

Ж.А.Айдымбаева¹, Ж.С.Дуйсенбек¹, А.М. Достиярова²,
Б.А. Биахметов³, П.А.Верницкас¹

¹ Алматинский университет энергетики и связи имени Г.Даукеева, Алматы, Казахстан

² Академия логистики и транспорта, Алматы, Казахстан

³ Казахский аграрно-технический университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан

E-mail: diararu@mail.ru

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТУ

Аннотация. За последнее время предпринималось много попыток зарождения модели процесса горения в камере сгорания ГТУ, способствующую прогнозировать характеристики выбросов. На сегодня в литературе представлено много систем расчета уровня выбросов NO_x из камер сгорания, которые разной сложности, применимости и строгости. Применяемая модель образования загрязняющих веществ должна представлять собой разумное решение между погрешностью моделирования, практичностью, удобством применения, экономичностью вычислений и возможностью дальнейшего совершенствования.

По мере модернизации моделей физических процессов и строгости численных методов расчета аналитические модели будут представлять все более важную роль при проектировании и доводке камер сгорания, в частности, сейчас эффективно используются пакет программ Ansys fluent. Для описания процесса горения в камере сгорания ГТУ, чем и пользуемся.

Ключевые слова. Камера сгорания, ГТУ, оксиды азота, горелочное устройство, время пребывания, механизм Зельдовича, коэффициент избытка воздуха.

Введение.

К самым простым моделям расчета уровней выбросов NO_x в существующих условиях, и прогнозирования выбросов в условиях отличных от расчетных принимаются эмпирические зависимости. Чтобы довольно строго рассчитывать скорость образования оксидов азота в продуктах сгорания топлива в газотурбинных двигателях, необходимо принимать главные физические и химические механизмы, действующие в процессе их образования. На эти механизмы основное влияние проявляют температура газа в камере сгорания, концентрация химических компонентов и время пребывания в зоне горения. Кроме того, химическая кинетика процессов формирования оксида азота достаточно ощущаема к температуре, - с повышением температуры скорость образования оксида азота возрастает. $\text{NO}_x = f(T, \alpha, \tau, p)$. Вместе с тем часть уравнения и параметры входящие в них дают разного рода оценку влияния отдельных параметров на выбросы NO_x . Так влияние давления на выход NO_x воспринимается значением от $P^{0.5}$ до $P^{1.5}$, влияние температуры довольно и неопределенно оценивается в уравнениях, в некоторые выражения не входит время пребывания τ , неоднозначно влияние соотношения топливо-воздух. Многочисленный расход воздуха входит не во все уравнения, в некоторых выражениях присутствуют дополнительные параметры. Понятно, что координация параметров неоднозначна и связь представленных уравнений не проста, но ограниченность параметров и простота уравнений привлекательны для применения их при оценке возможных выбросов NO_x в предварительных расчетах. Следует отметить, что применение этих уравнений ограничено конкретными типами камер сгорания ГТД, при

применении данных уравнений для камер других типов двигателей следует вводить поправки. Эти зависимости не учитывают физических процессов, проходящих в камере сгорания, так как входные параметры не показывают ни схемы, ни геометрии камеры сгорания, а также используемый метод сжигания топлива, не иначе как процессы, происходящие в камере сгорания определяют в значительной степени выброс оксидов азота. Расчеты, проведенные в [1] показали, что применение простых уравнений позволяет описать выход NO_x в общепринятых камерах с погрешностью до 30 %, большая строгость едва ли возможна, если не включить в уравнения значительно более строгое рассмотрение рабочего процесса протекающего в камерах сгорания. Кроме того, эмпирические соотношения не позволяют проследить, как меняется эмиссия при изменении конструкции фронтального устройства или самой камеры сгорания. В особенности обычной физической моделью камеры сгорания является представление ее в виде реактора или группы реакторов полного перемешивания (гомогенных реакторов), которые описывают собой область, где топливо и воздух образуют гомогенную смесь, то есть в любой точке реактора идентичны температура, давление, химический состав. Характеристики камеры сгорания формируются из химической кинетики.

Материалы и методы.

В работе [2] предложен метод расчета NO_x в явном виде с использованием трех реакторов с полностью перемешанными реагентами. Основным источником оксидов азота является второй реактор, в котором образование NO идет по механизму Зельдовича. Получено уравнение:

$$EINO_x = A\tau_{эфф}\sqrt{P_g}\exp(-c\Delta T_g + \frac{D}{T_g}(\varphi - \varphi_a^{\max})^2), \quad (1)$$

где

$\tau_{эфф} = \frac{\tau}{1+B\tau}$ - эффективное время пребывания; B - поправочный коэффициент;

$\tau = \frac{V_p P_p}{G_p^p RT_a}$ - время пребывания в реакторе;

A, C, D - коэффициенты.

Температура пламени в данной работе представлена в виде параболической аппроксимации, зависящей от эквивалентного соотношения и температуры воздуха на входе в камеру сгорания:

$$\frac{1}{T_a} = \frac{1}{T_a^{\max}} \left[1 - \frac{a}{T_a^{\max}} \Delta T_g + \frac{c}{T_g} ((\varphi - \varphi_a^{\max})^2) \right], \quad (2)$$

T_a^{\max} - максимальная адиабатная температура;

φ_a^{\max} - эквивалентное соотношение, соответствующее этой температуре.

Введение поправки B в уравнении для $\tau_{эфф}$ связано с завышением результатов при определении NO_x при больших временах пребывания.

Анализ использования чисто кинетических моделей показывает, что эти модели обладают следующими основными недостатками:

- расчетные значения температуры газа в первичной зоне и выхода оксидов азота являются завышенными (это в большей степени касается камер сгорания традиционной схемы);

– модели не объясняют влияния на характеристики процесса горения потерь давления и других факторов, оказывающих влияние на процесс смешения;

– не существует подробных оценок влияния на результаты расчета исключения из модели холодных зон охлаждающего воздуха и наличия ядра потока, не перемешанного с потоками вторичного и разбавляющего воздуха.

Так реактор с неполным микросмешением представляет собой статистическую модель смешения в первичной зоне, в объеме реактора содержатся отдельные объемы газа, малые по сравнению с реактором, но большие относительно молекулярного масштаба. Состав смеси в этих объемах различен, объемы газа не перемешиваются и рассматриваются как гомогенные реакторы, время пребывания каждого объема распределяется по закону распределения времени пребывания газа в гомогенном реакторе. Известны когда анализируются различные модели первичной зоны, в частности гомогенный реактор и реактор с неполным смешением. Реактор с неполным смешением имеет лучшее согласие с экспериментом, что подтверждает целесообразность моделей подобного типа.

Необходимо подчеркнуть, что из-за трудности течения газа в первичной зоне камеры сгорания при значительной не сходимости температуры и состава газа, а также из-за недостаточного уровня наших знаний о характеристиках турбулентности, в настоящее время не обосновано использование сложных интегральных моделей, включающих в себя большое число реакторов, тем более, что вопрос выбора числа и размеров реакторов требует специального исследования. Необходимо увеличение простых объединенных моделей процесса горения в камере, начиная с моделирования процесса в первичной зоне.

В работе [3] предложена модель для нахождения выхода NO_x с учетом параметра смесеобразования. Согласно модели, расчет состава продуктов сгорания проводится с учетом того, что горение топлива возможно лишь в диапазоне концентрационных границ горения $\alpha_n < \alpha < \alpha_n$, а при α выходящем за указанные пределы происходит балластированные смеси и снижение температуры. Считается, что распределение концентрации смеси подчиняется нормальному закону:

$$f(\alpha) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\alpha - \alpha_0)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3)$$

где α_0 – заданное значение коэффициента избытка воздуха.

$$P(|\alpha - \alpha_0| < \Delta\alpha) = \Phi\left(\frac{\Delta\alpha}{\sigma\sqrt{2}}\right), \quad (4)$$

где $\Delta\alpha = \pm 0,05$ и $1-P = \Theta$,

где Θ - параметр смесеобразования.

Тогда получим уравнение:

$$\text{NO}_{\Theta} = 37 \cdot 10^{11} \sqrt{O_{2\Theta}} N_{2\Theta} \exp(-127000/RT_{\Theta}) \sqrt{\frac{P}{T_{\Theta}}} \tau, \quad (5)$$

где концентрации компонентов и температура горения находились с учетом параметра смесеобразования.

Было произведено испытание определить влияние конструкции горелочного устройства на смесеобразование в камере сгорания и выход оксидов азота. Поэтому

предложен параметр $\bar{\chi}$, с помощью которого можно оценивать степень незавершенности процесса смешения в горелочных устройствах. Он пригоден для оценки качества смешения, как в изотермических условиях, так и при горении. Параметр $\bar{\chi}$, характеризующий степень незавершенности смешения, определяется по выражению:

$$\bar{\chi} = \frac{1}{2G} \sum \frac{c_i - c_{cp}}{c_{cp}(1 - c_{cp})} (\omega \rho f)_i, \quad (6)$$

где G - общий расход газовой смеси;
 c_{cp} и c_i - средняя и локальная массовые концентрации смеси;
 $(\omega \rho f)_i$ - расход смеси через элементарную площадку f_i .

Следует, однако, отметить, что $\bar{\chi}$ - интегральный параметр, который характеризует неравномерность концентрации в целом и не может учитывать локальных распределений концентраций. Параметр дает наиболее объективную оценку для сечений, достаточно удаленных от горелки, для образования же оксидов азота важны сечения начиная непосредственно от горелки и поэтому $\bar{\chi}$ не очень подходит для учета смесеобразования при образовании NO_x . На наш взгляд процесс смешения газа и воздуха играет важную роль, так как и температура, и давление, и время пребывания продуктов сгорания прямо или косвенно зависят от распределения воздуха, степени его перемешивания, а также давления и скорости воздуха.

Так для определения насыщенности оксидов азота устанавливается коэффициент k_f отражающий влияние равномерности раздачи топлива по сечению камеры сгорания и который меняется в зависимости от конструкции и способа подачи топлива от 0,3 до 1,05. Получена пробная зависимость:

$$k_f = \psi(f_i); \quad \text{где} \quad f_i = \frac{\sum_{i=1}^n F_i B_i}{F_{пл} B_r},$$

F_i - площадь охвата струями топливного газа;
 B_i - расход газа за данную площадь;
 $F_{пл}$ - площадь фронтального устройства;
 B_r - общий расход газа.

На основании вышеизложенного предложена методика для определения NO_x с учетом равномерности распределения коэффициента избытка воздуха и структуры потока в первичной зоне, основанная на условии химического равновесия и кинетической схеме Зельдовича:

$$C_{NO} = Af(\alpha_2) \exp(-65000/T_{эф}) \sqrt{\frac{P}{T_{эф}}} \tau_{пр} k', \quad (7)$$

где $T_{эф} = T_a \cdot \Theta$.

$$f(\alpha_2) = k \left[\frac{(\alpha_2 - 1) \alpha_2^{2(1+m)} L_0^3}{(1 + \alpha_2 L_0)^3} \right]^{0.5}; \quad (8)$$

$m = 1,4 \dots 1,7$, k - константы, определяемые по результатам эксперимента;

$$\tau_{пр} = \tau_{пр} + n \cdot (\tau_{пр} + \tau_{ЗОТ}),$$

где $\tau_{np} = \frac{V_{np}}{G_{np}}$ - время пребывания в прямом токе;

V_{np} – объем первичной зоны за вычетом зоны обратных токов;

G_{np} - объемный расход газа через зону прямого тока;

где $\tau_{зот} = \frac{V_{зот}}{G_{зот}}$ - время пребывания в зоне обратных токов;

$V_{зот}$ – объем зоны обратных токов;

$G_{зот}$ - объемный расход газа через зону обратных токов;

n – коэффициент рециркуляции.

Аналогичный подход при определении времени пребывания принят в работах [4,5]:

$$\tau_{np} = \frac{273 \cdot 10^3 \xi}{q_v T_z V_z^{no} \alpha_z (r+1)}, \quad (9)$$

где ξ - коэффициент заполнения топочного объема;

q_v - тепловое напряжение объема зоны горения;

T_z - средняя расчетная температура в зоне горения;

V_z^{no} - удельный приведенный объем газов 0,3...0,35 м³/МДж.

В ряде работ сделана попытка определить влияние механизма горелочного устройства на смесеобразование в камере сгорания и выход оксидов азота. Так предложен параметр $\bar{\chi}$, с помощью которого можно оценивать степень незавершенности процесса смешения в горелочных устройствах. Параметр $\bar{\chi}$, характеризующий степень незавершенности смешения, определяется по выражению:

$$\bar{\chi} = \frac{1}{2G} \sum \frac{c_i - c_{cp}}{c_{cp} (1 - c_{cp})} (\omega \rho f)_i, \quad (10)$$

где G - общий расход газовой смеси;

c_{cp} и c_i - средняя и локальная массовые концентрации смеси;

$(\omega \rho f)_i$ - расход смеси через элементарную площадку f_i .

Однако параметр дает наиболее объективную оценку для сечений, достаточно удаленных от горелки, для образования же оксидов азота важны сечения начиная непосредственно от горелки и поэтому $\bar{\chi}$ не очень подходит для учета смесеобразования при образовании NO_x.

Результаты.

Перечисленные выше модели и методики не учитывают трудность процесса в исходной зоне, наличие возвратных течений, неравномерность температур в зоне горения, как по сечению, так и по длине камеры сгорания. Чтобы получить более точные уравнения необходимо вместо адиабатной температуры при $\alpha = 1,0$ или температуры горения при $\alpha = 1,1$ использовать некую эффективную температуру газов $T_{эф}$, которая бы отражала потери теплоты, неравномерность температур в камере сгорания и зависела от многих, в том числе и конструктивных факторов, уточнить время пребывания газов в зоне высоких температур, выделяя зону горения.

Сложность процессов выделения и перемещении в зоне горения камер сгорания сильно осложняют определение $T_{эф}$. Для определения эффективной температуры газа необходимо иметь достаточно много экспериментальных данных.

Эффективную температуру можно найти, например, используя критерий Больцмана [6]:

$$\frac{T_{\phi}}{T_{a\phi}} = f(Bo) = \Theta, \quad (10)$$

где Θ - коэффициент неадиабатичности.

Коэффициент неадиабатичности Θ применяется при определении $T_{эф}$ в основном при расчетах в котлах, для камер сгорания ГТУ этот критерий использовался в работе Сударева А.В.

Однако следует отметить, что $T_{эф}$ заметно отличается от $T_{a\phi}$ только для камер с низким тепловым напряжением ($Bo < 40$). Для современных камер сгорания, где $Bo > 75$, эти температуры практически равны.

Для расчета выбросов NO_x вводится средняя эффективная температура, которая определяется из выражения:

$$T_{эф} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{zi} \tau_i}{\tau_{np}} \Theta \eta_{kc}, \quad (11)$$

где T_{zi} - температура в i -ой части зоны горения камеры сгорания;

τ_i - время пребывания в i -ой части зоны горения.

С учетом вышеизложенного получено выражение для определения концентрации NO :

$$C_{NO} = 37 \cdot 10^{11} \sqrt{C_{O_2} C_{N_2}} \exp(-65000/T_{\phi}) \sqrt{\frac{P_g}{T_{эф}} \tau_{np} \frac{\alpha_z}{\alpha_{\Sigma}}}. \quad (12)$$

В этом выражении через $T_{эф}$ выполнен учет ступенчатости подвода воздуха по длине жаровой трубы, а также осреднение температуры по времени пребывания в каждой части зоны горения. Комплекс $\frac{\alpha_z}{\alpha_{\Sigma}}$ - учитывает тот факт, что образование оксидов азота

идет в зоне горения, а в дальнейшем идет его разбавление.

Недостатком метода определения $T_{эф}$ по (11) является тот факт, что при определении $T_{эф}$ не учитывается неравномерность температуры по сечению камеры сгорания. Дальнейшим совершенствованием модели явилось бы определение T_{zi} по методике, где эффективная температура факела определяется из выражения:

$$T_{фэф} = \Xi, \quad (13)$$

где функции Ξ и ξ отражают влияние макро и микронеравномерности температур, а также учитывают выгорание топлива по длине жаровой трубы, и определяются из выражений:

$$\Xi = \frac{10}{9 + \left(\chi \frac{T_\phi}{T_\epsilon} \right)^{0,1}}, \quad (14)$$

где $\chi = (\kappa_z + \kappa_c) \cdot S_{\text{эф}}$ - оптическая плотность излучения среды;

$$\xi = 1 + 0,25(1 - \eta_{c2}) \frac{T_a^{\alpha=1} - T_\phi}{T_\phi}. \quad (15)$$

Учет реального времени пребывания представлено в виде зависимости:

$$\tau_{NO} = k \frac{V_I P_\epsilon}{(G_z - G_{\text{обп}}) RT_{\text{макс}}} f(\alpha_I). \quad (16)$$

Тогда получим уравнение:

$$NO = \frac{50,75 \cdot 10^3 P_\epsilon^{1,5} \alpha_{\text{эф}} V_I O_2^{0,5} N_2}{T_{\text{эф}}^{1,5} (G_z - G_{\text{обп}})} \times \left[37 \cdot 10^{11} \exp(-65000/T_{\text{эф}}) + 11,091 \cdot 10^{20} \frac{O_2^{0,5} P_\epsilon^{0,5}}{T_{\text{эф}}^3} \exp(-64400/T_{\text{эф}}) \right], \quad (17)$$

где $\alpha_{\text{эф}} = Bo \cdot \alpha_I$.

Bo - коэффициент, учитывающий неоднородность смеси и сильно зависящий от конструкции камеры сгорания;

$T_{\text{эф}}$ - некоторая эффективная температура, при которой эмиссия оксидов азота первичной зоны за среднее время пребывания газа в ней равна действительной.

В работе Достярова А.М. предложена методика для определения NO с учетом структуры потока в первичной зоне, основанная на условии химического равновесия и кинетической схеме Зельдовича:

$$C_{NO} = Af(\alpha_z) \exp(-65000/T_{\text{эф}}) \sqrt{\frac{P_\epsilon}{T_{\text{эф}}}} \tau_{\text{преб}}, \quad (18)$$

где $T_{\text{эф}} = T_a \cdot \Theta$

$$f(\alpha_z) = k \left[\frac{(\alpha_z - 1) \alpha_z^{2(1+m)} L_0^3}{(1 + \alpha_z L_0)^3} \right]^{0,5}; \quad (19)$$

$m = 1, 4 \dots 1, 7$, k – константы, определяемые по результатам эксперимента;

$$\tau_{\text{преб}} = \tau_{\text{пр}} + n \cdot (\tau_{\text{пр}} + \tau_{\text{ЗОТ}}), \quad (20)$$

где $\tau_{\text{пр}} = \frac{V_{\text{пр}}}{G_{\text{пр}}}$ - время пребывания в прямом токе;

$V_{пр}$ – объем первичной зоны за вычетом зоны обратных токов;
 $G_{пр}$ - объемный расход газа через зону прямого тока;

где $\tau_{зот} = \frac{V_{зот}}{G_{зот}}$ - время пребывания в зоне обратных токов

$V_{зот}$ – объем зоны обратных токов;
 $G_{зот}$ - объемный расход газа через зону обратных токов;
 n – коэффициент рециркуляции.

И окончательно получим уравнение для определения в камерах сгорания ГТУ с закрученным течением и с учетом структуры потока в первичной зоне:

$$C_{NO}^I = 13 \cdot 10^{11} \left[\frac{(\alpha_z - 1) \alpha_z^2 L_0^3}{(1 + \alpha_z L_0)^3} \right]^{0,5} \exp(-65000 / T_{эф}) \times \sqrt{\frac{P}{T_{эф}}} [k_{фр} \tau_1 + \tau_2 + 2k_{обр} (\tau_1 + \tau_2) + k_{обр} \tau_{зот}] \quad (21)$$

Где $T_{эф} = T_a \cdot \Theta$,

$k_{фр} = G_{фр} / G_I$ – относительный расход воздуха через фронтное устройство;

$k_{обр} = G_{обр} / G_I$ - относительный расход воздуха через зону обратных токов;

$\tau_1, \tau_2, \tau_{зот}$ – соответственно время пребывания газов в первом, втором поясе прямого тока и в зоне обратных токов.

Наиболее комплексный подход к определению NO_x через эффективные параметры, где кинетическое уравнение условного процесса образования NO_x представлено в

$$NO_x = k_0 O_2^m N_2^n \exp(-E_{эф} / RT) \tau_{эф} \quad (22)$$

k_0, n, m – коэффициенты, определяемые на основе обработки опытных данных.

Анализ экспериментов позволил получить обобщенную зависимость:

$$NO_x = 1,9 \cdot 10^3 (k_\alpha k_\psi k_p k_T \tau_{cp})^{0,5} \exp(-27400 / RT), \quad (23)$$

где $k_\alpha = (\alpha - 1) / \alpha$, $k_\psi = (1 - \psi)^2 \psi$, $k_p = 10 \cdot P$ – соответствующие поправочные коэффициенты:

$$\tau_{эф} = const \tau_{cp}^{0,5}$$

$$\tau_{cp} = q_V^{-1} \left(\frac{Q_u^p}{R_\mu T_0} \right) \frac{2}{(\alpha L_0 + 1)(T / T_0 + 1)}, \quad (24)$$

где q_V - теплонапряженность топочного объема;

$R_\mu = R / \mu$ - газовая постоянная;

T_0 - начальная температура окислителя;

T - адиабатная температура горения по среднему значению с учетом выгорания топлива;

$E_{эф} = 27400$ Дж/(моль·К) - эффективная энергия активации.

В работе [7] представлена впервые разработанная система критериальных уравнений для расчета полноты сгорания топлива индексов эмиссии NO_x, CO, HC, числа дымности, пределов устойчивости горения по бедному срыву, пределов воспламенения топливовоздушной смеси в различных высотно-климатических условиях, коэффициентов окружной и радиальной неравномерностей температурного поля, потерь полного давления и температурного состояния стенки жаровой трубы [8].

Созданные в результате исследования рабочих процессов и приведенные в указанных работах главные конструктивные параметры являются определяющими также и для образования СН и дыма. Такими параметрами являются: отношение площади жаровой трубы в миделевом сечении к суммарной эффективной площади ее отверстий

$\frac{F_{жс}}{\sum \mu F_{ожс}}$, интенсивность крутки завихрителя, представляющая собой отношение средних

по сечению тангенциальной и осевой составляющих скорости воздуха на выходе из завихрителя $\bar{W} = W_t/W_a = f(A)$; относительная пропускная способность завихрителя фронтального устройства в виде отношения эффективной площади завихрителя фронтального устройства к суммарной эффективной площади всех отверстий жаровой трубы

$\mu F_3 = \frac{\mu F_3}{\sum \mu F_{ожс}}$, количество форсунок, приходящееся на площадь поперечного сечения

жаровой трубы $\frac{N_\phi}{F_{жс}}$.

В зависимости этих данных в [7] создана система эмпирических уравнений зависимости индексов эмиссии оксидов азота от режимных и конструктивных параметров

$$EI_{NO_x} = A(P_k)^{0.5} \frac{V_{зг}}{V_k} \exp\left(\frac{T_k}{288}\right) T_2 \exp(-0,0188H) \times$$
$$\left[1 + b_1 \frac{F_{жс}}{\sum \mu F_{ожс}} + b_2 \left(\frac{F_{жс}}{\sum \mu F_{ожс}} \right)^2 \right] \times$$
$$\exp(b_3 \bar{W} + b_4 \mu F_3) \left[1 + b_5 \exp\left(-\frac{N_\phi}{F_{жс}} 100 \right) \right] \quad (25)$$

где $A, b_1 - b_5$ – эмпирические коэффициенты.

С помощью функций конструктивных параметров определяют степень средних и максимальных локальных температур газа, при этом высокие температуры способствуют как повышению полноты сгорания топлива, т.е. снижению CO и HC, так и повышению содержания NO_x, что и отражает характер изменения функций.

Обсуждение.

В работе была предложена две модели для определения выхода NO_x с учетом параметра смесеобразования и с использованием трех реакторов с полностью перемешанными реагентами. Реактор с неполным смешением имеет лучшее согласие с экспериментом, что подтверждает целесообразность моделей подобного типа.

Заключение.

В заключении можно сказать, что анализ теоретических моделей образования оксидов азота в камерах сгорания ГТУ показал, что сегодня нет единого, четкого подхода

в разработке модели образования NO_x в камерах сгорания ГТУ. А пока использование пакета программ Ansys fluent дает хорошее согласование с экспериментальными результатами исследований камер сгорания ГТУ с микрофакельными горелочными устройствами. Поэтому в каждом случае мы вносим поправочные коэффициенты для каждой новой горелки или камеры сгорания ГТД после экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Достияров А.М. Микрофакельное горение в топливосжигающих устройствах. – Шымкент: ЮКГУ им. М.Ауэзова, 1999. – 181 с.
- [2] Нельсон Н. Образование окиси азота при горении // Ракетная техника и космонавтика. 1976. -Т.Н.-Я» 9. - С.30-36.
- [3] Гусаков С.В. Физико-химические основы процессов смесеобразования и сгорания в ЛВС. Основы теории горения. - М.: Изд-во РУДЫ, 2001.-134 с.
- [4] Тачон С. Полуэмпирический метод расчета содержания NO в продуктах сгорания при наличии впрыска пара//Энергетические машины и установки. -1984, 106, №4.
- [5] Салливан. Простое уравнение для расчета выбросов из камер сгорания ГТД// Энергетические машины и установки. -1977, 97, №2, с.1-8.
- [6] Гурвич А.М. Теплообмен в топках паровых котлов. – М.:Л.: Госэнергоиздат, 1950.-176 с.
- [7] Система уравнений для расчета характеристик камеры сгорания/ Саркисов А.А. и др.//
- [8] Камеры сгорания газотурбинных двигателей: Математическое моделирование, методология расчета, концепция оптимального проектирования: автореферат дис. доктора технических наук: 05.04.12 / С.-Петербург. политехн. ун-т. - Санкт-Петербург, 2004. - 32 с.

Жанар Айдымбаева, PhD, Ғ.Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан, dijaru@mail.ru

Жансая Дүйсенбек, PhD, Ғ.Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан, zhaniko.adina@mail.ru

Алия Достиярова, т.ғ.к., Логистика және көлік академиясы, Алматы, Қазақстан, adostiyarova@mail.ru

Бауыржан Бижахметов, докторант, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті, Астана, Қазақстан, bauyrzhanbiakhmetov@gmail.com

Павел Верницкас, докторант, Ғ. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан, www.bio.kz@yandex.ru

ГТҚ ЖАНУ КАМЕРАЛАРЫНДА АЗОТ ОКСИДТЕРІНІҢ ТҮЗІЛУІН ЕСЕПТЕУ МӘСЕЛЕСІНЕ

Андатпа. Соңғы уақытта шығарындылардың сипаттамаларын болжауға көмектесетін газ турбинасының жану камерасында жану процесінің моделін құруға көптеген әрекеттер жасалды. Бүгінгі күні әдебиетте жану камераларынан NO_x шығарындыларының деңгейін есептеуге арналған көптеген жүйелер бар, олардың күрделілігі, қолдану мүмкіндігі және қатандығы әртүрлі. Қолданылатын лақтаушы заттардың генерациясының моделі модельдеу қателігі, практикалық, пайдаланудың қарапайымдылығы, есептеу үнемділігі және одан әрі жетілдіру мүмкіндігі арасындағы ақылға қонымды шешім болуы керек.

Физикалық процесс үлгілерін модернизациялау және сандық есептеу әдістерінің қатаңдығы жағдайында аналитикалық модельдер жану камераларын жобалау мен дамытуда барған сайын маңызды рөл атқаратын болады, атап айтқанда, қазір Ansys fluent бағдарламалық пакеті тиімді пайдаланылуда. Газ турбиналық жану камерасындағы жану процесін сипаттау үшін, біз қолданатын нәрсе.

Түйінді сөздер. Жану камерасы, ГТҚ, азот оксидтері, реактор, жану құрылғысы, болу уақыты, Зельдович механизмі, артық ауа коэффициенті.

Zhanar Aidymbayeva, PhD, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeyev, Almaty, Kazakhstan, diararu@mail.ru

Zhansaya Duissenbek, PhD, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeyev, Almaty, Kazakhstan, zhaniko.adina@mail.ru

Aliya Dostiyarova, candidate of technical sciences, Academy of Logistics and Transport, Almaty, Kazakhstan, adostiyarova@mail.ru

Bauyrzhan Biakhmetov, doctoral student, Kazakh Agrotechnical University named after S. Seifullin, Astana, Kazakhstan, bauyrzhanbiakhmetov@gmail.com

Pavel Verniskas, doctoral student, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeyev, Almaty, Kazakhstan, www.bio.kz@yandex.ru

ON THE ISSUE OF CALCULATING THE FORMATION OF NITROGEN OXIDES IN THE COMBUSTION CHAMBERS OF GTU

Annotation. Recently, many attempts have been made to generate a model of the combustion process in the combustion chamber of the gas turbine engine, which helps to predict the characteristics of emissions. Gorenje Today, there are many systems in the literature for calculating the level of NO_x emissions from combustion chambers, which are of varying complexity, applicability and rigor, the applied model for the formation of pollutants should represent a reasonable solution between the modeling error, practicality, ease of use, cost-effectiveness of calculations and the possibility of further improvement.

With the modernization of physical process models and the rigor of numerical calculation methods, analytical models will play an increasingly important role in the design and refinement of combustion chambers, in particular, the Ansys fluent software package is now being effectively used. To describe gorenje process in the combustion chamber of the gas turbine engine, which we use.

Keywords. Combustion chamber, gas turbine engine, nitrogen oxides, reactor, burner device, residence time, Zeldovich mechanism, excess air coefficient.
