

## ЖЫЛУ ФИЗИКАСЫ ЖӘНЕ ТЕОРИЯЛЫҚ ЖЫЛУ ТЕХНИКАСЫ ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

УДК 539.219.1; 537.528

В.К.Корабейникова

Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова

### ТЕХНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАПРАВЛЕНИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ УНИФИКАЦИИ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ РАБОТАЮЩИХ НА НИЗКОСОРТНЫХ УГЛЯХ

*Төменгі сапалы екібастұз көмірлерімен жұмыс істейтін жылу электр станциясы бугенераторларының экологиялық унификациясы олардың жұмыстарын техникалық талдау негізінде жүргізілді. Техникалық анализ технологиялық, құрылымдық, басқарушылық және табиғи ресурстарды қолдану тиімділігін арттыратын басқа да шешімдері сатылы дамытуға мүмкіндік береді. Экологиялық унификацияның негізгі факторы — жанатын отынның түрі, жану камерасындағы отынның жану үнемділігі. Жұмыстық бугенераторларының экологиялық унификациясын ендірудің бірінші кезеңі азот оксидінің шығуын төмендететін құйындық оттықтарды енгізу болды. Екіншісінде отынды үш сатылы жағуды ұйымдастыру ұсынылды.*

*Ecological unification of steam and gas generators of thermal power stations working on low sortable ekibastuzkiv a corner, it is reached{achieved} on the basis of the technical analysis of their work. The technical analysis allows consistently to introduce technological, structurally logic, administrative and other decisions allowing to raise efficiency of use natural resources alongside with improvement of quality of the natural environment at regional and global levels. Major factors of ecological unification is the kind of burnt fuel, his{its} profitability burning in the chamber. The first stage of introduction of ecological unification of working steam and gas generators. There was an introduction of vertical torches with the lowered output{exit} of oxides of nitrogen. The second stage offers the organization of three-stage burning of fuel.*

Современное состояние парогенераторов, рассчитанных не только на сжигание низкосортных углей, требует проведения реконструкции и модернизации значительных объемов физически и морально изношенного оборудования. Это в значительной мере связано с тем, что парогенераторы проектируются для сжигания одного или нескольких близких по характеристикам видов топлива. При традиционном, факельном способе сжигания низкосортных углей применяются все более трудоемкие решения при разработке нового оборудования, а также увеличиваются затраты материальных и трудовых ресурсов на поддержание работоспособности оборудования и условий их эксплуатации. А основными факторами, обеспечивающими экономичность сжигания топлива в топочной камере парогенератора являются, прежде всего, вид сжигаемого топлива, а также температурный режим и концентрация кислорода в факеле. На температуру горения влияют производительность парогенератора, тип горелочных устройств и топочной камеры, тепловое напряжение топочного объема, избыток воздуха в топке и способ его подачи, наличие рециркуляции и т.д.

В условиях факельного сжигания выгорание энергетического низкосортного угля, в частности экибастузского, заканчивается на сравнительно коротком участке по сравнению с размерами топочного пространства парогенераторов. Остальная часть топочного пространства выполняет роль камеры охлаждения. Кроме того, несмотря на большую высоту топочной камеры парогенераторов различной модификации, имеет место неполное выгорание топлива. Заметную величину неполного сгорания топлива составляет химический и механический недожог.

По данным эксплуатации и наладки парогенераторов считается, что угольная пыль не полностью выгорает в топочной камере вследствие несовершенства смесеобразования в горелках и плохой аэродинамики факела. Поэтому в ядре факела и в верхней части топки имеются зоны с низкой концентра-

цией окислителя. Химический недожог при сжигании экибастузского угля представляет собой соединения азота и углерода, механический — средние и мелкие фракции коксового остатка, содержание горючих в которых невелико.

Для низкорекреационных топлив применяют следующие способы снижения концентраций соединений азота: уменьшение избытка воздуха, подаваемого в топку; некоторое понижение температуры воздуха, подаваемого на горение; снижение теплового напряжения в топочной камере путём увеличения её объёма и применение двухсветных экранов; рациональный выбор горелочных устройств и их расположение; применение двухступенчатого или трехступенчатого сжигания. Реализация таких способов снижения выбросов оксидов азота в окружающую среду соответствует требованиям, предъявляемых по экологизации тепловых электростанций, работающих на органическом топливе.

Под термином «экологизация» понимают процесс последовательного внедрения технологических, структурологических, управленческих и других решений, позволяющих повышать эффективность использования естественных природных ресурсов наряду с улучшением качества природной среды на региональном и глобальном уровнях.

Концепция экологизации тепловых электростанций связана с рациональным использованием топлива; поэтапным внедрением разработанных эффективных технологий энергосбережения; локальной оптимизацией режимов работы теплоэнергетических установок, направленных на эффективное энергосбережение; применением эффективных технологий сжигания топлива и средств очистки выбросов тепловых электростанций. Экологизация тепловых электростанций обеспечивает одновременное повышение как экологической, так и энергосберегающей эффективности, поскольку количество загрязняющих веществ зависит от расхода топлива.

На действующих парогенераторах тепловых электростанций должна предусматриваться поэтапная экологизация. На первом этапе повышается экологичность и энергетическая эффективность основного теплоэнергетического оборудования за счет своевременного регламентированного обслуживания, поддержания требуемых эксплуатационных характеристик. На втором этапе предусматривается совершенствование режимов работы теплоэнергетических установок, модернизация и оптимизация параметров работы оборудования систем пылеприготовления и тягодутьевых установок, повышение безопасности эксплуатации без изменения принципиальных основ технологии и техники. На третьем этапе следуют разработка и внедрение эффективных средств и технологий, направленных на интенсивное энергосбережение за счет изменения принципиальных основ технологии, техники управления, безотходного использования топлива. На четвертом этапе разрабатываются и внедряются эффективные средства и технологии по защите окружающей среды с минимальными затратами и учетом мероприятий первых трех этапов.

Оценка результатов экологизации должна осуществляться по каждому этапу, как по экологической, так и по энергетической эффективности. Экологическая эффективность оценивается по снижению выбросов в окружающую среду, а энергетическая — по сэкономленному топливу.

Экибастузский уголь, используемый на тепловых электростанциях, характеризуется довольно высоким выходом летучих веществ, поэтому отнесен к марке СС. Пылевидный метод сжигания угля такой марки в камерных топках парогенераторов, как показала практика, является наиболее экономичным. Горение пылевзвеси происходит во взвешенном состоянии в газозвушной смеси при ее движении через топочную камеру.

Анализ фактических характеристик экибастузского угля показал, что по среднемесячным данным низшая теплота сгорания  $Q_n^p$  меняется от 2800 до 5330 ккал/кг; влажность на рабочую массу  $W^p$  — от 1,0 до 7,5 %; зольность на сухую массу  $A^c$  — от 39 до 53 % и выход летучих на горючую массу  $V^c$  — от 23 до 47 %.

Экибастузский уголь имеет высокую теплоту сгорания топлива, но вследствие значительных колебаний зольности калорийность на рабочую массу тоже изменяется в широком пределе. Ориентировочно теплота сгорания рабочей массы экибастузского угля может быть определена по эмпирической формуле [1]:

$$Q_n^p = 7886 - 83A^p - 85W^p, \quad (1)$$

где  $Q_n^p$  — низшая теплота сгорания топлива, ккал/кг (при расчете парогенераторного оборудования используется  $Q_n^p$ , так как уходящие дымовые газы имеют температуру выше температуры конденсации водяных паров; в теплотехнических расчетах для экибастузского угля принимается  $Q_n^p = 3790$  ккал/кг);  $A^p$  — зольность на рабочую массу, %.

Коэффициент калорийности ( $k_y$ ) определяется отношением низшей теплоты сгорания топлива к условной теплоте сгорания и изменяется в пределах 0,5–0,76.

Для экибастузского угля, с учетом его коэффициента калорийности, показатель экологической вредности определяется по воздействию двух главных примесей — золы и азота.

Летучая зола представляет собой смесь минералов, находящихся в свободном состоянии и относится к нетоксичной пыли, количество выбросов её пропорционально приведённой зольности топлива. В зависимости от размера частиц, например от 1 до 10 мкм, оседание их на землю происходит в течение года, частицы с размером менее 1 мкм участвуют в броуновском движении, перемещаясь в атмосфере подобно молекулам газа. Рассеивание света частицами летучей золы обратно пропорционально шестой степени размера частицы. Летучая зола экибастузского угля достаточно дисперсна, в частности, около 50 % веса частиц летучей золы имеют размер менее 18–20 мкм. Распределение частиц золы по размерам характеризуется показателями, приведенными в таблице [2].

Т а б л и ц а

Характерные показатели летучей золы экибастузского угля

Диаметр частиц, мкм	2,5	4,0	6,8	10	16	25	40
Вес пыли размером больше данного, %	94	89	82	70	55	37	20

При средней зольности экибастузского угля на сухую массу  $A^c = 46\%$  приведенная запыленность дымовых газов составляет 85–95 г/м<sup>3</sup>. При средней температуре уходящих газов 140 °С фактическая запыленность составляет 60–80 г/м<sup>3</sup>, точка росы дымовых газов при этом по сернистому ангидриду равна 60 °С, а по водяным парам — 50 °С.

Частные показатели экологической вредности золы, пересчитанные на условное топливо, определяются по формуле [3]:

$$P_z = \frac{0,35 G_i F (1-x) M_z}{\left(\frac{Q_n^p}{Q_y}\right) \left(\frac{ПДК_z}{ПДК_{nn}}\right) M_m}, \quad (2)$$

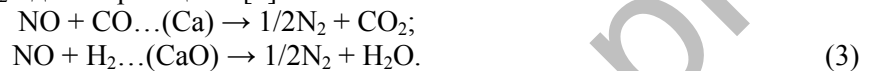
где  $G_i$  — масса примеси в рабочем топливе, %;  $F$  — безразмерный коэффициент, учитывающий сепарацию частиц золы;  $x$  — степень удаления данной примеси в самом парогенераторе (для индекса по золе он равен 2);  $M_m, M_z$  — относительные молекулярные массы примесей в топливе и продуктах сгорания;  $ПДК_z, ПДК_{nn}$  — предельно допустимые концентрации летучей золы в приземистом слое атмосферного воздуха и принятой для сравнения промышленной пыли, мг/м<sup>3</sup>;  $Q_n^p$  и  $Q_y$  — низшая теплота сгорания топлива и теплота сгорания условного топлива, ккал/кг.

Из соединений азота образуется в основном окись азота NO, которая и выбрасывается с дымовыми газами в атмосферу, где и доокисляется до двуокиси азота NO<sub>2</sub>, представляющей собой бурый ядовитый газ с характерным запахом. Известно, что современные методы сжигания твердого топлива ведутся при избытке кислорода, и практически не только азот топлива переходит в оксиды, но и частично молекулярный азот воздушного дутья, в тем большем количестве, чем выше температура в зоне горения.

Имеющиеся в литературе сведения о механизме образования оксидов азота дают определенное количественное представление о возможности изменения азотосодержащих соединений в продуктах сгорания определенного набора предельных и непредельных углеводородов и газообразного азота топлива и воздуха, которые основаны на константах равновесия при механизме процессов только при температуре 1200 К. При такой температуре в твердом топливе уже отсутствуют непредельные углеводороды, возникает возможность появления термических оксидов азота в тем большем количестве, чем значение температуры выше, что не исключает наличия в равновесной среде NO<sub>x</sub>, т.е. невозможно получение безвредных газов [4].

Азот топлива находится в химической связи с углеродом и водородом, создавая аминные структуры NH и NH<sub>2</sub> на периферической части макромолекул твердого органического топлива, а также цианиды HCN и CN, находящиеся и в ядерной части ароматической структуры углерода в более прочных валентных связях. Изменение структуры топливных макромолекул начинается при температуре выше 100 °С с разрушения кислородосодержащих молекул и выхода в газовую фазу в виде CO и CO<sub>2</sub>, а при 250 °С — преимущественно H<sub>2</sub>O в различных соотношениях, в зависимости от степени

метаморфизма исходного топлива, при этом оксиды азота не возникают. В этой же области внутри твердой фазы формируются устойчивые  $\text{NH}_3$  и  $\text{HCN}$ -группы, которые выделяют вместе с аминными радикалами  $\text{NH}_3$  и  $\text{NH}_2$  с максимумом при  $300^\circ\text{C}$  и выше, а также от степени метаморфизма и количества летучих веществ. Та часть азота, которая входит в ароматические кольца ядра макромолекул топлива, выходит в газовую фазу почти одновременно с продуктами сгорания углерода с опережением только на 10–15 %. При этом возникающие и оксиды азота, которые при недостатке кислорода и избытке  $\text{CO}$  и наличии углерода могут полностью или частично конверсировать до молекулярного азота в зависимости от температурного режима горения. В топочной камере парогенератора при появлении продуктов неполного сгорания в первую очередь появляется  $\text{CO}$ , величина которой не превышает 0,5–1 %. Конверсия азота твердого топлива начинается при температуре пиролиза выше  $500^\circ\text{C}$  сначала за счет аминных радикалов и водорода, а затем и в присутствии кислорода и  $\text{CO}$ . Повышению активности этих процессов способствуют рост температуры и давление в топочной камере, а также присутствие свободного оксида кальция, являющегося активным катализатором этих процессов. При этом конверсия  $\text{NO}$  до  $\text{N}_2$  идет по реакциям [5]:



Доля оксида азота, восстановленного до  $\text{N}_2$ , составляет 16 %, а во второй реакции 7 %. На рисунке 1 показано изменение концентрации оксидов азота от коэффициента избытка воздуха при различных соотношениях  $\text{CaO/S}$ .

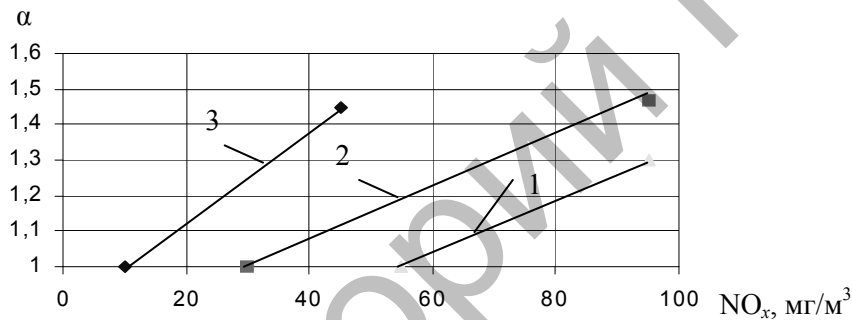


Рис. 1. Температурная зависимость распределения азотных компонентов твердого топлива при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1$ : 1 —  $\text{CaO/S} = 0,8$ ,  $\vartheta = 830^\circ\text{C}$ ; 2 —  $\text{CaO/S} = 1,5$ ,  $\vartheta = 850^\circ\text{C}$ ; 3 —  $\text{CaO/S} = 0,5$ ,  $\vartheta = 900^\circ\text{C}$

На рисунке 2 показана температурная зависимость распределения азотных компонентов твердого топлива при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1$ .

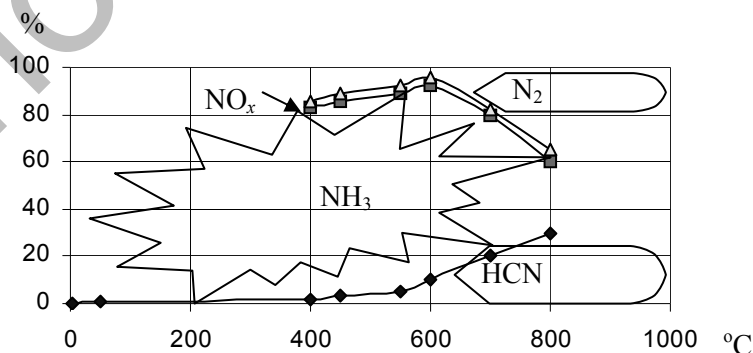


Рис. 2. Температурная зависимость распределения азотных компонентов твердого топлива при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1$

Из рисунка 2 видно, что концентрация  $\text{N}_2$  заметно возрастает при температуре выше  $600^\circ\text{C}$ . Максимум выхода  $\text{NH}_3$  находится в области температур  $400\text{--}500^\circ\text{C}$ . Рост выхода  $\text{HCN}$  наблюдается до температуры  $800^\circ\text{C}$ , поскольку в воздушном потоке происходит окисление азота.

Частные показатели экологической вредности азота, пересчитанные на условное топливо, определяются по формуле:

$$P_{NO_x} = \frac{3,5C_i V_z (1-x)}{\left(\frac{Q_p}{Q_y}\right) ПДК_{NO_2}}, \quad (4)$$

где  $C_i$  — концентрация оксидов азота в  $1 \text{ м}^3$  дымовых газов при нормальных условиях,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ;  $V_z$  — объем дымовых газов, получающихся при сжигании  $1 \text{ кг}$  топлива,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ;  $x$  — степень удаления данной примеси в самом парогенераторе (для индекса по азоту он равен 1);  $ПДК_{NO_2}$  — предельно-допустимые концентрации оксидов азота в приземистом слое атмосферного воздуха и принятой для сравнения двуокиси азота,  $\text{мг}/\text{м}^3$ .

Индекс угля характеризуется суммой частных показателей вредности  $P^z = \sum P_i$ .

На рисунке 3 показано изменение показателей вредности по золе, оксидам азота и суммарный показатель вредности от показателя калорийности экибастузского угля.

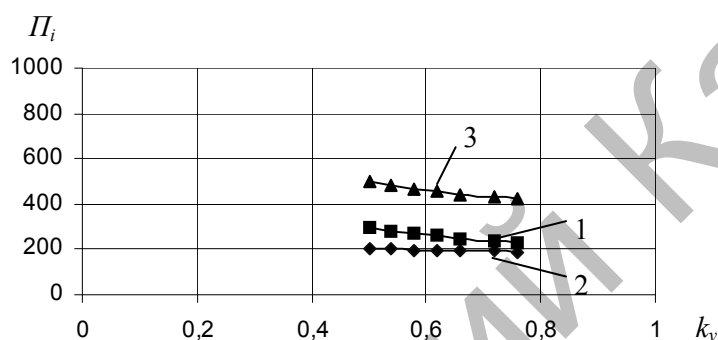


Рис. 3. Показатели вредности по золе, оксидам азота и суммарный показатель вредности экибастузского угля от показателя калорийности: 1 — показатель вредности по золе; 2 — показатель вредности по оксидам азота; 3 — суммарный показатель вредности

В настоящее время отсутствуют технически и экономически приемлемые способы очистки дымовых газов от оксидов азота, все применяемые методы борьбы с ними сводятся к максимальному снижению возможности их образования путём соответствующей организации топочного процесса.

На первом этапе внедрения экологической унификации действующих парогенераторов, работающих на экибастузском угле, по снижению выбросов оксидов азота было внедрение вихревых горелок с пониженным выходом оксидов азота. Вторым этапом предлагается организация трехступенчатого сжигания, сущность которого заключается в том, что основные горелки работают с оптимальным по условиям обеспечения минимальной высокотемпературной коррозии топочных экранов и максимального выжига топлива коэффициентом избытка воздуха  $1,0-1,05$ , а выше основных горелок устанавливаются основные горелки, в которых сжигается  $15-30\%$  топлива, благодаря чему создается зона с восстановительной средой, в которой продукты неполного сгорания восстанавливают образовавшиеся оксиды азота до молекулярного азота.

#### Список литературы

1. Чокин Ш.Ч., Устименко Б.П., Вдовенко М.И., Алияров Б.К., Палатник И.Б. Экибастузский топливно-энергетический комплекс. — Алма-Ата: Наука, 1982. — 240 с.
2. Курмангалиев М.Р., Фисак В.И. Сжигание энергетических углей Казахстана и защита атмосферы. — Алма-Ата: Наука КазССР, 1989. — 223 с.
3. Энергетика и окружающая среда / Под ред. Н.Г.Залогина, Л.И.Кроппа и др. — М.Энергия, 1979. — 353 с.
4. Росляков П.В. Расчет образования топливных оксидов азота при сжигании азотосодержащих топлив // Теплоэнергетика. — 1986. — № 1. — С. 37-41.
5. Яворский И.А. О путях предотвращения выбросов оксидов азота технологическими методами сжигания твердых топлив // Теплоэнергетика. — 2001. — № 2. — С. 17-23.