

УДК 504:622.691.4

В.Т. Матвеев, профессор, д-р техн. наук,**Н.М. Стоянов**, доцент, канд. техн. наук,**А.А. Благодаров**, студент*Севастопольский национальный технический университет**Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua***УДЕЛЬНЫЕ ВЫБРОСЫ ОКИСЛОВ АЗОТА ОТ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ
ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК**

Найдены удельные выбросы окислов азота от газотурбинных установок и дано их сравнение для циклов: простого с турбокомпрессорным утилизатором, с промподогревом рабочего тела и сочетания циклов.

Введение. Необходимость изучения выбросов окислов азота от когенерационных газотурбинных установок диктуется постоянным стремлением энергетиков повышать коэффициент полезного использования тепла, увеличением единичной мощности энергоустановок, жесткими международными требованиями снижения вредных выбросов в атмосферу.

Как показывает анализ опубликованных данных ПО «Укргазпром» в 1988 г. располагал парком ГППА мощностью свыше 3687 МВт, состоящим из агрегатов от ГТК-5 до ГТН-25 и ГТН-25И общей численностью 404 единицы. Пользуясь данными таблицы 10 работы [1] по средним удельным выбросам окислов азота от агрегатов различных типов, принимая количество постоянно работающих ГПА равным 2/3 установленных, нами выполнены расчеты суммарных выбросов NO_x от ГППА ПО «Укргазпром» по состоянию на 1988 г. Согласно этим расчетам суммарный выброс окислов азота в атмосферу Украины в 1988 г. составил свыше 86 тыс. т NO_x в год. Надо полагать, что ситуация с выбросами вредных веществ от ГППА ДП «Укртрансгаз» по Украине к настоящему времени не претерпела существенных изменений.

Постановка задачи. Такое количество выбросов в атмосферу Украины за счет функционирования ДП «Укртрансгаз» наносит значительный ущерб окружающей среде. Задача снижения количества выбросов NO_x является актуальной. Решение ее может быть достигнуто, в первую очередь, за счет совершенствования процессов горения газа в камерах сгорания газотурбинных приводов газоперекачивающих агрегатов. Согласно данным работы [1] удельные фактические выбросы окислов азота от различных ГППА по состоянию на 1991 г. составляют значения от 350 мг/(нм³) (ГТ-750-6 и ГТК-10) до 70 мг/(нм³) (ГПУ-10 и ГПА Ц-6,3).

Перспективными методами увеличения единичной мощности и повышения эффективности работы ГТУ являются использование цикла с промежуточным подогревом рабочего тела (КСП), а также цикла с турбокомпрессорным утилизатором (ТКУ) [2]. Представляет значительный интерес сравнение экологических характеристик работы ГТУ без КСП и с КСП, ГТУ с ТКУ, а также ГТУ с КСП и ТКУ (рисунок 1). Целью настоящего исследования является указанное выше сравнение экологических показателей для ГТУ перечисленных циклов.

Обоснование критериев сравнения циклов ГТУ. Для проведения сравнения необходимо установить критерии, в качестве которых могут служить следующие удельные величины: 1) выбросы вредных веществ в мольных (объемных) долях к мольному (объемному) расходу выхлопных газов, ППМ (объемных долей на миллион); 2) фактическая концентрация NO_x в сухих продуктах выхлопных газов, $C_{\text{NO}_x}^{\text{факт}}$ в мг/(нм³); 3) приведенная к 15 % объемных кислорода концентрация NO_x в сухих продуктах выхлопных газов, $C_{\text{NO}_x}^{15}$ в мг/(нм³); 4) удельный выброс NO_x на единицу расхода топливного газа, $C_{\text{NO}_x}^{\text{ТГ}}$ в г/(нм³ топл.газа); 5) удельный фактический выброс NO_x на 1 кВт·ч произведенной полезной энергии, $\mathcal{B}_{\text{NO}_x}^{\text{ПЭфакт}}$ в г/(кВт·ч); 6) удельный приведенный к 15 % O_2 и к 1 кВт·ч произведенной полезной энергии выброс, $\mathcal{B}_{\text{NO}_x}^{\text{ПЭ}(15)}$ в г/(кВт·ч); 7) мощность выброса NO_x от ГПА, $g_{\text{NO}_x}^{\text{ГПА}}$ в г/с (кг/сутки; т/год и др.).

Можно полагать, что наиболее полными и наиболее объективными характеристиками «вредности» выбросов NO_x в атмосферу могут служить: удельная фактическая концентрация NO_x в сухих продуктах выхлопных газов $C_{\text{NO}_x}^{\text{факт}}$ и удельный фактический выброс NO_x на единицу произведенной полезной энергии, $\mathcal{B}_{\text{NO}_x}^{\text{ПЭфакт}}$ в г/(кВт·ч), а также удельная, приведенная к 15 % объемных кислорода в сухих продуктах выхлопных газов концентрация NO_x , $C_{\text{NO}_x}^{15}$ в мг/(нм³) и удельный выброс NO_x , приведенный к 15 % объемных O_2 и к 1 кВт·ч приведенной полезной энергии выброс, $\mathcal{B}_{\text{NO}_x}^{\text{ПЭ}(15)}$ в г/(кВт·ч).

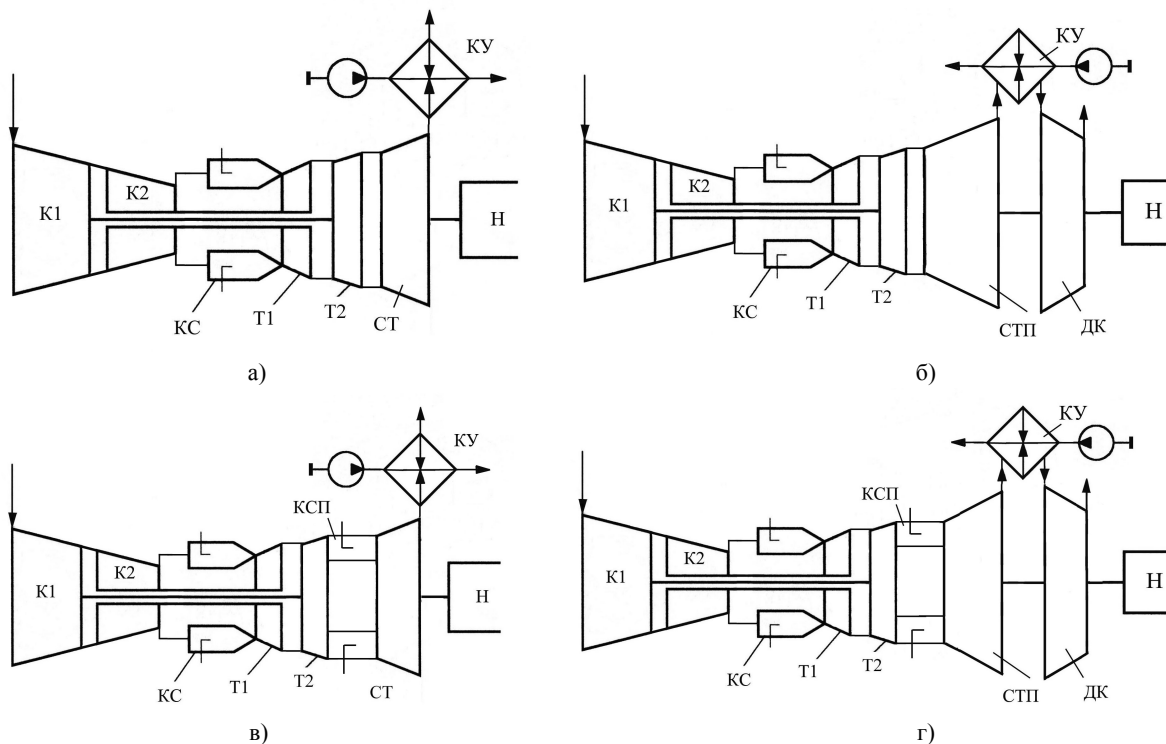


Рисунок 1 – Принципиальные схемы исследуемых когенерационных ГТУ:

а – ГТД простого цикла; б – ГТД с ТКУ; в – ГТУ с КСП перед силовой турбиной; г – ГТУ с КСП и ТКУ;
 К1 и К2 – компрессоры; КС – камера сгорания; КСП – КС промежуточного подогрева; Т1 и Т2 – турбины;
 СТП – силовая турбина перерасширения; ДК – дожимающий компрессор; КУ – котел утилизационный;
 СТ – силовая турбина

Из приведенных выше характеристик наиболее эффективными, по нашему мнению, следует признать $C_{NO_x}^{15}$ и $\theta_{NO_x}^{ПЭ(15)}$. Обоснованием такого выбора характеристик «вредности» выбросов NO_x от ГППА может служить анализ данных работы [1]. Как следует из этого сравнения, зависимость $\theta_{NO_x}^{ПЭфакт} = f(C_{NO_x}^{факт})$ достаточно сложная и не укладывается в единую простую кривую, а зависимость $\theta_{NO_x}^{ПЭ(15)} = f(C_{NO_x}^{15})$ в пределах достоверности экспериментальных данных источника [2] четко описывается прямой линией.

Методика расчетов. Вопрос выбора расчетной зависимости для определения фактических удельных выбросов окислов азота от газотурбинных установок требует особого рассмотрения, не входящего в настоящее исследование. Среди предложенных в отечественной литературе расчетных зависимостей наибольшим вниманием пользуются уравнения Христича-Тумановского [3], Щуровского В.А. и др. [1], Любчика Г.М. и др. [4]. После предварительного анализа для определения фактического удельного выброса NO_x от ГТУ в качестве расчетного было принято уравнение Христича-Тумановского [3] вида

$$NO = \left(3,7 \cdot 10^{12} \sqrt{r_{N_2} \cdot r_{O_2}} \cdot e^{-\frac{E_{эф}}{\mu R T_{\phi}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{T_{\phi}}} \right)_{\alpha=1,1} \cdot \tau_{np} \cdot \left(\frac{16 \cdot p_{\phi} - 0,23}{6 \cdot p_{\phi} + 0,77} \right) \cdot \frac{1,15}{\sqrt{\alpha_{\phi} \alpha_0^{вр}}} \cdot K_{фр} \cdot K'_f, \% \text{ объемных}, \quad (1)$$

где r_{N_2} и r_{O_2} – объемные концентрации азота и кислорода в факеле, % объемных; $E_{эф}$ – эффективная энергия активации реакции горения, (129000 ккал/(кмоль·К)); μR – универсальная газовая постоянная (1,987 ккал/(кмоль·К)); T_{ϕ} – температура продуктов горения в факеле, К; τ_{np} – среднее время пребывания продуктов горения в факеле, с; p_{ϕ} – давление продуктов горения в камере сгорания, МПа; α_{ϕ} и $\alpha_0^{вр}$ – коэффициенты избытка воздуха в факеле и в выхлопных газах ГТУ; $K_{фр}$ – коэффициент учета ступенчатости подвода воздуха в зону горения ($K_{фр} \approx 1$); K'_f – коэффициент учета влияния качества смешения топлива и воздуха в зоне горения ($K'_f = 0,75$).

Фактические удельные выбросы NO_x на выхлопе ГТУ определялись зависимостью:

$$C_{NO_x}^{\text{факт}} = NO \cdot 10^{-2} \rho_{NO_2}^{\text{нфу}} = NO \cdot 10^{-2} \cdot 2,05 \cdot 10^6, \text{ мг/((нм}^3\text{))},$$

где NO – объемная доля окислов азота в выхлопных газах, % объемных (по зависимости (1)); $\rho_{NO_2}^{\text{нфу}}$ – плотность диоксида азота при нормальных физических условиях, кг/нм³.

Время пребывания продуктов горения в зоне факела определялось из [4] как

$$\tau_{np} = \left\{ a \cdot Q_n / \left[R_{NO_2} \cdot T_2 \cdot q_v (\alpha_\phi \cdot L_0 + 1) \left(\frac{T_3}{T_2} + 1 \right) \right] \right\}^n, \quad (2)$$

где $a=2$ – опытный коэффициент; Q_n – низшая теплотворная способность газового топлива, (кДж/кг); R_{NO_2} – техническая газовая постоянная двуокиси азота (181 Дж/кг·К); T_2 – температура воздуха перед камерой сгорания, К; Q_n – теплонапряженность топочного объема жаровой трубы, Вт/(м³·Па); L_0 – удельный расход воздуха для сжигания 1 кг топлива ($\nu_{O_2}=21$ % объемных); T_3 – температура рабочего тела перед турбиной, К; n – показатель степени (0,4584).

Для выполнения расчетов фактических и приведенных к 15 % объемных кислорода в выхлопных газах выбросов использовались зависимости:

$$e_{NO_x}^{\text{ПЭфакт}} = \frac{G_{NO_x}^{\text{факт}}}{Ne} = \frac{G_{BG} \cdot C_{NO_x}^{\text{факт}} \cdot 3600}{Ne \cdot 10^3 \cdot 10^3}, \text{ г/(кВт} \cdot \text{ч)}, \quad (3)$$

$$e_{NO_x}^{\text{ПЭ(15)}} = \frac{G_{NO_x}^{15}}{Ne} = \frac{G_{BG} \cdot C_{NO_x}^{15} \cdot 3600}{Ne \cdot 10^3 \cdot 10^3}, \text{ г/(кВт} \cdot \text{ч)}. \quad (4)$$

Здесь G_{BG} – выброс выхлопных газов от ГТУ, кг/с; $C_{NO_x}^{\text{факт}}$ и $C_{NO_x}^{15}$ – удельные концентрации выбросов NO_x фактической и приведенной к 15 % (объемных) кислорода, мг/(нм³); Ne – полезная мощность ГТУ, МВт.

Взаимосвязь между фактическими удельными концентрациями выбросов окислов азота $C_{NO_x}^{\text{факт}}$ и приведенными к 15 % (объемных) кислорода в выхлопных газа, согласно ГОСТа 28775–90, определялась соотношением

$$C_{NO_x}^{15} = C_{NO_x}^{\text{факт}} \frac{21 - 15}{21 - \nu_{O_2}^{\text{вг}}}, \text{ мг/((нм}^3\text{))}, \quad (5)$$

где $\nu_{O_2}^{\text{вг}}$ – фактическая объемная концентрация O_2 в сухих продуктах выхлопных газов, % (объемных).

$$\nu_{O_2}^{\text{вг}} = \frac{21(\alpha_0^{\text{вг}} - 1)}{\alpha_0^{\text{вг}}}, \text{ \% объемных}, \quad (6)$$

где $\alpha_0^{\text{вг}}$ – коэффициент избытка воздуха в выхлопных газах ГТУ, % объемных.

При проведении расчетов в качестве исходных использовались данные термодинамического расчета двигателя АИ 336–2–10: $\pi_k=21,3$ – степень повышения давления в осевом компрессоре; $p_a=21,6$ МПа – давление воздуха на входе в камеру сгорания; $G_{\text{ГТД}}^{\text{ГТД}}=2115$ кг/час=0,5875 кг/с – расход топливного газа в камере сгорания ГТД; $Q_n=11950$ ккал/кг=50 070 кДж/кг – низшая удельная теплота сгорания топливного газа; $G_{\text{вг}}^{\text{ГТД}}=42,6$ кг/с – расход выхлопных газов на выходе ГТУ простого цикла; $t_{в1}=15$ °С – температура воздуха на входе в осевой компрессор; $\eta_k=0,857$ – КПД осевого компрессора; $\xi=0,998$ – полнота сгорания топлива в жаровой трубе камеры сгорания; $\alpha_\phi=1,9$ – коэффициент избытка воздуха в факеле головной камеры сгорания; $\tau_{\text{пр}}^{\text{ГТД}}=7,6 \cdot 10^{-3}$ с – время пребывания продуктов сгорания в головной камере сгорания; $q_v^{\text{ГТД}}=527$ Вт/(м³·Па) – теплонапряженность топочного объема головной камеры сгорания.

При расчете цикла с промежуточным подогревом рабочего тела использовались следующие величины: $G_{\text{вг}}^{\text{ГТД}}=0,275$ кг/с – расход топливного газа через камеру сгорания промежуточного подогрева; $q^{\text{пр}}=250$ Вт/(м³·Па) – тепловая напряженность топочного объема камеры сгорания промподогрева; $\tau_{\text{пр}}^{\text{ГТД}}=6,42 \cdot 10^{-3}$ с – время пребывания продуктов сгорания в камере сгорания промежуточного подогрева рабочего тела.

Результаты расчетов по определению выбросов NO_x от ГТУ исследуемых циклов представлены в таблице 1. В нее также включены расчетные мощности $N_e^{\text{эл}}$, N_t и N_{Σ} для циклов ГТУ: ГТД, ГТД+ТКУ, ГТД+КСП, ГТД+КСП+ТКУ.

Таблица 1 – Энергетические и экологические характеристики когенерационных ГТУ на базе АИ 336-2-10 на номинальном режиме

Основные характеристики и параметры, их размерности	ГТД	ГТД+ТКУ	ГТД+КСП	ГТД+КСП+ТКУ	$\frac{\text{ОХ}^{\Sigma}}{\text{ОХ}^{\text{ГТД}}}$
Мощность электрическая, $N_e^{\text{эл}}$, МВт	10,0	12,3	11,0	16,0	1,6
Мощность тепловая, N_t , МВт	14,0	12,2	20,3	19,0	1,357
Суммарная мощность, N_{Σ} , МВт	24,0	24,5	31,3	35,0	1,46
Расход топл.газа, $G_{\text{ТГ}}$, кг/с	0,5875	0,5875	0,8625	0,8625	1,47
Расход воздуха, $G_{\text{в}}$, кг/с	42,0125	42,0125	42,0125	42,0125	1,0
Расход выхлоп.газов, $G_{\text{вг}}$, кг/с	42,6	42,6	42,875	42,875	1,0064
Эмиссия NO_x факт., $C_{\text{NO}_x}^{\text{факт}}$, мг/(нм ³)	61,5	61,5	73,6	73,6	1,20
Эмиссия NO_x привед., $C_{\text{NO}_x}^{15}$, мг/(нм ³)	73,07	73,07	59,2	59,2	0,81
Уд. выбросы NO_x факт., $\epsilon_{\text{NO}_x}^{\text{факт(эл)}}$, г/(кВт·ч)	0,943	0,767	1,033	0,710	0,753
Уд. выбросы NO_x прив., $\epsilon_{\text{NO}_x}^{15(\text{эл})}$, г/(кВт·ч)	1,121	0,911	0,831	0,571	0,51
Уд. выбросы NO_x факт., $\epsilon_{\text{NO}_x}^{\text{факт(т)}}$, г/(кВт·ч)	0,674	0,773	0,560	0,598	0,89
Уд. выбросы NO_x прив., $\epsilon_{\text{NO}_x}^{15(\text{т})}$, г/(кВт·ч)	0,800	0,918	0,457	0,481	0,60
Уд. выбросы NO_x факт., $\epsilon_{\text{NO}_x}^{\text{факт(}\Sigma)}$, г/(кВт·ч)	0,393	0,385	0,364	0,325	0,83
Уд. выбросы NO_x прив., $\epsilon_{\text{NO}_x}^{15(\Sigma)}$, г/(кВт·ч)	0,465	0,460	0,295	0,261	0,56

ОХ – основные характеристики соответствующих циклов.

Анализ полученных данных. Как видно из таблицы 1, характеристики и параметры представленных когенерационных ГТУ значительно различаются между собой. Сравним характеристики суммарного цикла (ГТД+КСП+ТКУ) и простого цикла ГТД с использованием тепла отходящих газов. Согласно проведенным расчетам при увеличении расхода топливного газа на 47 % (см. п. 4 таблицы 1) электрическая мощность суммарной ГТУ возрастает на 60 %, а полная (электрическая и тепловая) мощность увеличивается на 46 %, расход воздуха во всех вариантах ГТУ остается одинаковым, при этом фактическая эмиссия окислов азота $C_{\text{NO}_x}^{\text{факт}}$ повышается на 20 %, а более объективная, приведенная к 15 % объемных O_2 в сухих продуктах выхлопных газов, концентрация $C_{\text{NO}_x}^{15}$ снижается на 19 %, при этом удельные выбросы $\epsilon_{\text{NO}_x}^{15(\text{эл})}$ снижаются почти в 2 раза (точнее на 49 %), а $\epsilon_{\text{NO}_x}^{15(\Sigma)}$ снижаются на 44 %.

Выводы. Как следует из проведенного краткого анализа использование суммарного цикла ГТУ (ГТД+КСП+ТКУ) позволяет: 1) более чем в 1,5 раза увеличить электрическую мощность установки на базе ГТД АИ 336-2-10; 2) снизить удельные, приведенные к 15 % объемных кислорода, выбросы окислов азота почти в 2 раза; 3) расход сухих продуктов выхлопных газов увеличивается всего на 0,64 %. Энергетические и экологические выгоды от внедрения в практику когенеративного цикла ГТД+КСП+ТКУ весьма убедительны.

Главный вывод из проведенного исследования: комбинированный когенерационный цикл ГТУ (ГТД+КСП+ТКУ) обладает явными энергетическими и экологическими преимуществами по сравнению с простым когенерационным циклом, а также с циклами (ГТД+КСП) и (ГТД+ТКУ). Целесообразна конструктивная проработка предлагаемой установки, изготовление и экспериментальная ее доводка.

Задачей дальнейших исследований является расчетное определение выбросов окислов азота от разрабатываемых типов ГТД с турбокомпрессорными утилизаторами (ТКУ) и промежуточным подогревом рабочего тела.

Библиографический список

1. Снижение выбросов загрязняющих веществ с отходящими газами газотурбинных ГПА / В.А. Щуровский [и др.]. — М.: ВНИИЭгазпром, 1991. — 61 с.
2. Матвеевко В.Т. Характеристики циклов когенерационных газотурбинных установок с промежуточным подогревом газа, турбокомпрессорным утилизатором и регенерацией теплоты / В.Т. Матвеевко // Промышленная теплотехника. — 1997. — Т. 25. — № 5. — С. 41–44.
3. Христич В.А. Газотурбинные двигатели и защита окружающей среды / В.А. Христич, А.Г. Тумановский. — К.: Техніка, 1983. — 144 с.
4. Любчик Г.М. Екологічні аспекти термодинамічного аналізу циклів ГТУ / Г.М. Любчик, О.С. Кравчук, Г.Б. Варламов // Наукові вісті. Сер. Теплоенергетика: зб. наук. пр. — К., 1997. — Вип. 17. — С. 101–106.

Поступила в редакцию 13.11.2007 г.