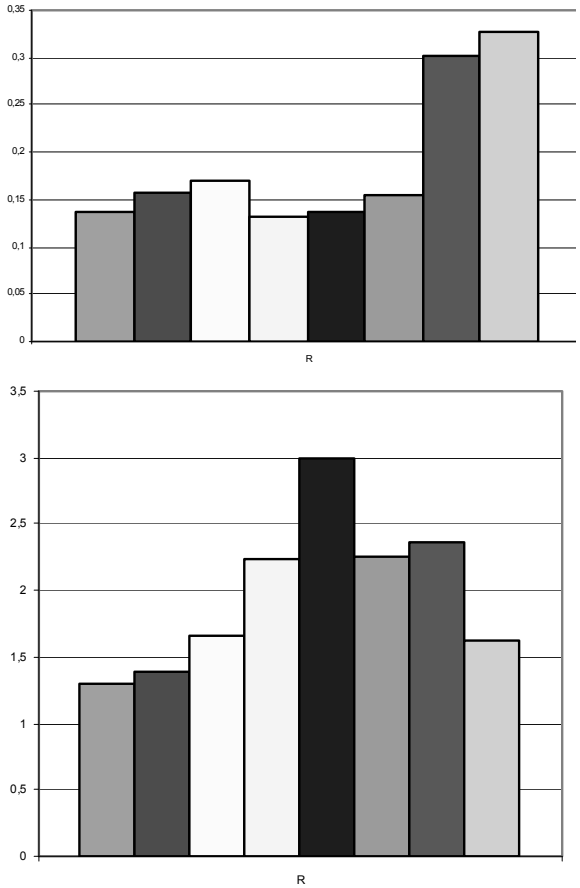

Рис.1 Действительная крутка струи (части потока от стенки до оси вращения) при развитии вдоль стенки улитки через 45 градусов, начиная от входного патрубка в представлениях «объемного» вихря (верхняя гистограмма) и «плоского» вихря (нижняя гистограмма)

Нижняя гистограмма на рисунке 1 указывает на принципиальное отличие результатов расчетов в представлениях «плоского» вихря. Принципиально важно, что момент вращения потока и адекватное усиление его крутки формируется не во входном патрубке улитки, а, главным образом, далее – уже в объеме улитки при развитии струи вдоль ее стенки. Нами установлено, что максимальное значение момента вращения наблюдается при повороте струи у стенки улитки на 90-270 градусов, с максимумом при повороте примерно на 180 градусов. При слабом осевом стоке основной части почти плоского вихря в улитке, использованные нами представления о "плоском" вихре явно более корректны. Тем более

что уровень значений этой "плоской" крутки, именно в этой области объема улитки, приближается к значениям действительной крутки интегрального потока на выходе из канала (короткого цилиндра за улиткой), рассчитанной по модели "объемного" вихря и численно, практически полностью, совпадающей со значением действительной крутки потока на выходе из улитки или из выходного канала за ней, но рассчитанной уже в представлениях "плоского" вихря. Отметим, что именно в той же зоне потока в объеме улитки его действительная крутка с погрешностью всего в 3-5% совпала с так называемой конструктивной круткой самого улиточного регистра, рассчитанной по действующим нормативам..

Поэтому можно утверждать, что крутка одного и того же потока в улитке, рассчитанная по модели «плоского» вихря, численно адекватнее отражает закрутку потока, чем расчеты в представлениях «объемного» вихря. Действительная крутка таких вихрей с мощным осевым стоком на выходе из камерного регистра может быть выше, чем следует из расчетов по данным инструментальных замеров скоростей в регистре, а иногда ниже, чем крутка «конструктивная», рассчитанная по нормативам, или найденная для потока на выходе из регистра по схеме «объемного» вихря, даже при зондировании потока. Причем величина момента вращения потока на выходе из камерного регистра, может быть до двух раз выше величины входного момента, найденного по средней скорости входа газа из патрубка регистра в объем улиточного регистра. При использовании внешних воздействий на поток на выходе из горелки или в ее амбразуре эти количественные различия могут изменяться в одном и том же устройстве при разной крутке.

Изучение и практическое использование этой ситуации позволило нам создать рабочие модели горелок даже малой мощности (всего 50-100 кВт) с устойчивым воспламенением достаточно грубой угольной пыли при подаче сразу после розжига, и работе на слабо подогретом воздухе (150-200°C). Дополнение опытных горелок специальным узлом аэродинамического воздействия на закрученный поток при выходе из улитки показало возможность эффективного управление формой и размерами горящего факела. Угол раскрытия горящего факела мог легко изменяться от примерно 25-35 до 90-120 градусов. Обратно увеличению угла раскрытия горящего факела соответственно сокращалась его длина. При увеличении длины факела, вызванной многократным ослаблением крутки, при сохранении устойчивого воспламенения можно будет ожидать существенное снижение образования NO_x, особенно при одновременном снижении местных избытков воздуха, а также при использовании отмеченного выше эффекта ослабления турбулентного обмена периферийной и центральной областей воздушного потока, формирующего горящий факел.

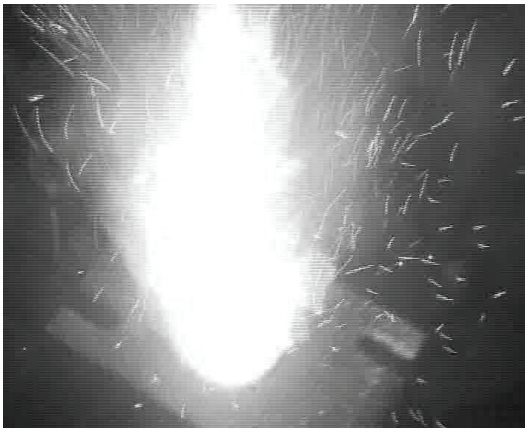

Рис.2. Горящий факел опытной угольной горелки 60 кВт при сжигании грубой угольной пыли в холодном помещении лаборатории

Сохранение при всем этом повышенной крутки центральной зоны вихря, даже при снижении его интегральной крутки, на этой горелке мощностью всего 60 кВт, обеспечило стабильное горение грубой угольной пыли с весьма высокой долей угольных частиц (200-600 мкм) даже в открытом пространстве холодного помещения лаборатории. Это видно на примере, показанном на рисунке 2, где с опытной горелки был снят узел управления факелом на выходе из нее закрученного потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уточненный взгляд на структуру закрученного газового потока при формировании в завихрителе и развитии в выходном канале на входе в открытое пространство позволил нам развить конструкции вихревых горелок с камерными завихрителями. Небольшие изменения завихрителя (стандартной улитки для формирования более симметричного потока) повысили устойчивость воспламенения угольной пыли при пониженных скоростях воздуха и сохранении качества перемешивания в факеле в зонах, отвечающих за горение топлива. Простыми аэродинамическими приемами удалось выделять в факеле зоны разного характера движения и горения пыли, что привлекательно для создания новых горелок со стадийным сжиганием топлив в объеме индивидуальных факелов при дефиците кислорода. Это полезно при организации схем сжигания по технологии СВА.