

## Образование и снижение выбросов бенз(а)пирена и оксидов азота на котлах с вихревым движением газов

В.К. Елсуков<sup>а</sup>, С.В. Латушкина<sup>б</sup>

Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

<sup>а</sup> elswk@mail.ru, <sup>б</sup> latushkinas@rambler.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6178-1902>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8635-8959>

Статья поступила 14.09.2020, принята 19.09.2020

*Анализируются промышленные и термодинамические исследования образования и разложения вышеотмеченных загрязнителей, выполненные различными авторами для условий сжигания канско-ачинских бурых углей Ирша-Бородинского месторождения. Выявлено, что снижение химического и механического недожога, включая выбросы бенз(а)пирена (БаП), может быть достигнуто следующими мероприятиями: турбулизация топочных газов; снижение нагрузки котла; симметричное включение горелок; обеспечение оптимальных значений избытков воздуха и тонины помола. Сделан вывод, что в наибольшей степени из перечисленных мероприятий снижает выбросы БаП турбулизация в камере сгорания, достигаемая симметричным и тангенциальным вводом сушильных газов ниже пережима топки от двух работающих пылесистем. Описано влияние этого ввода на образование оксидов азота (NO<sub>x</sub>). Показано, что образование БаП происходит преимущественно в топочной камере, а не в пылесистемах. Разработаны формулы для оценки выбросов БаП на котлах с жидким шлакоудалением, учитывающие аэродинамические процессы в топке. Предлагаются различные технологические мероприятия по комплексному снижению выбросов загрязнителей путем обеспечения вихревого сжигания на котлах как с жидким, так и с твердым шлакоудалением.*

**Ключевые слова:** бенз(а)пирен; оксиды азота; вихревое горение; термодинамический анализ; пылесистемы; жидкое шлакоудаление; эффективность горения.

## Formation and reduction of benz(a)pyrene and nitrogen oxides emissions in boilers with vortex gas flow

V.K. Elsuikov<sup>а</sup>, S.V. Latushkina<sup>б</sup>

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>а</sup> elswk@mail.ru, <sup>б</sup> latushkinas@rambler.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6178-1902>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8635-8959>

Received 14.09.2020, accepted 19.09.2020

*Industrial and thermodynamic studies of the formation and decomposition of the above-mentioned pollutants, performed by various authors for the conditions of burning Kansk-Achinsk brown coals of Irsha-Borodino deposit, are analyzed. It has been found that the reduction of chemical and mechanical underburning, including emissions of Benz(a)pyrene (BAP), can be achieved by the following measures: turbulization of flue gases, reduction of boiler load, symmetrical switching on of burners, ensuring optimal values of excess air and grinding fineness. It is concluded that turbulization in the combustion chamber, achieved by symmetrical and tangential input of drying gases below the furnace clamp from two working dust systems, reduces BAP emissions to the greatest extent. The effect of this input on the formation of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) is described. It is shown that the formation of BAP occurs mainly in the furnace chamber, and not in dust systems. Formulas have been developed for estimating BAP emissions from boilers with liquid slag removal, taking into account the aerodynamic processes in the furnace. Various technological measures are proposed to comprehensively reduce pollutant emissions by providing vortex combustion in boilers with both liquid and solid slag.*

**Keywords:** benz(a)pyrene; nitrogen oxides; vortex combustion; thermodynamic analysis; coal dust systems; liquid slag removal; combustion efficiency.

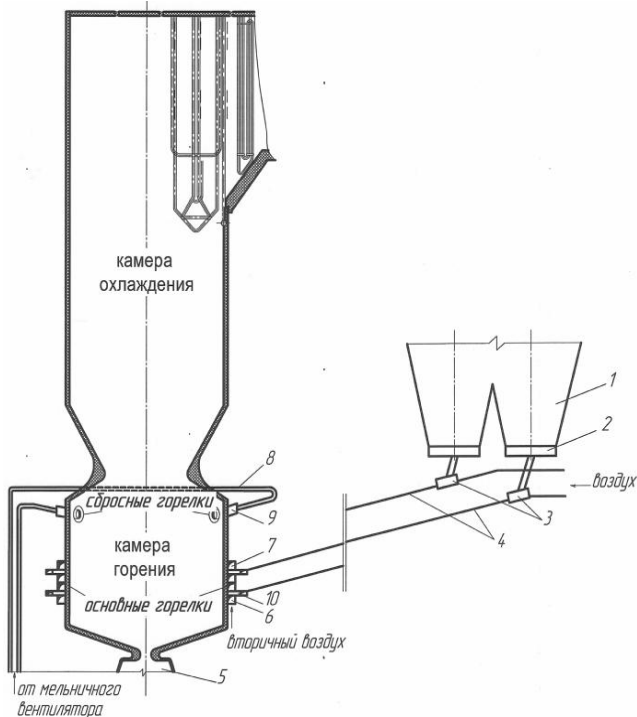
**Введение.** В представленной статье авторами исследуется опыт сжигания канско-ачинских углей (КАУ) на ТЭЦ-6 Братска в котлах типа БКЗ-320-140 ПТ.

Целью анализа является уточнение условий образования NO<sub>x</sub> и БаП и выявление технических решений по комплексному снижению выбросов обоих загрязнителей.

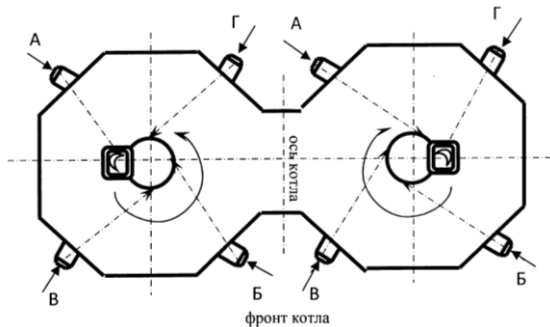
**Системы пылеприготовления и сжигания топлива.** Топка котла (к.а.) БКЗ-320-140 ПТ показана на рис. 1.

Топка котельного агрегата включает камеры горения и охлаждения высотой 6.3 и 19 м соответственно. Эти камеры разделены пережимом, образованным трубами фронтального и заднего экранов. Камера охлаждения имеет прямоугольное сече-

ние, а камера горения — сечение двух сообщающихся восьмигранников (рис. 2). На боковых гранях этих восьмигранников смонтированы двухъярусные горелки с тангенциальным направлением истекающей среды к воображаемым окружностям диаметрами по 0.98 м.



**Рис. 1.** Вертикальный вид топки котла БКЗ 320-140 ПТ: 1 — бункер пыли; 2 — пылепитатель; 3 — смеситель ПВКР; 4 — пылепровод ПВКР; 5 — шлаковый комод; 6 — горелка нижнего яруса; 7 — горелка верхнего яруса; 8 — сбросной пылепровод; 9 — сбросная горелка; 10 — эжектор ПВКР



**Рис. 2.** Сечение нижней части топки (сбросные газы пылесистем А, Г на к.а. № 5 заведены в конвективный газоход)

На котле установлены четыре пылесистемы с промбункером (рис. 3).

Сушка и транспортирование пыли в пылесистемах производятся дымовыми газами, температура которых регулируется смешиванием «горячих» и «холодных» потоков. Пылесистемы большинства котлов (к.а.) станции являются замкнутыми, за исключением к.а. ст. № 5, который оборудован двумя замкнутыми (Б, В) и двумя разо-

мкнутыми (А, Г) пылесистемами (п.с.). Ввод сушильных газов от замкнутых пылесистем осуществляется в верхнюю часть камеры горения по касательной к воображаемой окружности выше основных горелок (рис. 2 и 3). Сушильные газы от разомкнутых пылесистем А и Г на к.а. № 5 направляются в газоход за конвективной шахтой.

Авторы используют в статье термины «вихревое движение» и «вихревое сжигание» применительно к данному котлу по следующим обстоятельствам.

1) В современных публикациях, посвященных проблематике вихревого движения, дается следующее его определение: «вращательные движения жидкости, при которых происходит перемещение среды от периферии к центру с последующим истечением ее вдоль оси». Этот тип движения считается вихревым [1]. При анализе образования выбросов  $\text{NO}_x$  в данной статье будет показано, что из-за вращательного движения сушильных газов в верхней части камеры горения образуется вторичный вихрь, направленный к ядру факела.

2) Одним из важных показателей, характеризующих режим течения жидкости (движения газов), является число Рейнольдса ( $Re$ ), которое для вихревых процессов определяется произведением окружной (тангенциальной) скорости ( $V_\phi$ ) на характерный размер, отнесенное к кинематической вязкости газов. Расчеты авторов показали, что при любых сочетаниях работающих пылесистем и расчетных значениях  $V_\phi = 47$  м/с (согласно аэродинамическому расчету к.а.) на выходе из сбросных горелок  $Re \geq 2 \cdot 10^5$ , что много больше критического значения ( $Re_k = 2.3 \cdot 10^3$ ). Таким образом, режим движения газов в камере горения характеризуется высокой турбулентностью и является вихревым.

**Положение дел на станции в части выбросов загрязнителей.** Согласно [2; 3], на станции был период сжигания Ирша-Бородинского угля, когда достигалось снижение выбросов  $\text{NO}_x$  с 900 до 400  $\text{мг/м}^3$ . Это достижение обусловлено совместным применением систем ПВКР и ступенчатого сжигания топлива в основных горелках.

Однако после перехода ТЭЦ в начале 2000-х гг. на КАУ малых месторождений выбросы  $\text{NO}_x$  и диоксида серы  $\text{SO}_2$  увеличились в разы.

**Анализ экспериментов.** Испытания проводились работниками САФ ВНИИпромгаз по методикам [4; 5]. Часть опытов отражена в [2; 3].

Измерения концентраций оксидов азота выполнялись фотоколориметрическим методом. Измерения концентраций бенз(а)пирена проводились по принципу полного перевода бенз(а)пирена в твердую фазу путем охлаждения продуктов сгорания в теплообменнике до температуры, близкой

к 293 К, и осаждения твердых частиц на фильтре из ткани Петрянова ФПП-15 (два слоя), с последующим анализом спектрально-люминесцентным методом.

Концентрации БаП замерялись за дымососами к.а. (установленными за золоуловителем), а концентрации других загрязнителей — на выходе из топки.

Результаты испытаний к.а. № 5 и 7 авторами этой публикации представлены в виде зависимостей концентраций указанных загрязнителей, а также содержания горючих веществ в уносе ( $\Gamma_{ун}$ ) сразу от нескольких параметров: нагрузки котла, числа работающих пылесистем и избытка воздуха (рис. 4 и 5).

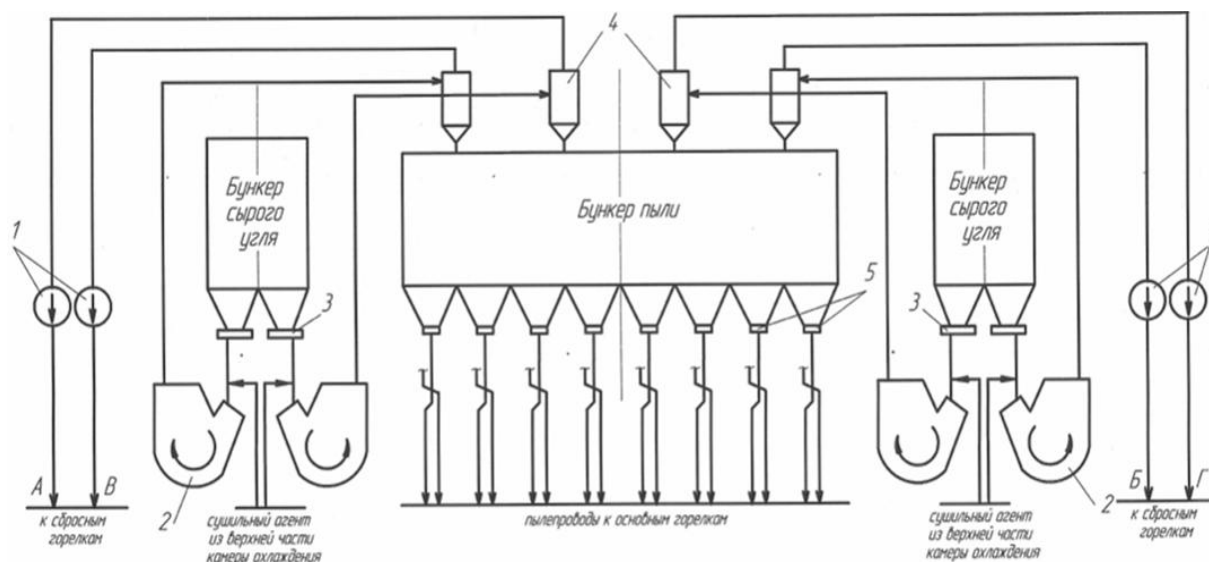


Рис. 3. Схема пылеприготовления на котле БКЗ-320-140 ПТ: 1 — мельничный вентилятор; 2 — молотковая мельница; 3 — питатель сырого угля; 4 — пылевой циклон; 5 — лопастной питатель пыли

Каждая линия соответствует определенным работающим пылесистемам (п.с.), а номера точек соответствуют номерам опытов. Номера из одного числа относятся к к.а. № 5, а номера из двух чисел, первое из которых 7, — к к.а. № 7. На к.а. № 5 было проведено 11 опытов, в которых менялись работающие пылесистемы, а также варьировались  $\alpha_{пп}$ , все они отражены на рис. 4 и 5. На к.а. № 7 было проведено 18 опытов, 7 из которых для возможности сопоставления с к.а. № 5 представлены на рис. 4 и 5.

Из сопоставления опытов на к.а. № 5 и 7 можно сделать вывод, что наиболее существенно на величину выбросов БаП влияют два параметра: 1) схема ввода сушильных газов в камеру горения и 2) избыток воздуха в камере горения. Сделанный вывод подтверждается также различными опытами и на к.а. № 7 [2], в которых варьировались значения нагрузки ( $D$ ), избытков воздуха ( $\alpha_{пп}$ ), расхода пара на эжекторы ( $G_{п}$ ) и которые показали сравнительно небольшие изменения выбросов БаП от  $G_{п}$ .

Значимость симметричной подачи сбросных газов на образование БаП видна также из сопоставления опытов на котлах 5 и 7 при близких нагрузках и равном числе работающих п.с. (5 и 7.16, 7.11). На 5 к.а. при работе п.с. Б и В факел был смещен к тылу котла, а на 7 к.а. в работу

включались противоположные п.с.: Б, Г, либо А, В. В итоге во всех опытах на 7 к.а. выбросы БаП многократно ниже, чем на 5 к.а.

Отметим, что в камере сгорания вихревое движение сушильных газов сохранится даже при одной включенной п.с. Такой эффект наблюдался при изучении кольцевых топок [6]. Наличие вихревого движения в опытах 3 и 10 объясняет меньшие значения БаП сравнительно с опытами 11 и 2, в которых этого движения не было. При этом вихрь, образованный подачей сушильных газов от одной пылесистемы, будет менее симметричным и стабильным, чем вихрь от двух пылесистем. В этом случае какая-то часть дымовых газов может попадать в камеру охлаждения, не участвуя в вихревом движении (можно сравнить опыты 3 и 10 с 7.11).

Опыты 1, 6 условно включены в общий процесс (зависимость), отличающийся от процесса 2, 11 более низкими значениями избытков воздуха за пароперегревателем ( $\alpha''_{пп}$ ) или за дымососом ( $\alpha_{дс}$ ). Разница опытов 6 и 1 состояла в том, что в опыте 6 все п.с. были отключены, а в опыте 1 включена 1 п.с. (с подачей сбросных газов в газоход за котлом). Следовательно, объединяет эти опыты отсутствие подачи сбросных газов в камеру горения.

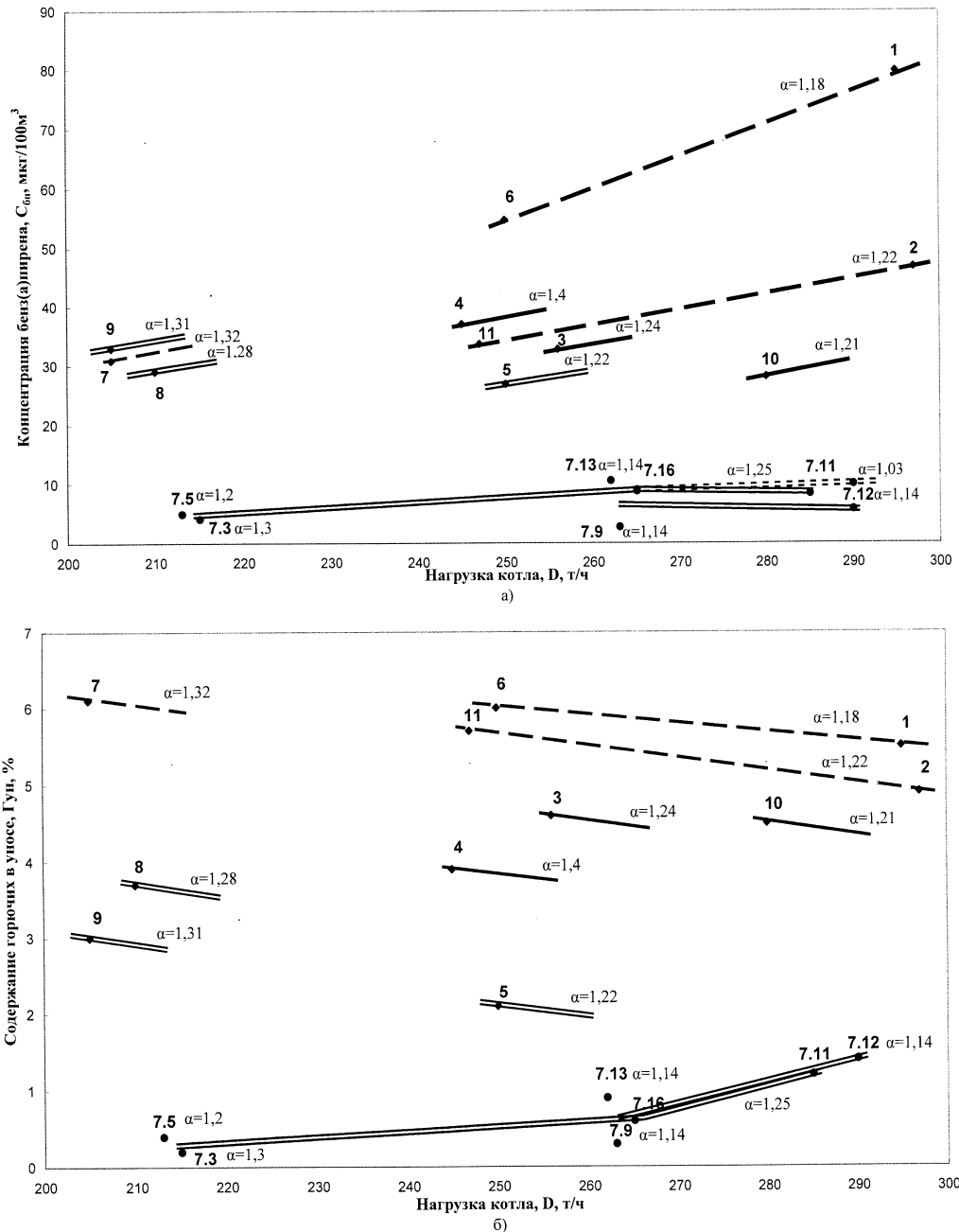
Заметим, что увеличение выбросов БаП в опыте 6 при выключенных пылесистемах, опровергает

версию, изложенную в источнике [2], о генерации БаП уже в пылесистемах (по крайней мере, в заметных количествах). В таком случае выбросы БаП должны были бы уменьшиться в сравнении с опытом 11 (при сопоставимой нагрузке) и с опытом 1 (при равном коэффициенте избытка воздуха).

При сопоставлении рис. 4, а и б можно сделать вывод об определенной связи выбросов БаП и содержания горючих веществ в уносе: режиму с меньшей концентрацией БаП соответствует и меньшее значение  $\Gamma_{ун}$ . Из этого следует, что вы-

бросы БаП могут быть снижены мероприятиями, уменьшающими химический и механический недожог ( $q_3$  и  $q_4$ ), прежде всего, турбулизация топочных газов.

Заметим также, что выпуклость и вид зависимостей  $C_{БаП}$  и  $\Gamma_{ун}$  от нагрузки противоположны. Можно сделать предположение, что часть БаП генерируется на завершающих этапах горения из несгоревшего угля, образующего  $\Gamma_{ун}$ . Данное предположение необходимо проверить дальнейшими исследованиями.



**Рис. 4.** Концентрация бенз(а)пирена (а) и содержание горючих в уносе (б) в зависимости от нагрузки котла, числа включенных пылесистем и их сочетания, избытка воздуха ( — — в топку подаются газы от двух пылесистем; — — в топку подаются газы от одной пылесистемы; ····· — в топке отсутствует подача сушильных агентов; — — — — характеристика, полученная интерполяцией для режима с двумя симметрично включенными пылесистемами)

Заметим также, что выпуклость и вид зависимостей  $C_{\text{БП}}$  и  $\Gamma_{\text{ун}}$  от нагрузки противоположны. Можно сделать предположение, что часть БАП генерируется на завершающих этапах горения из несгоревшего угля, образующего  $\Gamma_{\text{ун}}$ . Данное предположение необходимо проверить дальнейшими исследованиями.

Приведенное предположение не противоречит экспериментальным и теоретическим работам [2; 7–9], в которых показано, что бенз(а)пирен генерируется на начальных этапах горения топлива, однако при неэффективном сжигании части топлива его образование может замедляться.

В нормативных документах [10] при сжигании газа и мазута концентрацию БАП рекомендуется определять по формулам, учитывающим механический недожог ( $q_4$ ) и тепловое напряжение топочной камеры ( $q_v$ ).

Для твердых топлив нормативными документами [11] выбросы БАП предлагается определять по линейным зависимостям от низшей теплоты сгорания топлива ( $Q_n^p$ ), коэффициента избытка воздуха на выходе из топки ( $\alpha_t''$ ), нагрузки котла и КПД золоуловителя.

Заметим, что вышеуказанные методики [10; 11] в неполной мере соответствуют рассмотренным опытам, так как не учитывают аэродинамических процессов в топке. Для определения соответствия результатов опытов и методик [10; 11] были рассчитаны выбросы БАП применительно к рассматриваемым котлам, которые выявили большое отличие расчетных и опытных данных.

Из проведенного анализа следует, что методика [11] должна быть уточнена применительно к условиям вихревого сжигания введением дополнительного понижающего коэффициента. В этом случае концентрация БАП будет определяться формулой:

$$C'_{\text{БП}} = C_{\text{БП}} \cdot K_{\text{вг}}, \quad (1)$$

где  $C_{\text{БП}}$  — концентрация БАП, рассчитанная по методике [11];  $K_{\text{вг}}$  — коэффициент, учитывающий число и симметричность тангенциальных вводов дымовых газов (включенных пылесистем),  $K_{\text{вг}} \approx 0.1 \div 0.2$  при двух симметрично включенных п.с.,  $K_{\text{вг}} \approx 0.6$  при одной включенной п.с.,  $K_{\text{вг}} \approx 0.7$  при двух несимметрично включенных п.с.,  $K_{\text{вг}} \approx 1$  при отсутствии включенных п.с.

Расчеты по методике [11] с учетом формулы (1) показывают близкую сопоставимость расчетных и опытных значений выбросов БАП, в том числе в опыте 6, что также говорит о преимущественном образовании БАП уже при горении (а не в пылесистемах).

Указанные значения справедливы для рассмотренных условий сжигания и, конечно, должны быть уточнены для других топлив и технологий.

Воздействие подачи сушильных газов на выбросы  $\text{NO}_x$  определяется нагрузкой котла и расходом этих газов. При малых и средних нагрузках подача этих газов ниже пережима топки существенно уменьшает выбросы  $\text{NO}_x$  (см. опыты 7 и 9; 5 и 11 на рис. 5). При нагрузках более 250 т/ч воздействие подачи сушильных газов снижается.

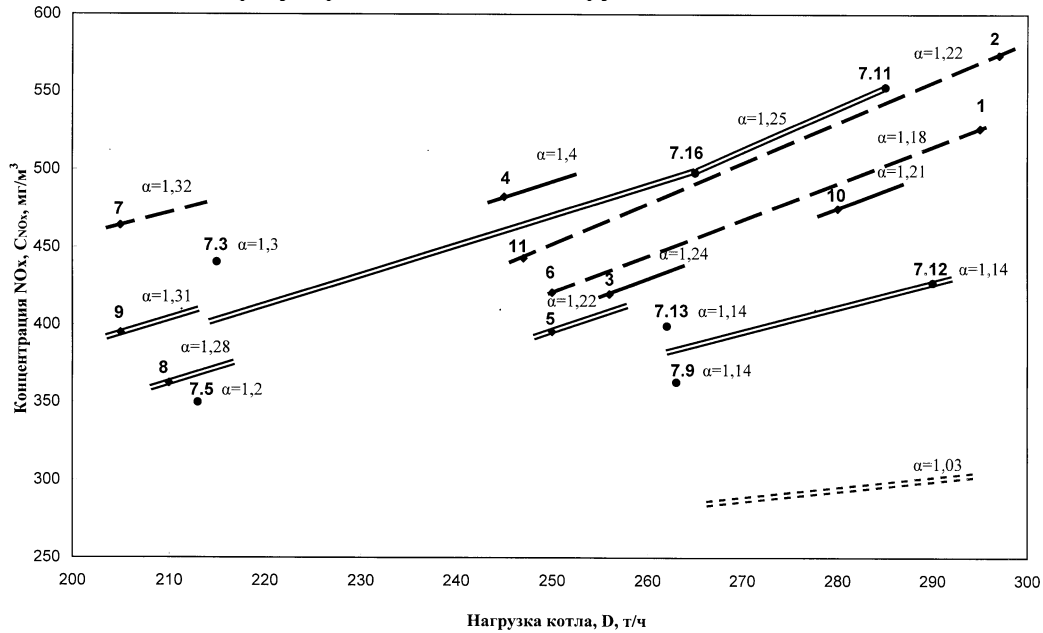
Уменьшение выбросов  $\text{NO}_x$  при малых и средних нагрузках из-за подачи сушильных газов, по мнению авторов, обусловлено образованием вихревого движения и обратного потока части газов в центральной зоне камеры горения [12]. Этот поток поступает в область основных горелок, где снижает температуру горения, концентрации реагирующих компонентов и, соответственно, генерацию  $\text{NO}_x$ . Величина обратного потока определяется расходами (скоростями) сушильных газов, создающих вращение. При сохранении числа включенных п.с. расход сушильных газов меняется незначительно, так как изменение сушильной производительности на ТЭЦ выполняется (с открытыми направляющими аппаратами мельничных вентиляторов) регулированием температуры этих газов, т. е. частичной заменой горячих газов (отбираемых из топки в п.с.) холодными (отбираемых за (из) конвективной шахтой котла в п.с.). Следовательно, при сохранении числа включенных п.с. и изменении нагрузки котла линейно меняется и расчетный расход газов (движущихся примерно поступательно), а расход сушильных газов (создающих в топке вращение) меняется не существенно. Отношение тангенциальной к поступательной составляющих скоростей (расходов) характеризует величину закрутки газов в топке [12]. По расчетам авторов, отношение указанных расходов ( $r_{\text{пс}}$ ) при одной включенной п.с. возрастает от 0.124 до 186 при уменьшении нагрузки с 300 до 200 т/ч. При включении двух п.с. приведенные значения  $r_{\text{пс}}$  при соответствующих нагрузках увеличатся в два раза. Таким образом, с ростом  $D$  обратный поток газов уменьшается, и выбросы  $\text{NO}_x$  в основном определяются не числом включенных п.с., а величиной  $\alpha_{\text{пп}}$ .

В завершение данной статьи постараемся совместить во многом разнонаправленные требования к технологиям камерного сжигания КАУ, позволяющие снизить выбросов и  $\text{NO}_x$  и БАП (с учетом других продуктов неполного горения).

1. Обеспечение высокой турбулизации процессов сжигания. Такая турбулизация на рассматриваемых котлах может быть обеспечена постоянной работой двух симметрично включенных п.с. (либо А и Б, либо В и Г). Это требование

может быть выполнено и на котлах с твердым шлакоудалением, оснащенных пылесистемами прямого вдувания с мельницами-вентиляторами (МВ) применением способа регулирования мощ-

ности котельного агрегата [13; 14], который предусматривает изменение числа работающих МВ и включение всех горелок котла при любых нагрузках.



**Рис. 5.** Концентрация оксидов азота  $\text{NO}_x$  в зависимости от нагрузки котла, числа включенных пылесистем и их сочетания, избытка воздуха (==== — в топку подаются газы от двух пылесистем; — — — — в топку подаются газы от одной пылесистемы; - - - — в топке отсутствует подача сушильных агентов; = = = — характеристика, полученная интерполяцией для режима с двумя симметрично включенными пылесистемами)

2. Организация ступенчатого сжигания угля. Для исключения шлакования поверхностей нагрева в котлах с жидким шлакоудалением необходимо обеспечивать значение  $\alpha$  в камере сгорания в диапазоне  $(1.05 \pm 0.05)$ . Известен зарубежный опыт эксплуатации котлов с жидким шлакоудалением типа КСГ с вертикальной циклонной топкой [15], конструкция которой во многом близка к рассматриваемой в данной статье. Указанные топки характеризуются работой с малым коэффициентом расхода воздуха ( $\alpha_r = 1.05 \div 1.1$ ). Снижение  $\alpha$  ниже указанных значений может быть опасным из-за шлакования поверхностей нагрева. Часть окислителя ( $\Delta\alpha \approx 0.2$ ) при необходимости надо направлять в среднюю или верхнюю зоны камеры. Авторы полагают, что при такой ступенчатой подаче воздуха удастся избежать шлакования поверхностей нагрева в камере охлаждения, поскольку в ней избыток воздуха поднимется до 1.2. Это предположение, конечно, требует экспериментальной проверки.

На котлах с твердым шлакоудалением  $\alpha$  в области горелок должен быть существенно меньше единицы [16], а на выходе из топочной камеры — больше ( $\alpha''_{\text{min}} \approx 1.2$ ). Для интенсификации турбулизации процессов сжигания ступенчатый ввод окислителя или топлива следует осуществлять тангенциально к воображаемой окружности.

3. Регулирование температуры горения при колебаниях качества угля (химического и количе-

ственного состава минеральной части, влажности и других характеристик) вводом в область горелок части дымовых газов или водяных паров. Это регулирование снизит как генерацию  $\text{NO}_x$ , так и процессы шлакования в топке. Ввод указанных газов может быть ограничен производительностью дымососов котла.

Представленные требования во многом знакомы специалистам-энергетикам, однако необходимо и целесообразно их совмещение в одном котельном агрегате.

Реализация этих требований позволит снизить высокие выбросы загрязнителей ( $\text{NO}_x$ ), в частности, при сжигании КАУ малых месторождений (отмеченные выше). Увеличение выбросов при сжигании этих углей обусловлено повышением температур в топке, которые, в свою очередь, определяются качеством и количеством минеральной части топлива. Анализ зависимостей на рис. 5 показывает, что снижение  $\alpha$  в топке приблизительно на 0.1 снижает  $\text{NO}_x \approx$  на  $100 \text{ мг/м}^3$ , что позволяет интерполировать (примерно) значение  $\text{NO}_x$  (при  $\alpha = 1.03$  и  $D = 300 \text{ т/ч}$ )  $\approx 300 \text{ мг/м}^3$ . При этих значениях  $\alpha$  топки и работе двух симметрично включенных п.с. выбросы БАП возрастают несущественно (см. рис. 4), а при подаче дополнительного воздуха в камеру охлаждения могут в ней даже снизиться.

## Выводы.

1. Тангенциальный ввод дымовых к воображаемой окружности ниже пережима топки турбулизует движение газов и снижает выбросы и бенз(а)пирена и оксидов азота. Выбросы  $\text{NO}_x$  при этом снижаются из-за падения температуры факела, достигаемого образованием вторичного вихря от указанной окружности к ядру факела.

2. Снижение химического и механического недожога, включая выбросы БаП может быть достигнуто следующими мероприятиями: турбулизация топочных газов, снижение нагрузки котла, симметричное включение горелок, обеспечение

оптимальных значений избытков воздуха и топины помола. Наиболее значимо из этих мероприятий снижает выбросы БаП турбулизация топочных газов, достигаемая вышеуказанным тангенциальным и симметричным вводом дымовых газов.

3. Образование бенз(а)пирена происходит в основном в топочной камере, а не в пылесистемах.

4. При оценке выбросов БаП следует учитывать аэродинамические процессы в топке. В частности, при ориентировочных расчетах можно использовать формулу (1).

## Литература

- Будилов О.И., Заворин А.С. Опыт улучшения экологических характеристик тепловой электростанции. Томск: Красное знамя, 1994. 100 с.
- Будилов О.И., Корнев Н.В., Рожков М.А., Соколова Я.И. Снижение выбросов вредных веществ при сжигании Иршабородинского угля в виде пыли высокой концентрации // Изв. высш. учеб. заведений. Энергетика. 1991. № 1. С. 61–63.
- Gorban A.N., Kaganovich B.M., Filippov S.P., Keiko A.V., Shamansky V.A., Shirkalin I.A. Thermodynamic Equilibria and Extrema Analysis of Attainability Regions and Partial Equilibria. Springer, 2006. 282 p.
- Елсуков В.К. Комплексные исследования эффективности источников энергии в системах централизованного теплоснабжения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Иркутск, 2012. 40 с.
- Аникин А.Ю., Бояринцева Т.Е., Сидняев Н.И. Математическая модель осесимметричного вихревого движения // Наука и образование. 2012. № 2. С. 42.
- ОСТ 31.135-85. Метрологическое обеспечение. Методика выполнения измерений концентраций окислов азота фотокolorиметрическим методом в продуктах сгорания энергетических топлив. М.: Мингазпром, 1985. 22 с.
- ОСТ 34-70-681-84. Охрана природы. Атмосфера. Отбор проб на содержание бенз(а)пирена в продуктах сгорания энергетических топлив. М.: Союзтехэнерго, 1984. 9 с.
- Серант Ф.А., Устименко Б.П., Змейков В.Н. Исследования на изотермических моделях и огневом стенде особенностей аэродинамики, теплообмена и выгорания топлива в кольцевых топках // Горение органического топлива: материалы V Всесоюзной конф. (сент. 1984 г.). Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1985. Ч. 1. С. 195–199.
- Елсуков В.К. Термодинамический анализ экологических характеристик процессов сжигания природного газа // Теплоэнергетика. 2010. № 7. С. 75–80.
- Гаврилов А.Ф. Уменьшение вредных выбросов при очистке паровых котлов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 210 с.
- Методика расчета выбросов бенз(а)пирена в атмосферу паровыми котлами электростанций СО 153-34.02.316-2003 (РД 153-34.1-02.316-2003). М.: ОАО «ВТИ», 2007. 9 с.
- Сигал И.А. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. Л.: Недра, 1988. 312 с.
- Пиралишвили Ш.А., Поляев В.М., Сергеев М.Н. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / под ред. А.И. Леонтьева. М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. 412 с.
- Елсуков В.К. Повышение эффективности котельных установок и пылесистем, оборудованных мельницами-вентиляторами // Теплоэнергетика. 2007. № 9. С. 34–36.
- Пак Г.В., Елсуков В.К. Новые технологии регулирования вентиляционной производительности мельниц-вентиляторов // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 1. С. 127–131.
- Сидельковский Л.Н., Юрнев В.Н. Парогенераторы промышленных предприятий: учеб. для студентов вузов, обучающихся по спец. «Пром. теплоэнергетика». 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1978. 336 с.
- Серант Ф.А., Воронова Л.С., Остапенко В.Е. Опыт разработки и внедрения систем двух и трехступенчатого сжигания для снижения выбросов  $\text{NO}_x$  на пылеугольных котлах // Горение твердого топлива: сб. докл. VI Всерос. конф. (Новосибирск, 8–10 нояб. 2006 г.). Новосибирск: Изд-во Ин-та теплофизики СО РАН, 2006. Ч. 3. С. 263-271.

## References

- Budilov O.I., Zavorin A.S. Experience of improvement of ecological characteristics of thermal power plant. Tomsk: Krasnoe znamya, 1994. 100 p.
- Budilov O.I., Korenev N.V., Rozhkov M.A., Sokolova Y.A.I. Reduction of emissions of harmful substances at burning of Irsha-Borodino coal in the form of dust of high concentration // Proceedings of the higher educational institutions. Energy Sector Problems. 1991. № 1. P. 61–63.
- Gorban A.N., Kaganovich B.M., Filippov S.P., Keiko A.V., Shamansky V.A., Shirkalin I.A. Thermodynamic Equilibria and Extrema Analysis of Attainability Regions and Partial Equilibria. Springer, 2006. 282 p.
- Elsukov V.K. Comprehensive studies of the efficiency of energy sources in Central heating systems: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk. Irkutsk, 2012. 40 p.
- Anikin A.YU., Boyarinceva T.E., Sidnyaev N.I. Mathematical model of axisymmetric vortex motion // Science and Education. 2012. № 2. P. 42.
- OST 31.135-85. Metrological support. Methods for measuring the concentrations of nitrogen oxides by the photocolometric method in the combustion products of energy fuels. M.: Mingazprom, 1985. 22 p.
- OST 34-70-681-84. Nature protection. Atmosphere. Sampling for the content of Benz(a)pyrene in the combustion products of energy fuels. M.: Soyuztekhenergo, 1984. 9 p.
- Serant F.A., Ustimenko B.P., Zmejkov V.N. Research on isothermal models and fire stand of the features of aerodynamics, heat transfer and fuel burnout in ring furnaces // Gorenje organicheskogo topliva: materialy V Vsesoyuznoj konf. (sent. 1984 g.). Novosibirsk: ITF SO AN SSSR, 1985. CH. 1. P. 195–199.
- Elsukov V.K. Thermodynamic analysis of environmental characteristics of natural gas combustion processes // Thermal Engineering. 2010. № 7. P. 75–80.
- Gavrilov A.F. Reduction of harmful emissions when cleaning steam boilers. M.: Energoatomizdat, 1990. 210 p.
- Methodology for calculating emissions of Benz(a)pyrene into the atmosphere by steam boilers of power plants CO

- 153-34. 02. 316-2003 (RD 153-34.1-02.316-2003). M.: OAO «VTI», 2007. 9 p.
12. Sigal I.A. Protection of the air basin when burning fuel. L.: Nedra, 1988. 312 p.
  13. Piralishvili S.H.A., Polyayev V.M., Sergeev M.N. Vortex effect. Experiment, theory, technical solutions / pod. red. A.I. Leont'eva. M.: UNPC «Energomash», 2000. 412 p.
  14. Elsukov V.K. Improving the efficiency of boiler installations and vacuum systems equipped with fan mills // Thermal Engineering. 2007. № 9. P. 34–36.
  15. Pak G.V., Elsukov V.K. New technologies for regulating the ventilation performance of mill fans // Systems. Methods. Technologies. 2010. № 1. P. 127–131.
  16. Sidel'kovskij L.N., YUrenev V.N. Steamgenerators of industrial enterprises: A textbook for University students studying in the specialty «Industrial heat power engineering»: ucheb. dlya studentov vuzov, obuchayushchihsya po spec. «Prom. teploenergetika». 2-e izd., pererab. i dop. M.: Energiya, 1978. 336 p.
  17. Serant F.A., Voronova L.S., Ostapenko V.E. Experience in developing and implementing two-and three-stage combustion systems to reduce NOx emissions on pulverized coal boilers // Gorenje tverdogo topliva: sb. dokl. VI Vseros. konf. (Novosibirsk, 8–10 noyab. 2006 g.). Novosibirsk: Izd-vo In-ta teplofiziki SO RAN, 2006. CH. 3. P. 263–271.