

УНИВЕРСАЛЬНАЯ МЕТОДИКА АУДИТА ЭМИССИИ ОКСИДОВ АЗОТА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТУ

Введение

Актуальность проблемы повышения экологической безопасности энергетических объектов, использующих углеводородные топлива, определяется возрастающими темпами потребления топливно-энергетических ресурсов [1]. Среди негативных воздействий данных объектов на окружающую природную среду чрезвычайно опасными являются выбросы оксидов азота (NO_x), относительная токсичность которых во много раз превышает токсичность оксида углерода и оксидов серы при чрезвычайно высоком уровне валовых выбросов и многовариантности их негативного проявления (прямого и косвенного). По прогнозам [2] к середине 20-х годов текущего столетия годовые глобальные валовые выбросы NO_x могут достичь уровня ~ 135 млн. т/год, что превышает соответствующий показатель середины прошлого столетия почти в 4 раза.

Технические сложности, имеющие место при разработке и реализации эффективных методов подавления эмиссии NO_x , определяются наличием различных механизмов образования оксидов азота (термические, топливные, быстрые и каталитические); недостаточной изученностью указанных механизмов (за исключением термического NO [3]); возможностью частичной трансформации оксида (NO) в диоксид (NO_2) и другие вредные выбросы; существованием множества факторов, воздействие которых на эмиссию NO_x является неоднозначным и во многих случаях непредсказуемым. Это особенно относится к условиям работы камер сгорания ГТУ и комбинированным на их основе энергоустановкам.

Постановка задач исследований

Разработка универсальной методики экологического аудита эмиссии NO_x , учитывающей совокупное воздействие множества определяющих режимных факторов: температуру, давление и коэффициент избытка окислителя, содержание кислорода в окислителе, удельную плотность тепловыделения топочно́го объема, температурный уровень в зоне горения, а также методы смесеобразования топлива и окислителя (диффузионное, предварительное и комбинированное) и способы «влажного» подавления эмиссии оксидов азота: с подачей экологического пара в топливо

или окислитель.

Основы методики аудита эмиссии оксидов азота

Предлагаемая методика аудита разработана на базе выводов термической теории образования оксида азота (NO) (в соответствии с механизмом Семенова-Зельдовича) [3, 4]. Основным выводом термической теории является возможность представления кинетического уравнения суммарной реакции образования данного оксида ($N_2 + O_2 = 2NO$) в виде дифференциального уравнения

$$dC_{NO} / d\tau = k([NO]^2 - C_{NO}^2), \tag{1}$$

где C_{NO} – текущая концентрация оксида азота (моль/м³) в фиксированный момент времени (τ , с); $k = k_{0(1)} \cdot C_{O_2}^{-0.5} \cdot \exp[-E_1 / (R_{\mu} \cdot T)]$ – константа скорости реакции образования оксида азота, значение которой определяется величиной предэкспоненциального множителя ($k_{0(1)}$), концентрацией кислорода в зоне реагирования (C_{O_2}) и термофизическим комплексом ($E_1 / R_{\mu} \cdot T$), в который входит: энергия активации (E_1 , Дж/моль·К), универсальная газовая постоянная газов ($R_{\mu} = 8,314$ Дж/моль) и температура протекания реакции (T , К); $[NO] = k_{0(2)} \cdot (C_{N_2} \cdot C_{O_2})^{0.5} \cdot \exp[-E_2 / R_{\mu} \cdot T]$ – равновесная концентрация оксида азота, определяемая для реакции первого порядка уравнением Аррениуса, которое содержит: $k_{0(2)}$ – предэкспоненциальный множитель, C_{N_2} – мольную концентрацию азота (моль/м³), а также термохимический комплекс, включающий энергию активации (E_2 , Дж/моль·К).

Кроме того, на основе термической теории образования NO устанавливается кинетическое уравнение равновесного времени образования оксида азота в виде соотношения $[\tau_{NO}] = 1/2k[NO]$, с помощью которого уравнение (1) можно представить в безразмерной форме

$$d\overline{NO} / dH_0 = 1 - \overline{NO}^2, \tag{2}$$

где $\overline{NO} = C_{NO} / [NO]$ – доля эмиссии оксида азота по отношению к равновесной при условии $\tau < [\tau_{NO}]$; $H_0 = \tau / 2[\tau_{NO}]$ – число гомотехности, которое определяет степень подвижности реакции образования NO.

С учетом начального условия $\overline{NO} = 0$ при нулевой подвижности реакции образования оксида азота, соответствующей $H_0 = 0$, интеграл уравнения (2) имеет вид $\overline{NO} = th(H_0)$, в том числе в области малой подвижности реакции $\tau / [\tau_{NO}] < 1$, что является характерным для большинства топливосжигающих устройств, данный интеграл можно представить в линейной форме $\overline{NO} \approx H_0$, что позволяет получить обобщенную формулу эмиссии NO в виде

$$C_{NO} \approx ([NO] / [\tau_{NO}]) \cdot \tau. \tag{3}$$

В уравнении (3) комплекс $[NO] / [\tau_{NO}] = r_{NO}$ определяет среднюю скорость образования NO в период равновесного времени $[\tau_{NO}]$, а текущее время пребывания (τ , с) горючей смеси в зоне образования оксида азота на основании теории размерности обратно пропорционально удельной плотности тепловыделения топочного объема q_v . Данный показатель имеет размерность (Вт/(м³·Па)), определяет теплоту, эквивалентную химической энергии топлива, выделившейся в единице объема зоны горения и отнесенную к единице давления (Па) в этой зоне, характеризует интегральное время образования NO, так как комплекс Вт/м³·Па тождественен по размерности с⁻¹, и оценивается соотношением

$$q_v = m_m \cdot Q_u (1 - 0,01 q_3) / (V_{m.o} p),$$

где m_m и Q_u – расход (кг/с) и теплота сгорания топлива (Дж/кг); q_3 – химическая неполнота сгорания топлива (%); $V_{m.o}$ и p – топочный объем (м³) и давление в зоне горения (Па).

Уравнение (3) с учетом кинетических характеристик, определяющих равновесные параметры $[NO]$ и $[\tau_{NO}]$, можно представить в развернутом виде, отображающем совокупное воздействие определяющих факторов на эмиссию NO:

$$C_{NO} \approx k_0 \cdot C_{N_2} \cdot C_{O_2}^{0.5} \cdot \exp[-E_{\phi} / RT] / q_v,$$

где $k_0 = 2 \cdot k_{0(1)} \cdot k_{0(2)}^2$ и $E = (E_1 - 2E_2)$ – предэкспоненциальный множитель и энергия активации интегральной кинетической характеристики эмиссии NO.

В приведенное уравнение входят мольные концентрации атмосферного азота и кислорода, что

затрудняет его практическое использование. Указанный недостаток можно устранить за счет перехода от мольных концентраций (C_{N_2} и C_{O_2}) к объемным долям (r_{N_2} и r_{O_2}), связь между которыми устанавливается в соответствии с уравнениями состояния: $C_{N_2} = r_{N_2} \cdot [p / (R_{(аз)} T_0)] \cdot N_A$ - для азота и $C_{O_2} = r_{O_2} \cdot [p / R_{(кис)} T_0] \cdot N_A$ - для кислорода, где p и T_0 - давление и температура окислителя; $R_{(аз)} = R_{\mu} / \mu_{аз}$ и $R_{(кис)} = R_{\mu} / \mu_{кис}$ - технические газовые постоянные азота и кислорода, N_A - число Авогадро.

Окончательный переход от объемных долей к режимным параметрам процесса горения, к которым относятся: начальная температура окислителя (T_0), объемная доля кислорода в окислителе (ψ), давление (p), коэффициент избытка окислителя (α) и эффективная температура в зоне горения ($T_{эф}$), осуществляется путем отображения объемной доли азота (r_{N_2}) в зоне реагирования через объемную долю кислорода (ψ) в окислителе и объемной доли кислорода в этой зоне через объемную долю кислорода в окислителе и коэффициент избытка воздуха в окислителе с помощью приближенных балансных соотношений: $r_{O_2} \approx \psi(\alpha - 1) / \alpha$ и $r_{N_2} \approx (1 - \psi)$

В результате этих преобразований обобщенное уравнение экологического аудита эмиссии оксидов азота получает вид:

$$NOx = k_0 \cdot \prod_{i=1}^k K_i \cdot \exp \left[-E_{эф} / (RT) \right], \quad (4)$$

где k_0 - предэкспоненциальный множитель, определяемый на основании соответствующей обработки результатов экологической диагностики состава продуктов сгорания топливосжигающего устройства, размерность которого определяется размерностью действующей концентрации оксида азота ($\text{ppm} \cdot \text{c}^{-1}$ или $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{c}^{-1}$);

$\prod_{i=1}^k K_i$ - произведение коэффициентов воздействий на уровень действующей концентрации

оксида азота, которые зависят от локальных определяющих эмиссию NO факторов, в том числе: $K_1 = K_T = q_V^{-1}$ - коэффициента воздействия времени пребывания;

$K_2 = K_{\psi} = \sqrt{(1 - \psi)^2 \cdot \psi}$ - коэффициента воздействия содержания кислорода в окислителе;

$K_3 = K_{T_0} = \sqrt{T_{н.у} / T_0}$ - коэффициента воздействия температуры окислителя (где

$T_{н.у} = 273 \text{ K}$); $K_4 = K_{\alpha} = \sqrt{(\alpha - 1) / \alpha}$ - коэффициента воздействия избытка окислителя;

$K_5 = K_p = \sqrt{p / p_{н.у}}$ - коэффициента воздействия давления (где $p_{н.у} \approx 10^5 \text{ Па}$).

Входящий в уравнение (4) комплекс $K_T = \exp \left[-E_{эф} / (RT) \right]$ определяет (в соответствии с законом Аррениуса) экспоненциальный характер воздействия температуры зоны горения (T) на уровень эмиссии оксида азота. Данный комплекс включает: эффективную энергию активации ($E_{эф}$, кДж/кг·К), которая, как и предэкспоненциальный множитель (k_0), определяется по результатам соответствующей экологической диагностики продуктов сгорания топливосжигающего устройства, техническую газовую постоянную оксида азота ($R \approx 0,277$, кДж/кг) и характеризует наиболее значимое воздействие температуры (T) на уровень эмиссии оксидов азота в сравнении с множеством остальных определяющих факторов $\{q_V, \psi, T_0, \alpha, p\}$.

Уровень температуры (T) в основном определяется совокупным множеством локальных факторов $\{\psi, T_0$ и $\alpha\}$, каждый из которых оказывает соответствующее компенсирующее воздействие на эмиссию оксида азота при изменении температуры зоны горения.

Кроме того, реальная температура (T) зависит от величины химической неполноты сгорания топлива (q_3) и степени адиабатичности процесса горения $\varphi = 1 - Q_{m.o} / Q_{m.в}$, где $Q_{m.o}$ и $Q_{m.в}$ соответственно, теплота, отведенная из зоны горения и подведенная в эту зону.

Характер компенсирующего влияния на эмиссию NO локальных факторов является неоднозначным, что видно из структуры выражений, определяющих соответствующие коэффициенты воздействия (K_i). Наиболее показательным является компенсирующий характер воздействия на уровень эмиссии NO коэффициента избытка воздуха $K_{\alpha} = \sqrt{(\alpha - 1) / \alpha}$ при $\psi = 0,21$

(рис. 1-а) и содержания кислорода в окислителе $K_{\psi} = \sqrt{(1-\psi)^2 \cdot \psi}$ при $\alpha = const$ (рис. 1-б).

В связи с тем, что изменение избытка воздуха (α) и содержания кислорода в окислителе (ψ) влечет за собой изменение основного, определяющего эмиссию NO , фактора – температуры реакционной зоны (T), совокупное воздействие указанных факторов следует рассматривать при соответствующих условиях однозначности.

В первом случае такими условиями однозначности являются: $K_p = const$ и $K_{T_0} \cdot K_{\psi} \cdot \exp[-E_{\psi\phi} / R \cdot T] = const$, а уровень значений коэффициента K_{α} (рис. 1-а) определяется диапазоном $1,0 \leq K_{\alpha} < \infty$, причем, условие $K_{\alpha} = 1,0$ соответствует отсутствию подачи топлива в зону горения.

Для характеристики $K_{\psi} = [(1-\psi)^2 \psi]^{1/2}$ условия однозначности имеют вид: $K_p = const$ и $K_{T_0} \cdot K_{\alpha} \cdot \exp[-E_{\psi\phi} / R \cdot T] = const$ и определяющий фактор ψ формально может изменяться в диапазоне значений $0 \leq K_{\psi} \leq 1,0$ (кривая А-В-С-D-Е на рис. 1-б). При этом, зависимость $K_{\psi} = f(\psi)$ имеет экстремальный характер и уровень содержания кислорода в окислителе, при котором достигается максимальное значение коэффициента воздействия K_{ψ}^{max} (точка D на рис. 1-б), при условии $dK_{\psi}/d\psi = 0$ соответствует значению $\psi_{экстр} \approx 0,33$.

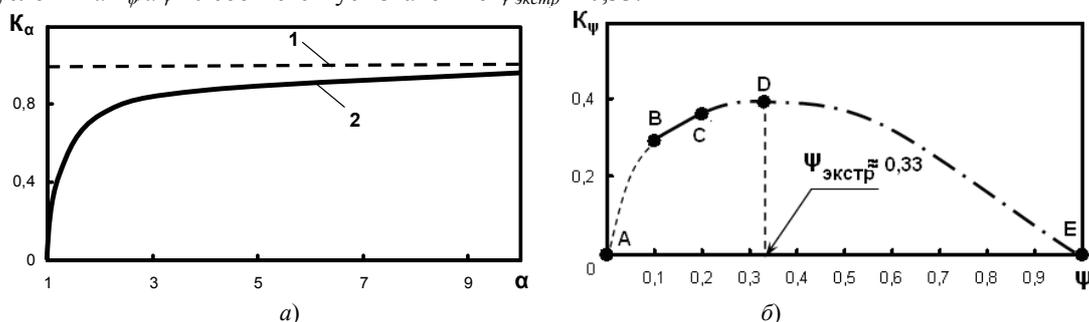


Рис.1. Влияние коэффициента избытка воздуха (а) и объемной доли кислорода в окислителе (б) на уровень локальных компенсирующих коэффициентов воздействия K_{α} и K_{ψ} при соответствующих условиях однозначности:

- 1 - $K_{\alpha} = f(\alpha)$ при $\alpha \rightarrow \infty$; 2 - $K_{\alpha} = f(\alpha)$ в диапазоне $1,0 < \alpha < \infty$;
- 3 - $K_{\psi} = f(\psi)$ в диапазоне $0 \leq \psi \leq 1,0$

Полученная оценка величины $\psi_{экстр}$ согласуется с одним из основных выводов термической теории образования NO , согласно которому равновесная концентрация оксида азота в пламени (при прочих равных условиях) пропорциональна комплексу $(C_{N_2} \cdot C_{O_2})^{0,5}$, максимальное значение которого и достигается при $\psi_{экстр} \approx 0,33$. С данным выводом согласуется и характер изменения коэффициента воздействия K_{ψ} при изменении ψ по обе стороны от точки экстремума «D», что объясняется действием противоположных определяющих факторов:

- при $\psi < \psi_{экстр}$ определяющим является снижение концентрации кислорода в окислителе (вплоть до нулевого уровня);
- при $\psi > \psi_{экстр}$ определяющим является снижение концентрации атмосферного азота¹ (вплоть до нулевого уровня).

При рассмотрении реальных условий сжигания углеводородного топлива практический интерес представляет диапазон изменения ψ , определяемый на рис. 1-б кривой В-С-D-Е. При этом отрезок В-С соответствует условиям сжигания топлива в энергетических установках: точка С (при $\psi = 0,21$) при работе на чистом воздухе и точка В (при $\psi < 0,21$), соответствующая минимальной концентрации кислорода в забалластированном окислителе.

Диапазон изменения ψ , соответствующий сжиганию топлива в среде обогащенного кислородом окислителя (кривая С-D-Е на рис.1-б) соответствует работе установок энерготехнологического назначения (металлургические процессы и другие специальные технологии, требующие сжигания углеводородного топлива в среде воздуха, обогащенного кислородом).

Объект тестирования методики экологического аудита

Апробация методики экологического аудита проведена с использованием базы данных экологической диагностики топливосжигающих модулей, рабочий процесс которых основан на

применении трубчатой технологии сжигания газа [5].

Принцип работы трубчатых модулей основан на использовании специфических аэродинамических эффектов, возникающих в канале с внезапным расширением потока (насадка Борда) [5]. В табл. 1 представлены варианты трубчатых модулей, отличающиеся наличием (ТМДН и ТМК) или отсутствием дополнительной внутренней насадки (ТМД, ТМП и ТМДК), а также способом смесеобразования топлива и окислителя: с диффузионным (ТМД, ТМДН и ТМДК), предварительным (ТМП) и комбинированным (ТМК) смесеобразованием.

Таблица 1

Варианты одиночных трубчатых топливосжигающих модулей с диффузионным, предварительным и комбинированным смесеобразованием

Тип и конфигурация проточного канала трубчатых модулей				
ТМД	ТМДН	ТМП	ТМК	ТМДК

Во всех случаях подвод окислителя в зону горения осуществлялся по центральному цилиндрическому каналу диаметром $d_0=36$ мм при наружном диаметре канала насадки Борда $D=69$ мм.

Подвод топлива в зону горения в модулях ТМД и ТМДН осуществлялся дискретно системой газовых отверстий диаметром $d_1=3$ мм, размещенных на торцевой стенке канала с внезапным расширением. В модуле с предварительным смесеобразованием (ТМП) подвод топлива осуществлялся с помощью системы газовых отверстий того же диаметра в воздушный канал насадки Борда. В модуле с комбинированным смесеобразованием (ТМК) подача топлива осуществлялась двумя системами отверстий диаметром $d_1=3$ мм, размещенных на торцевой стенке канала с внезапным расширением и по окружности стенки воздушного канала. Рабочий процесс модуля ТМДК основан на коаксиальном подводе топлива (по кольцевому каналу высотой 3 мм) и окислителя (цилиндрическим воздушным каналом $d_0=36$ мм).

При проведении экологической диагностики трубчатых модулей фиксировались для каждого модуля индивидуальные эмиссионные характеристики $NOx=f(\alpha)$ при постоянном расходе воздуха, фиксированном давлении и температуре воздуха и переменном расходе топлива в диапазоне устойчивого стабильного процесса сжигания топлива. На рис. 2 в качестве примера отображены индивидуальные характеристики эмиссии оксидов азота, отвечающие различным условиям испытаний для трубчатых модулей с диффузионным смесеобразованием (ТМД, см. табл. 1): при «сухом» и «влажном» горении. В последнем случае реализовано два варианта подачи сухого насыщенного пара в зону горения: путем непосредственного его смешивания с воздухом или на основе добавки пара к газовому топливу при близком уровне относительной подачи пара $d_{II}=m_n/m_0$, где m_n и m_0 , соответственно, массовые расходы (кг/с) подаваемого в зону горения экологического пара и воздуха, причем, в зависимости от типа применяемого газоанализатора концентрация оксидов азота измерялась в ppm (part pro million) или в mg/m^3 . При окончательном анализе полученных данных концентрация в единицах ppm пересчитывалась mg/m^3 в соответствии с соотношением $1 \text{ ppm} \approx 2,05 \text{ mg/m}^3$.

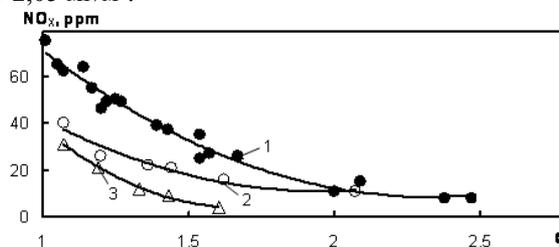


Рис. 2. Индивидуальные эмиссионные характеристики $NOx = f(\alpha)$ продуктов сгорания трубчатого модуля с диффузионным смесеобразованием:

- 1 – «сухое» горение; 2 – горение с увлажнением воздуха при $d_{II} \approx 0,045$;
- 3 – горение с увлажнением топлива при $d_{II} \approx 0,042$

Каждая из приведенных на рис. 2 характеристик $NOx=f(\alpha)$ отображает совокупное воздействие

определяющих факторов (при заданных условиях однозначности), среди которых определяющими в данных условиях являются: коэффициент избытка воздуха (α), зависящая от α и химического недожога топлива (q_3) температура зоны горения (T), а также время пребывания (τ), величина которого (при фиксированном расходе воздуха) определяется расходом топлива.

Результаты тестирования методики экологического аудита

В основу реализации методики экологического аудита положено использование приведенной к однозначным условиям концентрации оксидов азота:

$$NOx^{mp} = NOx / \prod_{i=1}^5 K_i,$$

где NOx – суммарная концентрация NO и NO_2 ; что позволяет представить обобщенное уравнение эмиссии в виде экспоненциального соотношения

$$NOx^{mp} = k_0 \cdot \exp\left[\frac{E_{эф}}{R T}\right]$$

и реализовать процедуру линеаризации индивидуальных эмиссионных характеристик посредством представления их в логарифмической форме :

$$\ln NOx^{mp} = \ln k_0 - E_{эф}/(R \cdot T). \tag{6}$$

При использовании линеаризованного уравнения эмиссии оксидов азота (6) появляется возможность определения по результатам экологической диагностики кинетических показателей эмиссии ($\ln k_0$) и ($E_{эф}$) в зависимости от характера воздействия температуры процесса (T) на приведенную концентрацию оксидов азота (NOx^{mp}). При этом, температура T рассматривается как калориметрическая (без учета диссоциации продуктов сгорания).

Возможности использования способа линеаризации индивидуальных характеристик эмиссии оксидов азота для трубчатого модуля ТМД при «сухом» и «влажном» горении показаны на рис. 3 в диапазоне относительных подач пара $d_n \approx 0,018 \dots 0,045$ (при увлажнении воздуха) и $d_n \approx 0,016 \dots 0,042$ (при увлажнении топлива).

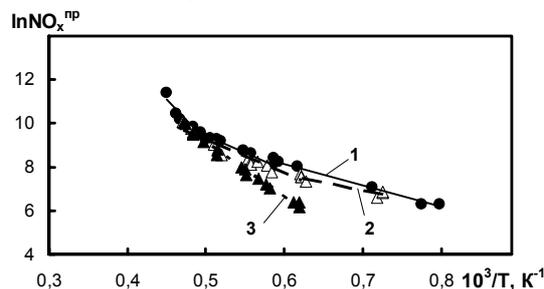


Рис. 3. Результаты линеаризации характеристик эмиссии оксидов азота при сухом и влажном горении для модуля ТМД:

- 1 – «сухое» горение;
- 2 – «влажное» горение с увлажнением воздуха при изменении относительной подачи пара в диапазоне $d_n \approx 0,018 \dots 0,045$;
- 3 – влажное сжигание с относительной подачей пара в топливо в диапазоне $d_n \approx 0,016 \dots 0,042$

Обращает на себя внимание достаточно высокая корреляция данных, касающихся уровня приведенного показателя NOx^{mp} , во всем диапазоне изменения температурного фактора и степени увлажнения $0 \leq d_n < 0,045$ при «сухом» и «влажном» горении (с подачей экологического пара в воздух), а также в высокотемпературной зоне ($T > 2000$ К) при степени увлажнения и степени увлажнения $0 \leq d_n < 0,042$ (при подаче экологического пара в топливо). При этом в низкотемпературной зоне ($T < 2000$ К) эффект от увлажнения пара в направлении подавления эмиссии NOx более значим в сравнении с вариантом увлажнения воздуха.

Кусочно-линейная конфигурация эмиссионных характеристик в координатах $\ln NOx^{mp} - 10^3/T$ определяется изменением структуры зоны горения в связи с изменением ее температурного уровня, а, следовательно, и коэффициента избытка воздуха (α), а также появлением химической неполноты сгорания в зонах низких ($\alpha \rightarrow 1,0$) и высоких ($\alpha > 1,8$) избытков окислителя. Отмеченные обстоятельства предполагают кусочно-линейную экстраполяцию результатов экологической диагностики продуктов сгорания, что подтверждается результатами статистической обработки эмиссионных характеристик в координатах $\ln NOx^{mp} - 10^3/T$ для всех типов трубчатых модулей при

«сухом» сжигании природного газа и использовании в качестве окислителя воздуха и иллюстрируется приведенными на рис.4 линейризованными эмиссионными характеристиками.

Как видно из рис.4, в исследованном диапазоне действия «температурного» фактора $0,45 \leq 10^3/T \leq 0,81$ обнаружены три характерные области влияния на уровень эмиссии NO_x : низко-, средне- и высокотемпературная. Кинетические константы обобщенных эмиссионных характеристик тестированных модулей при «сухом» горении, а также модуля ТМД при «влажном» сжигании с подачей пара в воздух - вариант ТМД(вл1) и с увлажнением топлива – вариант ТМД(вл2) приведены в табл. 2.

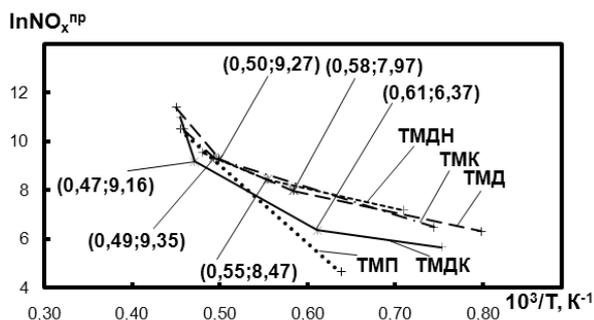


Рис. 4. Линейризация обобщенных индивидуальных характеристик эмиссии оксидов азота в $lnNO_x^{np}$ – $10^3/T$ координатах для тестированных типов трубчатых модулей (при «сухом» горении)

Таблица 2

Зоны линейризованных областей обобщенных характеристик эмиссии NO_x и соответствующие значения кинетических констант ($E_{эф}$) и (lnk_0)

Тип модуля	Зоны линейризованных областей характеристик эмиссии NO_x								
	1			2			3		
	103/T	$E_{эф}$	lnk_0	103/T	$E_{эф}$	lnk_0	103/T	$E_{эф}$	lnk_0
	К-1	кДж/кг	-	К-1	кДж/кг	-	К-1	кДж/кг	-
ТМД	0,45	10,37	27,94	0,50	4,29	17,17	0,58	2,69	13,9
ТМД(вл1)	0,58	4,28	16,96	0,62	1,94	11,82	-	-	-
ТМД(вл2)	0,57	6,89	21,56	-	-	-	-	-	-
ТМДН	0,48	4,15	16,73	0,55	2,32	13,16	-	-	-
ТМК	0,46	8,10	24,0	0,49	3,39	15,58	-	-	-
ТМП	0,48	9,21	25,87	-	-	-	-	-	-
ТМДК	0,45	27,41	56,01	0,47	5,58	18,67	0,61	1,38	9,42

При анализе данных табл.2 установлена принадлежность кинетических констант lnk_0 и $E_{эф}$ к общей генеральной выборке, что иллюстрируется результатами регрессионного анализа, отображенными на рис. 5.

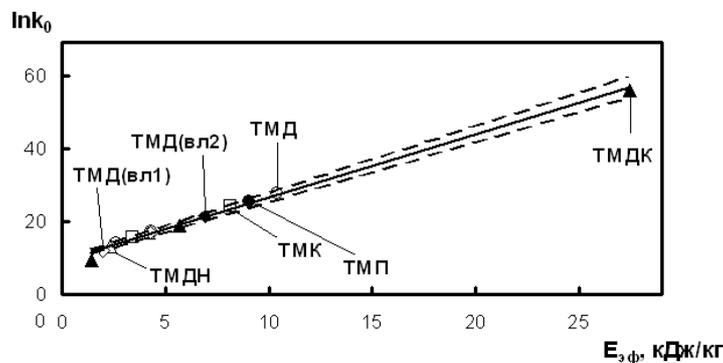


Рис. 5. Корреляция между кинетическими константами для трубчатых модулей

Соотношение между кинетическими константами при степени корреляции $R=0,99$ описывается уравнением регрессии:

$$\ln k_0 = 9,7 + 1,822 \cdot E_{зф} \pm 0,582.$$

Выводы

1. На основе термической теории образования NO разработана методика экологического аудита топливосжигающих устройств, позволяющая выявить основные определяющие эмиссию оксидов азота режимные факторы: температуру (T_0), давление (p) и коэффициент избытка окислителя (α), концентрацию кислорода в окислителе (ψ), время пребывания в топочном объеме (τ) и температурный уровень (T) в зоне горения.
2. Применение приведенной к однозначным условиям концентрации оксидов азота $NOx_{пр} = NOx / (KT_0 \cdot Kp \cdot K\alpha \cdot K\psi \cdot K\tau \cdot KT)$ позволяет осуществить линеаризацию эмиссионных характеристик, что упрощает проведение экологического аудита на основе кусочно-линейной аппроксимации результатов диагностики состава продуктов сгорания.
3. В результате выполненного тестирования результатов экологической диагностики состава продуктов сгорания различных типов трубчатых модулей установлено: определяющее воздействие на уровень эмиссии NOx температурного фактора ($103/T$), наличие трех характерных зон воздействия данного фактора на эмиссию оксидов азота (низко-, средне- и высокотемпературной), слабое воздействие методов смесеобразования и увлажнения зоны горения на уровень эмиссии NOx в высокотемпературной зоне и форсированное подавление эмиссии оксидов азота в среднетемпературной зоне горения при «влажном» горении в случае подачи пара в топливо.
4. Разработанная методика может быть использована для аудита топливосжигающих устройств широкого назначения.

Литература

1. Любчик Г.Н., Варламов Г.Б.. Ресурсные и экологические проблемы глобального и регионального энергопотребления // Энергетика и электрификация. - 2002, №2. - С. 35 – 47.
2. Клименко В.В., Терешин А.Г. Эмиссия оксидов азота из антропогенных источников: воздействие на атмосферу и климат. История и прогноз до 2100 г. // Теплоэнергетика. - 1999. - №12. - С. 57-61.
3. Зельдович Я.Б., Садовников Л.Н., Франк-Каменецкий Д.А. Окисление азота при горении. М. – Л.: АН СССР. - 1947. - 147 с.
4. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. - М.: ГИЗ физ.-мат. литературы. – 1963. - 632 с.
5. Г.Н. Любчик, Г.А. Микулин, Г.Б. Варламов и др. Использование конструктивных особенностей и аэродинамических эффектов насадки Борда при создании малотоксичных топливосжигающих модулей // Технологические системы. - № 2 (13)/2002, Выпуск 1. - С. 130 – 133.