

## Экологические проблемы угольных ТЭЦ

**Работа выполнена сотрудниками ОАО «ВТИ» под руководством к.т.н. Котлера В.Р. по гранту, предоставленному Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы (соглашение №14.U02.21.0318 от 27 июля 2012г).**

На тепловых электростанциях России в настоящее время работают в основном котельные установки, проектирование и сооружение которых происходило несколько десятилетий назад. В то время основной задачей создателей и эксплуатационного персонала считалось обеспечение эффективного сжигания топлива: высокий КПД, низкие потери, долгосрочная безаварийная работа. В настоящее время, в дополнение к перечисленным, выдвигаются новые требования к оборудованию. В частности, к одному из основных элементов тепловой электростанции – котельной установке – предъявляются новые, более жёсткие требования, связанные с обеспечением допустимых выбросов в атмосферу некоторых продуктов сгорания твёрдого, жидкого и газообразного топлива.

Из азота воздуха и азотсодержащих компонентов топлива в топке образуется некоторое количество оксида азота NO. До выхода из котла часть оксида азота переходит в диоксид NO<sub>2</sub>.

Эмиссия оксидов азота NO<sub>x</sub> определяется не только характером сжигаемого топлива (как в случае SO<sub>2</sub> или золовых частиц), но также конструкцией топочно-горелочных устройств и даже режимом работы котла. Важно отметить, что образование оксидов азота NO<sub>x</sub> (NO + NO<sub>2</sub>) происходит при сжигании всех видов органического топлива.

Попадая в воздух, оксиды азота негативно воздействуют на здоровье людей. Длительное воздействие даже сравнительно небольших концентраций NO<sub>x</sub> увеличивает количество острых и хронических респираторных заболеваний. Повышенные концентрации оксидов азота негативно влияют также на растительный и животный мир.

Соединяясь с атмосферной влагой, оксиды азота (вместе с оксидами серы) образуют «кислотные дожди», которые наносят вред сельскому хозяйству, усиливают коррозию и разрушение строительных материалов, исторических памятников архитектуры и других культурных ценностей. Поэтому в России, как и в других высокоразвитых странах, были приняты законодательные ограничения по выбросам оксидов азота в атмосферу. Максимально разовая (усредненная за 20 мин) предельно-допустимая концентрация NO<sub>2</sub> (ПДК<sub>NO<sub>2</sub></sub>) равна 0,2 мг/м<sup>3</sup>, среднесуточная - 0,04 мг/м<sup>3</sup> (3-й класс опасности для атмосферного воздуха населенных мест).

Если проблема ограничения выбросов летучей золы и диоксида серы решается на тепловых электростанциях путем очистки дымовых газов, то выбросы NO<sub>x</sub> могут быть уменьшены за счет специальной организации топочного процесса. Это обстоятельство существенно влияет на развитие новых технологий факельного сжигания на тепловых электростанциях и в котельных, являющихся основными производителями тепловой и электрической энергии в России [1].

Источниками образования оксидов азота при сжигании органического топлива, как уже сказано выше, являются азот воздуха и азотсодержащие компоненты топлива. Из азота воздуха оксиды азота образуются при высоких температурах ( $T \geq 1500^\circ\text{C}$ ) в некотором температурном интервале (механизм Зельдовича). Эти оксиды азота называются *термическими*.

Кроме того, из азота воздуха во фронте факела при сравнительно низких температурах образуется небольшое количество *быстрых* оксидов

азота (механизм Фенимора). Своё название эти оксиды азота получили в связи с тем, что образуются они только в узкой зоне фронта пламени, при большом содержании горючих компонентов.

Образование *топливных* NOx происходит на начальном участке факела, при горении летучих, выделившихся из частиц угля или мазутных капель. Одновременно с образованием оксидов азота происходит восстановление NO до безвредного молекулярного азота N<sub>2</sub>, причём соотношение между окислительными и восстановительными реакциями определяется наличием свободного кислорода или других окислителей.

Применительно к топочным устройствам энергетических (а тем более - промышленных и отопительных) котлов можно утверждать, что количество образующихся оксидов азота определяется кинетикой процессов, т.к. время пребывания в высокотемпературной зоне значительно меньше времени, необходимого для достижения равновесных концентраций.

Оксиды азота, поступающие в атмосферу из котлов ТЭС, приносят большой вред окружающей среде независимо от механизма их образования. Однако для сокращения этих выбросов весьма важно знать, как образовались оксиды азота, поскольку количество термических, быстрых и топливных NOx по-разному зависит от основных параметров топочного процесса.

Топливные оксиды азота отсутствуют при сжигании природного газа (так как он, за редким исключением, не содержит связанного азота), но зато при сжигании мазута, и особенно всех видов твёрдого топлива (торфа, сланцев, бурых и каменных углей) доля топливных NO весьма велика, а в некоторых случаях приближается к 100% общего выброса NOx.

Зависимость количества образующихся топливных NOx от температуры и избытка воздуха была исследована в лабораторных условиях В.И. Бабием [2]. Графики, приведённые на рисунке 1,

показывают, что температурный уровень влияет на концентрацию топливных NOx только при низких температурах. В опытах, проведённых при температурах 1570 и 1740 К (1300 и 1470°C) концентрация NOx оказалась примерно одинаковой (900 мг/м<sup>3</sup>). Значительно большую роль играет действующая концентрация кислорода в том месте, где происходит образование топливных NOx.

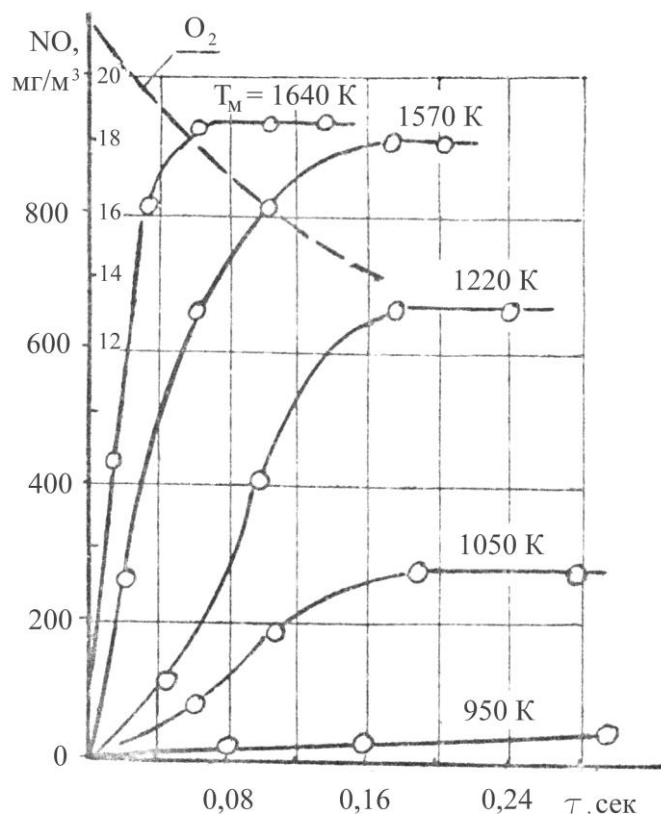


Рисунок 1 – Влияние температуры на эмиссию топливных оксидов азота при сжигании угольной пыли [2]

Из графика на рисунке 2 видно, что в опытах, проведённых при разных избытках воздуха, концентрация NOx менялась весьма существенно. Эти опыты позволили сделать вывод, что эмиссия топливных оксидов азота пропорциональна квадрату среднеинтегральной концентрации кислорода на начальном участке факела, где происходит горение летучих (рисунок 3).

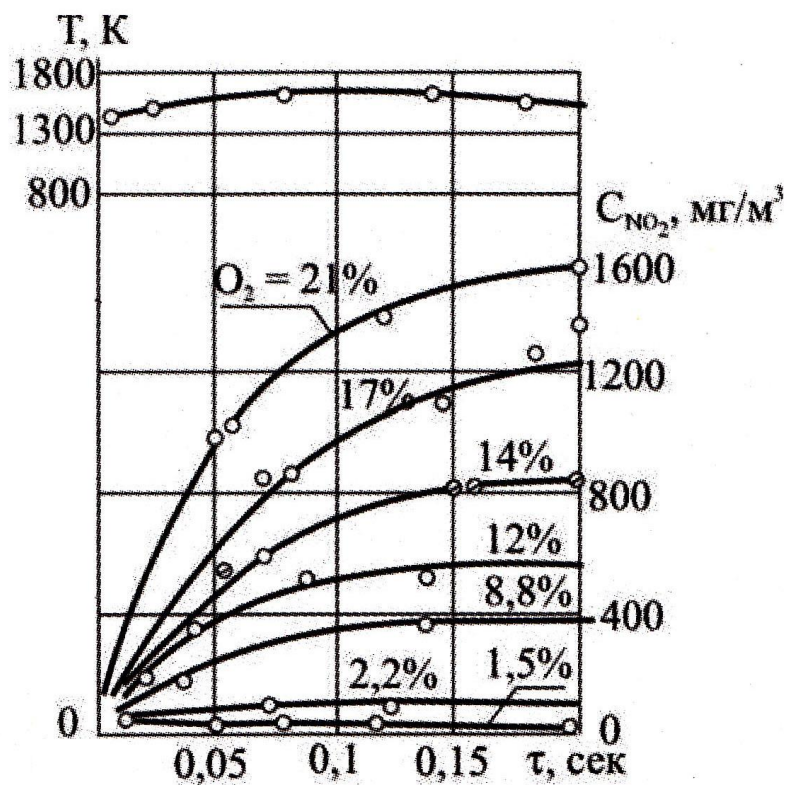


Рисунок 2 – Влияние концентрации кислорода в пылегазовом потоке на эмиссию  $NO_x$  [2]

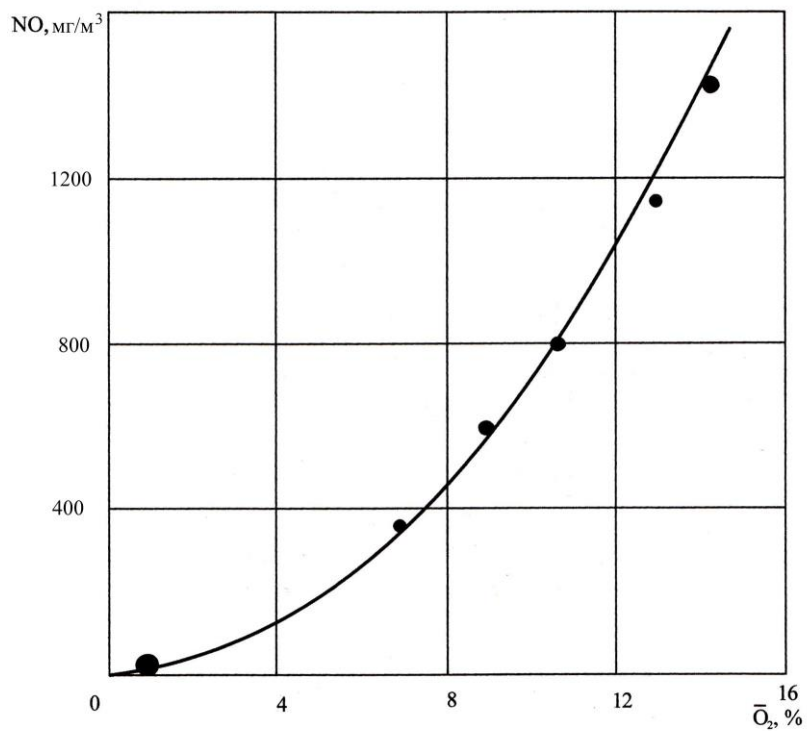


Рисунок 3 – Зависимость эмиссии  $NO_x$  от среднеинтегральной концентрации кислорода на начальном участке факела [2]

При факельном сжигании твёрдого топлива конструкции горелок чрезвычайно разнообразны, так как диапазон изменения характеристик углей очень велик. Прогрев поступающей в топку смеси угольной пыли с первичным воздухом (аэросмеси) происходит за счёт конвекции и лучистого теплообмена. Большинство специалистов считает, что роль конвекции, осуществляемой за счёт подмешивания к аэросмеси горячих газов из зоны развитого горения, является определяющей. Прогрев аэросмеси приводит к выходу летучих и их воспламенению. При сгорании летучих расходуется, главным образом, кислород, содержащийся в первичном воздухе. Горение летучих ускоряет прогрев коксовых частиц и их воспламенение. Горение коксовых частиц происходит, в основном, за счет кислорода вторичного воздуха. Важно отметить, что образование топливных  $\text{NO}_x$  начинается с момента воспламенения летучих, т.е. значительно раньше, чем образуются термические  $\text{NO}_x$ .

Изложенная схема развития пылеугольного факела является, безусловно, весьма упрощенной, т.к. в реальных котлах сжигается полидисперсная пыль. Вследствие этого выход летучих и горение коксового остатка протекают последовательно только для каждой отдельной частицы. А для всего факела эти процессы протекают параллельно, т.к. мелкие частицы (с размером в несколько микрон) прогреваются, воспламеняются и сгорают значительно быстрее, чем крупные частицы, имеющие максимальный размер в сотни (каменные угли) и даже тысячи (бурые угли и торф) микрон.

Особенностью образования оксидов азота в факеле вихревой горелки является наличие приосевой или тороидальной зоны рециркуляции газов, которые обеспечивают прогрев и воспламенение выходящей из горелки топливовоздушной смеси. В то же время горячие газы, подсасываемые на начальном участке по периферии горелочной струи, прогревают

вторичный воздух. Интенсивность воспламенения топлива и скорость его смешения с вторичным воздухом в значительной степени определяют образование топливных оксидов азота в факеле.

Особенностью малотоксичных горелок являются конструктивные детали, регулирующие интенсивность и последовательность смешения топлива с потоками воздуха. Используя соотношение скоростей и крутку внутреннего и внешнего потоков вторичного воздуха на малотоксичных горелках удаётся организовать ступенчатый подвод воздуха в факеле отдельной горелки, а в некоторых случаях – даже ступенчатый подвод топлива с частичным восстановлением NO в каждом факеле.

Практически все котлостроительные заводы в Европе, Японии и США имеют отработанные конструкции пылеугольных вихревых или прямоточных горелок, обеспечивающих на газе и на высококачественных марках каменных углей снижение выбросов NOx на 30-50%. Конструктивные детали у этих горелок разные, но все они характеризуются общей идеологией. Малотоксичные горелки должны:

- затормозить подмешивание богатого кислородом вторичного воздуха к воспламенившейся топливо-воздушной смеси в корне факела;
- интенсифицировать тепло- и массообмен между струёй топливо-воздушной смеси и высокотемпературными топочными газами, содержащими небольшое количество кислорода;
- обеспечить эффективное сжигание топлива при минимально-возможной доле первичного воздуха (для пылеугольных горелок);
- снизить пик температуры в ядре горения без ущерба для стабильности воспламенения и эффективности выгорания топлива.

Владельцы энергетических компаний как в США, так и в Европе борьбу с оксидами азота начинают с установки малотоксичных горелок. Объясняется это тем, что, во-первых, на угольных котлах, в топках с твердым шлакоудалением образуются главным образом топливные оксиды азота (а их количество определяется содержанием кислорода на начальном участке факела, в зоне горения летучих). Во-вторых, на действующих котлах замена старых изношенных горелок новыми (малотоксичными), при сохранении числа и расположения горелок, является сравнительно недорогим мероприятием, которое не затрагивает поверхностей нагрева под давлением, и может быть реализовано во время очередного капитального ремонта.

Именно эти мотивы послужили причиной того, что при реконструкции блока №8 Троицкой ГРЭС (на которой в котле П-57 сжигается высокозольный экибастузский уголь) решено было проверить разработанную специалистами ОАО «ВТИ» и ЦНИИТМАШ малотоксичную горелку (рисунок 4). По предварительным расчетам горелку можно было установить в действующие амбразуры без снижения мощности котла и без увеличения сопротивления горелки.

Котельный агрегат Пп-1650/255 (заводская марка П-57) – однокорпусной, с Т-образной компоновкой, оборудован топочной камерой с твердым шлакоудалением. При номинальной нагрузке котла (1650 т/ч) тепловое напряжение объема топки  $q_v = 132.6 \text{ кВт/м}^3$ , теплонапряжение сечения  $q_s = 5.96 \text{ МВт/м}^2$ . Вихревые грелки расположены встречно в 2 яруса по высоте.

Котел оборудован индивидуальными схемами пылеприготовления с прямым вдуванием. От каждой из 8 мельниц типа ММТ-2600/2550/590 аэросмесь поступает к делителям пыли, а затем к 3 вихревым горелкам. Для повышения температуры воздуха используется 4 регенеративных подогревателя диаметром 9800 мм.



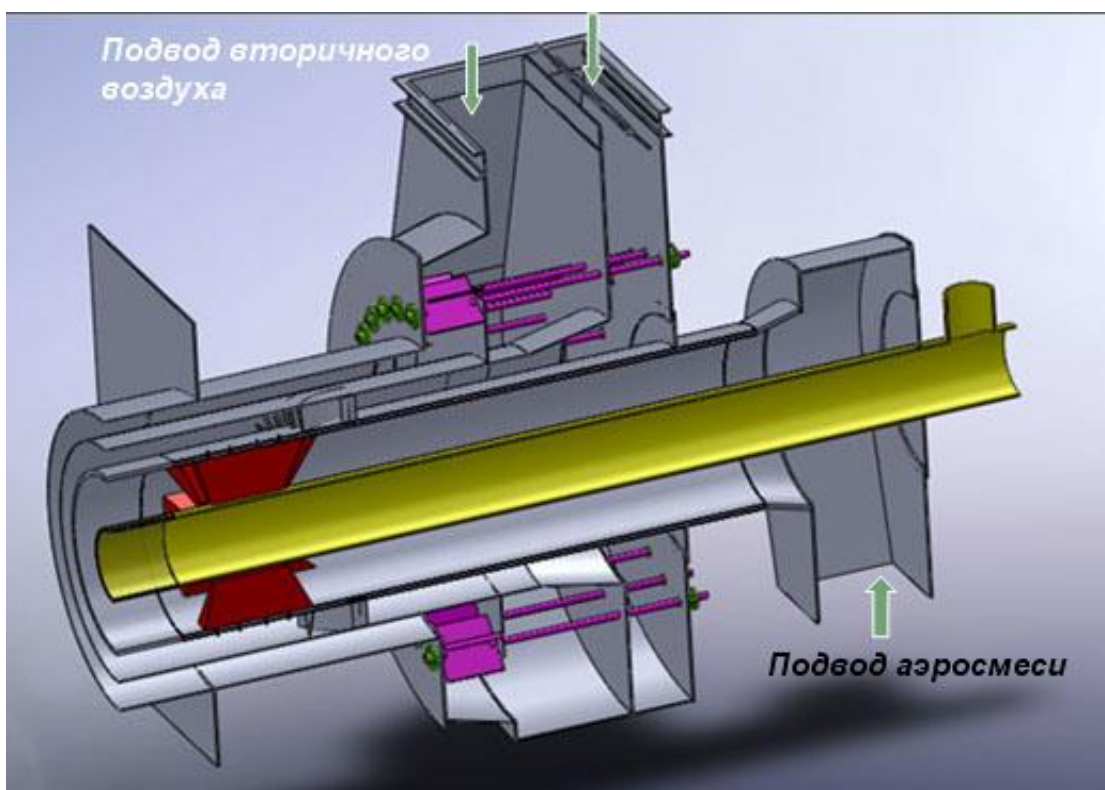


Рисунок 4 – Малотоксичная горелка ВТИ-ЦНИИТМАШ

В заводском исполнении вихревые горелки имели центральный канал с растопочной мазутной форсункой. На выходе в топку центральный канал имел раструб с увеличением диаметра от 325 до 630 мм. На выходе из кольцевого канала аэросмеси был установлен осевой лопаточный аппарат. Снаружи к каналу аэросмеси примыкал канал вторичного воздуха с тангенциальным закручивающим аппаратом. Сжигание экибастузского угля в котлах П-57, оборудованных такими горелками, приводило к повышенной концентрации  $\text{NO}_x$  в дымовых газах: при проектном избытке воздуха она достигала 1050 – 1190 мг/м<sup>3</sup>.

Особенностью конструкции новой малотоксичной горелки (рисунок 4) является, во-первых, наличие двух каналов вторичного воздуха (с возможностью регулировать расходы на каждый канал и крутку в наружном канале), но главное – нетрадиционный ввод аэросмеси: в

отличие от кольцевого закрученного потока аэросмесь вводится в топку в виде нескольких прямооточных струй, в каждой из которых обеспечивается расслоение потока на два: высококонцентрированный и с низкой концентрацией угольных частиц [3].

Газы внутренней приосевой рециркуляции из высокотемпературной зоны факела эжектируются по направлению к корню факела благодаря высокой скорости внутреннего потока вторичного воздуха и обеспечивают воспламенение прямооточных струй аэросмеси с повышенной удельной поверхностью. В процессе горения летучих снижение концентрации  $O_2$  приводит к постепенному подмешиванию кислорода из той части струи, которая обеднена топливом. Именно это обстоятельство приводит к снижению образования топливных оксидов азота.

В процессе поиска оптимального решения было проверено 15 различных вариантов конструкции горелки. Эти варианты отличались друг от друга соотношением количества воздуха и скоростей во внутреннем и внешнем каналах горелки. Для каждого варианта проводился расчет факела.

Параметры, полученные из конструкторского расчёта горелок, использовались для расчёта аэродинамики топки с помощью программы Fluent. Предварительно строилась трёхмерная модель топочной камеры с горелками в программе Solid Works. Затем в программе Gambit строилась сетка и после этого осуществлялся ввод исходных данных и расчёт топки в программе Fluent. Сетка строилась по принципу блочно-структурированной сетки на основе o-grid блоков. Конфигурация ячеек была представлена гексаэдрами. Граничные условия на входе потоков задавались как velocity-inlet, выход из модели задавался как pressure-outlet, граница факельного объёма задавалась как pressure-outlet, остальные граничные условия выставлялись как wall. В качестве расчётных моделей были задействованы: модель расчёта радиационного теплообмена; модель

турбулентных течений; модель химических реакций; модель теплопередачи.

Таким образом, было рассчитано 15 вариантов конструкций горелочных устройств. Результаты расчётов дали наглядную картину течений в факеле горелочного устройства. Наиболее информативными можно считать графики полей температур и полей скоростей CO, показанные на рисунках 5 и 6, соответственно. На основе всестороннего анализа этих графиков и ряда других показателей принималось решение о выборе оптимального варианта конструкции горелочного устройства.

В результате анализа имеющихся данных, оптимальным был признан вариант 3.2. Поле температур для этого варианта показано на рисунке 5, а поле скоростей CO – на рисунке 6.

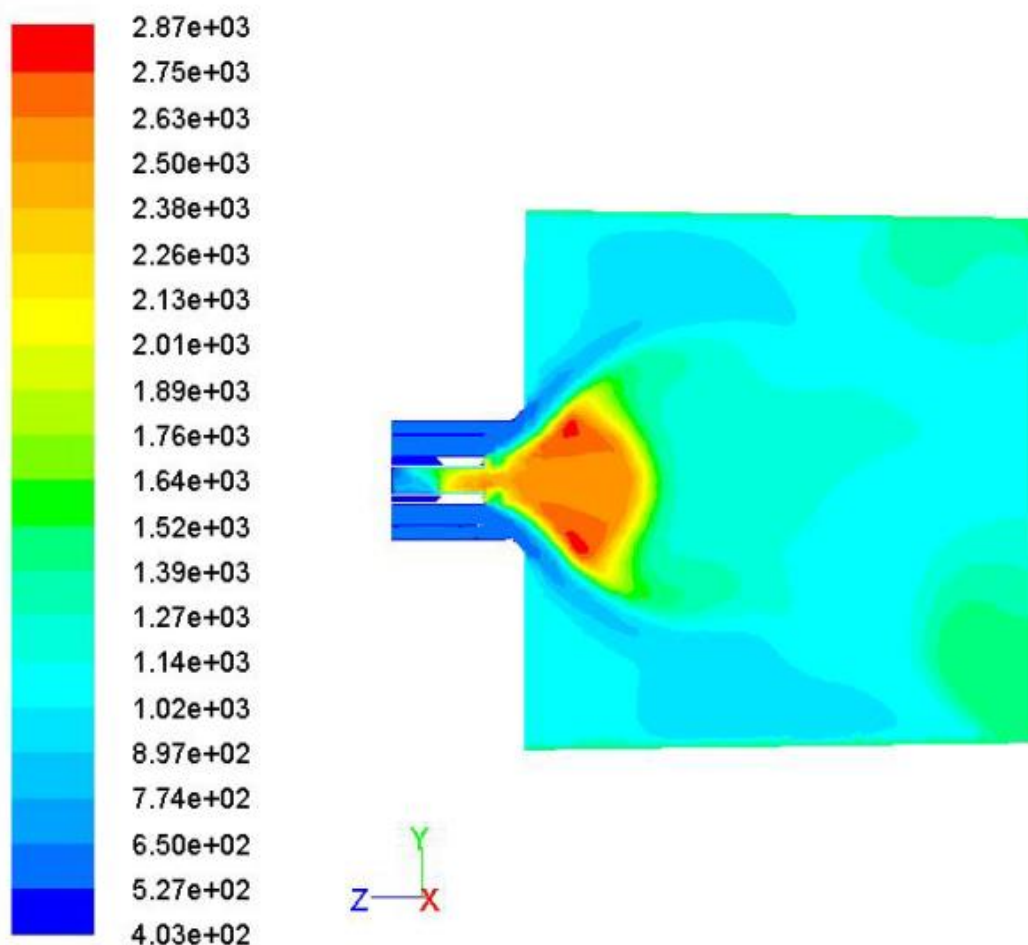


Рисунок 5 – Поле температур в варианте 3.2

Как видим, картина на обоих рисунках симметричная. Глядя на график температур, необходимо отметить, что факел устойчив и не прилипает к стенкам топочной камеры. Это говорит о том, что при выбранной конструкции горелки воспламенение надёжно и риск срыва факела отсутствует. Полученная картина хорошо соответствует теоретическим расчётам зоны горения: риск шлакования экранов отсутствует.

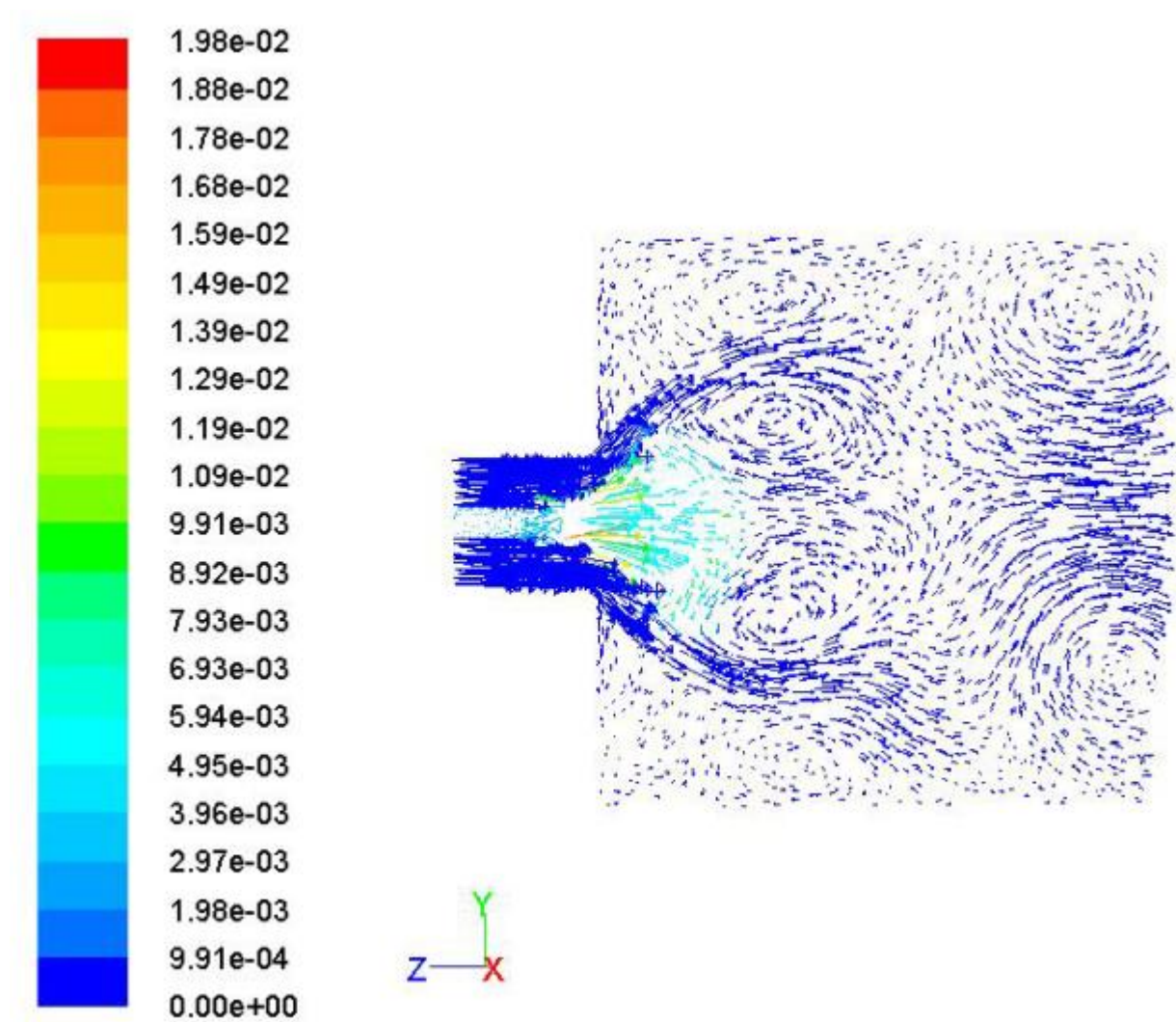


Рисунок 6 – Поле скоростей СО в варианте 3.2

На рисунке 6 хорошо видна внутренняя зона обратных токов, образующаяся в топке. Благодаря этой зоне высокотемпературные

топочные газы попадают к устью горелки и эжектируются в основной поток, обеспечивая устойчивое воспламенение пылевоздушной смеси

Опыты по оценке эффективности новых горелок были проведены на котле П-57 блока №8 Троицкой ГРЭС при сжигании экибастузского угля с зольностью до 41,2 %. Измеренные концентрации  $\text{NO}_x$  пересчитывались на диоксид азота  $\text{NO}_2$  при нормальных условиях (0 °С, 101,3 кПа) и при избытке воздуха  $\text{O}_2 = 6 \%$ . В предварительных опытах концентрация  $\text{NO}_x$  менялась от 616 до 740 мг/м<sup>3</sup>, а содержание горючих в уносе  $C_{yn}^2$  от 0,65 до 2,28 %.

После устранения обнаруженных на котле недостатков (повышенные перетоки воздуха в РВП, неравномерность распределения воздуха по горелкам и др.) будут проведены дополнительные опыты с разным соотношением скорости по каналам вторичного воздуха. Это, по всей видимости, позволит получить ещё большее снижение эмиссии  $\text{NO}_x$ .

## Литература

1. Беликов С.Е., Котлер В.Р. Котлы тепловых электростанций и защита атмосферы. Москва, Аква-Терм, 2008
2. Бабий В.И., Котлер В.Р. Вербовецкий Э.Х., Механизм образования и способы подавления оксидов азота в пылеугольных котлах. «Энергетик», 1996, №6, с. 8-13.
3. Патент РФ на полезную модель №89669. Вихревая пылеугольная горелка с делителями прямоочного потока аэросмеси.