

УДК 658.562.012.7

**УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ СГОРАНИЯ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ
В ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕМ АГРЕГАТЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ
КАТАЛИТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ**

© 2025 А.Б. Петроченков, Н.А. Черепанов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия

Статья поступила в редакцию 26.03.2025

В статье приводятся результаты внедрения системы селективного каталитического восстановления в транспорте газа при эксплуатации газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом. Определены расчетные значения мощности выброса оксидов азота, расхода и температура продуктов сгорания от загрузки газотурбинной установки и температуры атмосферного воздуха. По результатам испытаний установлено, что 100 % эффективность очистки отходящих газов от оксидов азота с использованием системы селективного каталитического восстановления наблюдается на режиме работы 0,5 от номинального режима работы при всех расходах реагента и на режиме 0,75 от номинального режима работы при малых расходах реагента (0,32-0,36 л/мин). На режиме испытаний 0,75 от номинала достигнут требуемый уровень концентрации после системы СКВ в 50 мг/м³ (т.е. достигнута концентрация в 43-48 мг/м³ при расходе реагента 0,47-0,48 л/мин).

Ключевые слова: Газоперекачивающий агрегат, система селективного каталитического восстановления, управление качеством сгорания газообразных продуктов, реагент.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-5-15

EDN: KJHCPQ

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей современной научно-практической задачей управления качеством в транспорте газа при эксплуатации газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом является снижение выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду при сгорании органических топлив. Приблизительный объем выбросов эксплуатируемых газоперекачивающих агрегатов в России ежегодно составляет не менее 140 тыс. тонн оксидов азота и 270 тыс. тонн оксида углерода. При этом характеристики газоперекачивающего оборудования российского производства уступают по энергетической эффективности аналогам зарубежных производителей, имея при этом повышенный индекс по выбросам загрязняющих веществ.

На сегодняшний день ни один газоперекачивающий агрегат отечественного производства не может обеспечить соблюдение данных норм. Применение перспективных газотурбинных двигателей, работающих с малоэмиссионной камерой сгорания в качестве привода газоперекачивающих агрегатов (ГПА), позволит добиться соблюдения норм для вновь разрабатываемых агрегатов, однако это не решает проблемы превышения эмиссии оксидов азота NO_x в продуктах сгорания колоссального количества газоперекачивающих агрегатов, находящихся в эксплуатации, парк которых в России составляет более 4000 шт.

В связи с вышеуказанными причинами возникла необходимость поиска универсального способа снижения концентрации NO_x в продуктах сгорания газотурбинных приводов как на вновь разрабатываемых, так и на находящихся в эксплуатации газоперекачивающих агрегатах [1-4]. Одним из таких способов может служить применение в составе газоперекачивающих агрегатов системы селективного каталитического восстановления (СКВ). Этот метод широко применяется для очистки дымовых и выхлопных газов от NO_x с эффективностью, достигающей до 90 %. Целевым показателем эффективности внедрения газоперекачивающих агрегатов нового поколения при проектировании и реконструкции компрессорных станций является снижение уровня концентрации загрязняющих веществ в отходящих газах.

Петроченков Антон Борисович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Микропроцессорные средства автоматизации». E-mail: petrochenkov@pstu.ru

Черепанов Никита Александрович, аспирант кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации». E-mail: nikita.cherepanow@gmail.com

СТАНДАРТИЗАЦИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ЗАМЕРОВ СОСТАВА ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ ГПА

Номинальный режим газотурбинных газоперекачивающих агрегатов характеризуют параметры при номинальной мощности по техническим условиям эксплуатации и стандартных стационарных условиях:

- температура воздуха на входе в двигатель +15 °С;
- барометрическое давление 0,1013 МПа;
- относительная влажность 60 %, при учете гидравлических сопротивлений входного и выходного трактов, без технологических отборов воздуха, при отсутствии утилизационного теплообменника.

Основными компонентами продуктов сгорания для контроля являются оксиды азота и оксид углерода. Концентрацию оксидов азота NO_x определяют как сумму оксида азота NO и диоксида азота NO_2 в пересчете на NO_2 (ГОСТ Р ИСО 11042-1. Принимаются за номинальные значения концентраций и мощности выбросов оксидов азота близкие (в пределах 5 %) к максимальным значениям этих параметров на всех возможных эксплуатационных режимах. Номинальные значения концентрации и мощности выброса оксида углерода близки к максимальным значениям этих параметров в диапазоне эксплуатационных нагрузок от 70 % до 100 %.

Для оценки соответствия данных содержания загрязняющих веществ сухого отработавшего газа нормативным данным должна быть обеспечена возможность работы ГТУ (нагрузка) на рабочих режимах в пределах ограничений, предусмотренных инструкцией по эксплуатации или по условиям работы газопровода.

В отработавших газах ГТУ проводят измерения концентраций – оксидов азота NO_x (включая определение соотношения оксида азота и диоксида); оксида углерода CO ; кислорода O_2 ; диоксида углерода CO_2 . Одновременно на режимах испытаний проводят регистрацию основных теплотехнических параметров ГТУ.

Измерения параметров проводят на нескольких режимах (не менее трех) в диапазоне нагрузок от 70 % номинальной до максимальной, определяемой условиями испытаний. Для оценки текущих

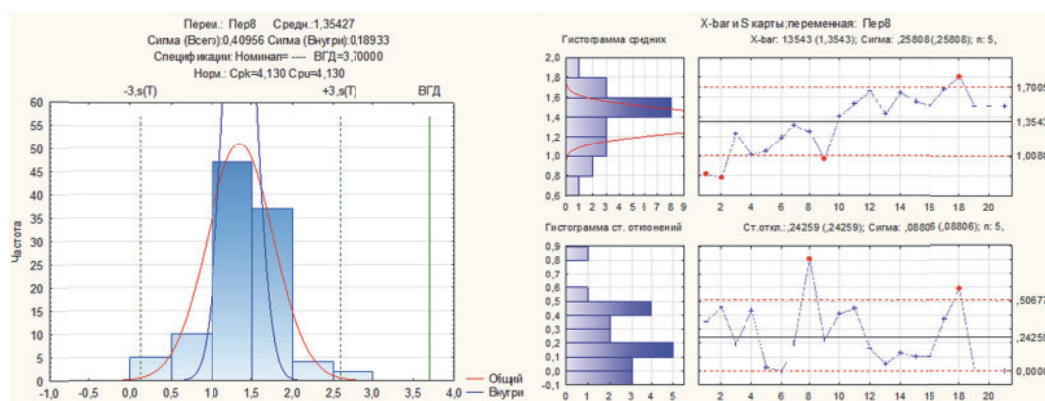


Рисунок 1 – Результаты анализа стабильности и воспроизводимости процесса по результатам измерений CO

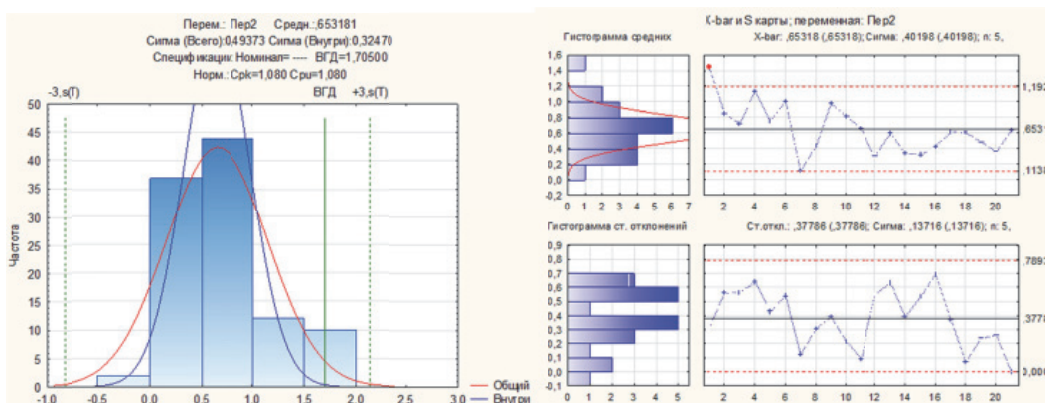


Рисунок 2 – Результаты анализа стабильности и воспроизводимости процесса по результатам измерений NO

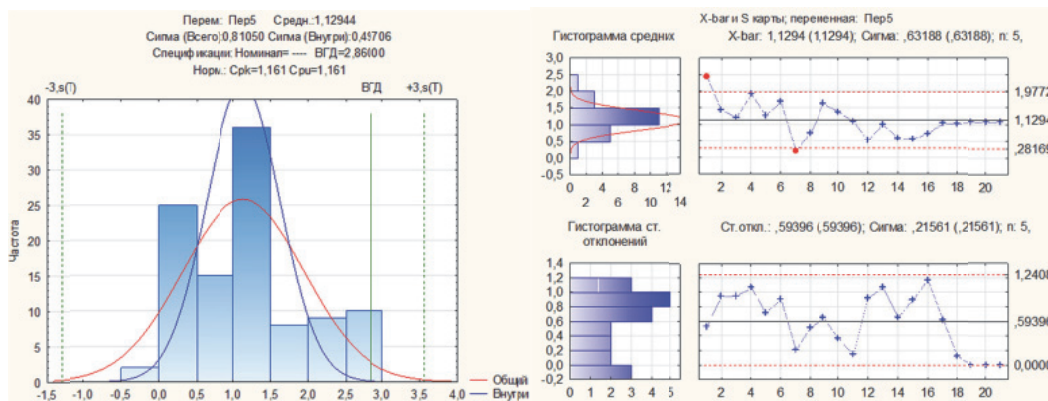


Рисунок 3 – Результаты анализа стабильности и воспроизводимости процесса по результатам измерений NO_2

параметров выброса загрязняющих веществ измерения проводят на штатном эксплуатационном режиме.

Допускается проведение экстраполяции полученных результатов до номинального режима (испытания при отрицательных температурах и/или незначительном изменении загрузки) с использованием экологической характеристики агрегата.

Измерения проводят на установившихся режимах, когда отклонения основных параметров (температуры отработавшего газа и воздуха, частоты вращения) не превышают 1 %, концентрации NO , NO_2 , CO не превышают ± 2 ppm, O_2 , CO_2 не превышают $\pm 0,1$ %.

В соответствии с правилами статистической обработки результатов замеры на одном режиме повторяют не менее трех раз, принимая для дальнейших расчетов их среднеарифметическую величину [5, 6].

Проведя ряд измерений, а так же, воспользовавшись сведениями о нормах NO , NO_2 , CO получили следующие результаты расчетов индексов воспроизводимости и контрольных карт Шухарта. По результатам анализа можно сказать о том, что по NO , NO_2 индексы воспроизводимости низкие, но процессы стабильны, по CO ситуация носит обратный характер.

РАЗРАБОТКА НОРМ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ СОСТАВА И ПАРАМЕТРОВ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ

Приведенную к 15 % содержания кислорода (по объему) массу компонента i , мг/м³, содержащуюся в 1 м³ сухого отработавшего газа (при 0 °C и 0,1013 МПа) вычисляют по формуле:

$$C_i^{15} = C_i \cdot \frac{20,95 - 15}{20,95 - C_{O_2}}, \quad (1)$$

где C_{O_2} – объемная концентрация кислорода в осушенном отработавшем газе, %;

C_i – масса компонента i , содержащаяся в 1 м³ сухого отработавшего газа при 0 °C и 0,1013 МПа по ГОСТ Р ИСО 11042-1, мг/м³.

Содержание (объемная доля) кислорода C_{O_2} , % и диоксида углерода C_{CO_2} , %, в сухих продуктах сгорания вычисляют по формулам:

$$C_{O_2} = \frac{2 \cdot (\alpha_B - 1)}{9,524 \cdot \alpha_B - 1} \cdot 100, \quad (2)$$

$$C_{CO_2} = \frac{12 \cdot (20,95 - O_2)}{20,95}. \quad (3)$$

Массовое количество выброса, мощность выброса M_i , г/с, компонента i с отработавшими газами в единицу времени, вычисляют по формуле:

$$M_i = C_i \cdot Q_2 \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

где Q_2 – объемный расход отработавших газов ГТУ при 0 °C и 0,1013 МПа, м³/с.

Коэффициент соотношения объемных расходов сухих и влажных продуктов сгорания K_B вычисляют по соотношению:

$$K_B = \frac{\alpha_B - 0,105}{\alpha_B + 0,105} = \frac{89,5}{110,5 - O_2}, \quad (5)$$

где O_2 – измеренная концентрация кислорода в пробе, %.

Расход отработавших газов на срезе выхлопной трубы Q_2 , м³/с, вычисляют по формулам: для всех типов ГТУ с нерегулируемой силовой турбиной:

$$Q_2 = Q_2^0 \left(\frac{P_4}{P_4^0} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{288}{T_3} \right)^{0,5} \cdot \frac{P_a}{0,1013} \cdot K_B; \quad (6)$$

для ГТУ с регулируемой силовой турбиной (ГТК-10И, ГТК-10ИР, PGT-10, ГТК-25И, ГТК-25ИР, ГТНР-25И (В), ГТНР-25И (С):

$$Q_2 = 0,97 \cdot Q_2^0 \cdot \overline{n_{ТВД}} \cdot \frac{288}{T_3} \cdot \frac{P_a}{0,1013} \cdot K_B, \quad (7)$$

где Q_2^0 – расход отработавших газов, м³/с;

P_4^0 – абсолютное давление за осевым компрессором ГТУ на номинальном режиме, МПа;

T_3 – температура перед компрессором ГТУ на режиме испытаний, К;

P_a – барометрическое давление, МПа;

P_4 – абсолютное давление за компрессором ГТУ, МПа;

K_B – коэффициент соотношения объемных расходов сухого и влажного отработавшего газа;

$\overline{n_{ТВД}}$ – относительная частота вращения осевого компрессора ГТУ (отношение фактической частоты вращения компрессора к ее номинальной величине);

0,97 – поправка на техническое состояние ГТУ.

Объемный расход продуктов сгорания на срезе патрубка ГТУ Q_2 , м³/с, (при 0 °С и 0,1013 МПа) вычисляют по формуле:

$$Q_2 = \frac{G_2}{\rho_{20}}, \quad (8)$$

где ρ_{20} – плотность продуктов сгорания газа при 0 °С и 0,1013 МПа, кг/м³.

Коэффициент избытка воздуха α_B – отношение поступившего в установку воздуха к его количеству, необходимому для полного сгорания топлива вычисляют по формуле:

$$\alpha_B = \frac{G_2 - G_{ТГ}}{G_{ТГ} \cdot L_0}, \quad (9)$$

где L_0 – количество воздуха, необходимое для стехиометрического сгорания топлива, кг/кг.

Допускается определение коэффициента избытка воздуха α_B по таблице 1.

Таблица 1 – Плотность продуктов сгорания в зависимости от коэффициента избытка воздуха α_B

α_B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ρ_{20}	1,237	1,263	1,272	1,276	1,280	1,282	1,284	1,285	1,286	1,288

Объемный расход продуктов сгорания на срезе патрубка ГТУ $Q_{2ф}$, м³/с, при их фактической температуре T_2 , К, вычисляют по формуле:

$$Q_{2ф} = Q_2 \cdot \frac{T_2}{273}, \quad (10)$$

Объемный расход продуктов сгорания на срезе патрубка ГТУ $Q_{6ф}$, м³/с, при их фактической температуре T_6 , К, вычисляют по формуле:

$$Q_{6ф} = \frac{G_6}{\rho_{20}} \cdot \frac{T_6}{273}, \quad (11)$$

где G_6 – массовый расход продуктов сгорания на срезе выхлопной трубы (G_2 равный), кг/с.

Массовый расход продуктов сгорания на срезе патрубка ГТУ G_2 , кг/с, вычисляют по формуле:

$$G_2 = G_3 + G_{ТГ}, \quad (12)$$

где G_3 – массовый расход циклового воздуха, кг/с;

$G_{ТГ}$ – массовый расход топливного газа, кг/с;

Массовый расход топливного газа $G_{ТГ}$, кг/с, вычисляют по формуле:

$$Q_{ТГ} = \frac{G_{ТГ}}{3600} \cdot \rho_{ТГ}^0, \quad (13)$$

где $\rho_{ТГ}^0$ – плотность топливного газа, кг/м³ (при 20 °С и 0,1013 МПа).

Объемный расход топливного газа $q_{ТГ}$, м³/ч, (при 20 °С и 0,1013 МПа) вычисляют по формуле:

$$q_{ТГ} = \frac{3,6 \cdot N_B}{Q_p^H \cdot \eta_B} \cdot 10^6, \quad (14)$$

где Q_p^H – низшая теплота сгорания топлива, кДж/м³, принимаемая по диспетчерским данным или рассчитываемая по химическому составу топливного газа (принимается расчетная $Q_{p0}^H = 33431$ кДж/м³);

N_B – мощность газотурбинного привода, МВт;

η_B – эффективный к.п.д. газотурбинного привода.

Для оценки соответствия показателей выбросов требованиям нормативной документации строят графические зависимости концентраций оксидов азота (C_{NOx} и C_{NOx}^{15}) и оксида углерода (C_{CO} и C_{CO}^{15}) от температуры отработавших газов, используемой в качестве штатного измерения.

По графикам $C_{NOx} = f(T_{шт})$ по величине номинальной температуры отработавших газов $T_{шт}^0$ вычисляют физическую C_{NOx_0} и $C_{NOx_0}^{15}$ приведенную концентрацию оксидов азота на номинальном режиме.

По графику $C_{CO} = f(T_{шт})$ определяют среднее арифметическое значение концентраций C_{CO_0} и $C_{CO_0}^{15}$ (по трем точкам при максимальном, минимальном и среднем значениях температур отработавших газов в измеренном диапазоне).

Соответствие приведенных концентраций C_{NOx}^{15} и C_{CO}^{15} на номинальном режиме с нормативными данными, %, вычисляют по формуле:

$$K_i = \left(\frac{C_{i_0}^{15}}{C_i^{15_0}} - 1 \right) \cdot 100, \quad (15)$$

где $C_{i_0}^{15}$ – приведенная фактическая концентрация на номинальном режиме;

$C_i^{15_0}$ – приведенная номинальная концентрация в соответствии с нормативной документацией данного типа

Если K_i не превышает ± 10 %, то концентрация компонента i вредного вещества агрегата соответствует нормам нормативного документа и принимается за номинал для данного типа агрегата впредь до очередных контрольных испытаний [7,8].

РАЗРАБОТКА НОРМ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА С ПРОДУКТАМИ СГОРАНИЯ ГПА

Расчет индексов выброса оксидов азота агрегатов проводится с учетом эксплуатационных условий, а именно: с изменением температуры атмосферного воздуха [9,10].

Индекс выброса m_{NOx} рассчитывается по формуле:

$$m_{NOx} = K_{NOx} \cdot m_{NOx}^0, \quad (16)$$

где K_{NOx} – коэффициент, учитывающий отклонение эксплуатационных условий от расчетных (номинальных) условий работы агрегата;

m_{NOx}^0 – номинальный удельный выброс (индекс выброса) оксидов азота на единицу топливного газа, г/м³.

На основе данных производственного контроля агрегата ГПА-16 «Урал» определены расчетные значения мощности выброса оксидов азота, расхода и температура продуктов сгорания от загрузки ГТУ и температуры атмосферного воздуха для газотурбинного ГПА [11,12].

В таблице 2 приведены расчетные значения расхода топливного газа и индекса выброса оксидов азота от температуры атмосферного воздуха для газотурбинного ГПА типа ГПА-16 «Урал».

Таблица 2 – Расход топливного газа и индекса выброса оксидов азота от температуры атмосферного воздуха для ГПА-16 Урал

Температура атмосферного воздуха, °С	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
Расход топливного газа, $q_{ТГ}$, М ³ /ч	Индекс выброса оксидов азота m_{NOx} , г/м ³								
1800	1,56	1,47	1,39	1,29	1,20	1,11	1,01	0,92	0,83
2300	2,41	2,23	2,05	1,88	1,72	1,56	1,40	1,26	1,12
2800	3,13	2,87	2,62	2,38	2,16	1,94	1,74	1,56	1,38
3300	3,76	3,43	3,12	2,83	2,55	2,29	2,05	1,82	1,61
3800	4,34	3,95	3,59	3,24	2,92	2,62	2,33	2,07	1,83
4300	4,88	4,44	4,02	3,63	3,26	2,92	2,60	2,30	2,03
4800	5,39	4,90	4,43	4,00	3,59	3,21	2,85	2,52	2,22
5300	5,88	5,34	4,82	4,34	3,90	3,48	3,09	2,74	2,41
5800	6,35	5,75	5,20	4,68	4,19	3,74	3,32	2,94	2,58

На рисунке 4 приведены значения концентрации выбросов загрязняющих веществ с продуктами сгорания эксплуатируемых агрегатов. На основе исследования экологических и теплотехнических

характеристик агрегата ГПА-16 «Урал» получены зависимости приведенного расхода топливного газа от приведенной мощности агрегата ГПА-16 Урал (рисунок 5). Рассчитаны – мощность выбросов оксидов азота M_{NOx} , расход продуктов сгорания $Q_{пс}$, температура продуктов сгорания $T_{пс}$.

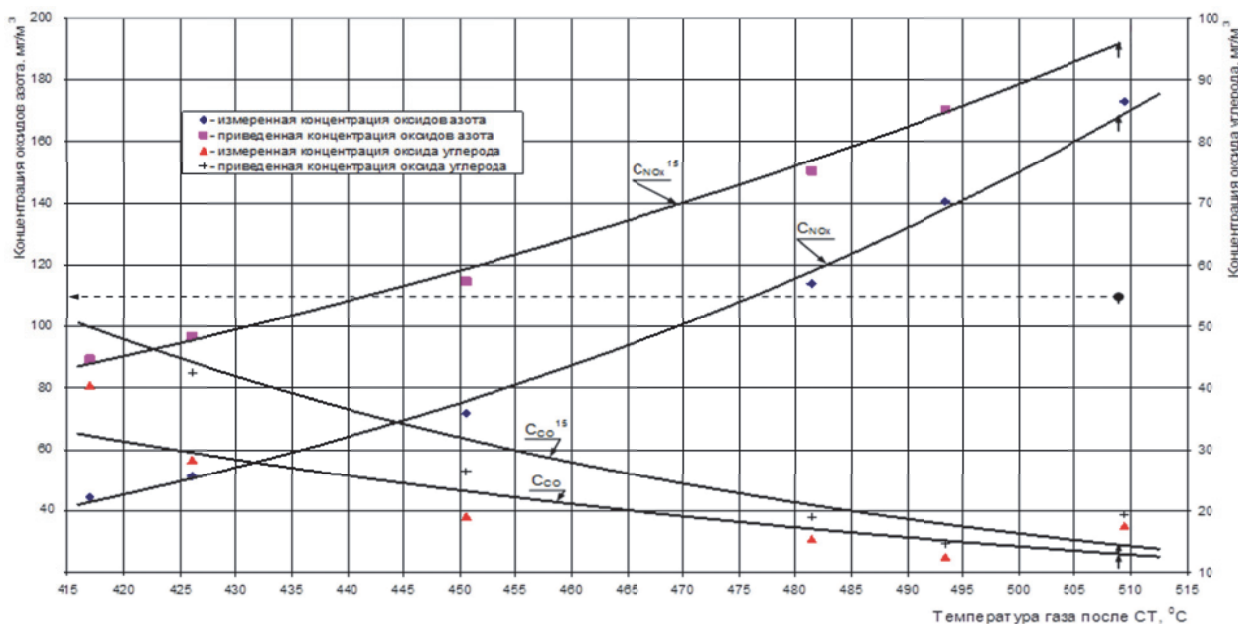


Рисунок 4 – Концентрация оксидов азота и оксида углерода в отработавших газах агрегата ГПА-16 Урал

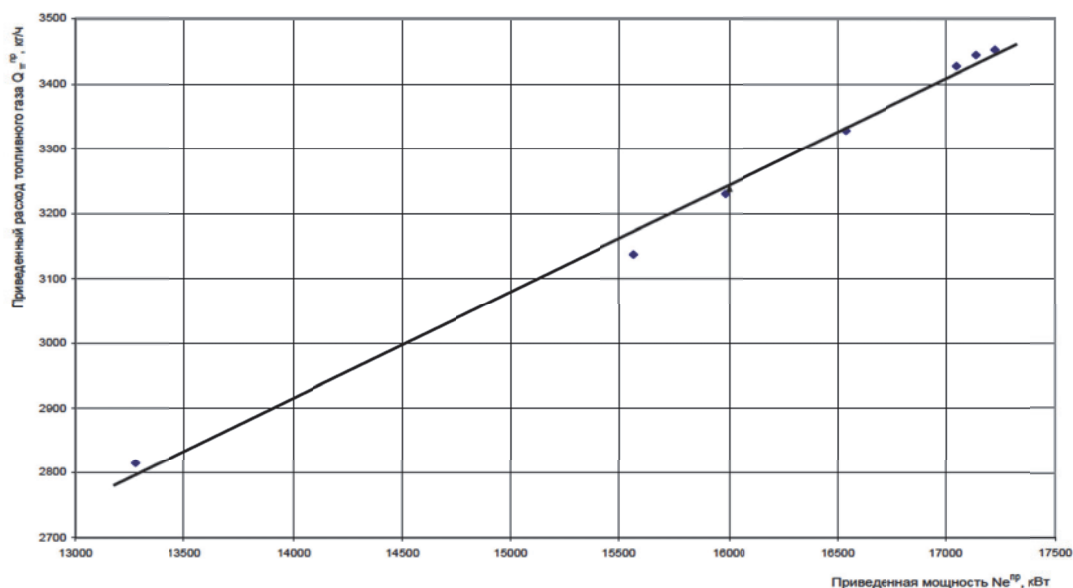


Рисунок 5 – Зависимость приведенного расхода топливного газа от приведенной мощности агрегата ГПА-16 «Урал»

На рисунке 6 представлена зависимость индекса выброса оксидов азота от расхода топливного газа и температуры атмосферного воздуха для агрегата ГПА-16 «Урал». Поле возможных мощностей выброса NO_x ограничивается минимальными и максимальными мощностями ГТУ и температурами окружающего воздуха.

ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ ВАЛОВОГО ВЫБРОСА NO , NO_2 , CO Д О И ПОСЛЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ СКВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ

Согласно проведению инструментальных замеров, выполнена аппроксимация полученных данных для построения графиков выбросов газообразных продуктов в зависимости от режима работы ГПА. Проведены испытания системы селективно-каталитического восстановления в трех режимах работы ГПА для определения оптимального расхода реагента.

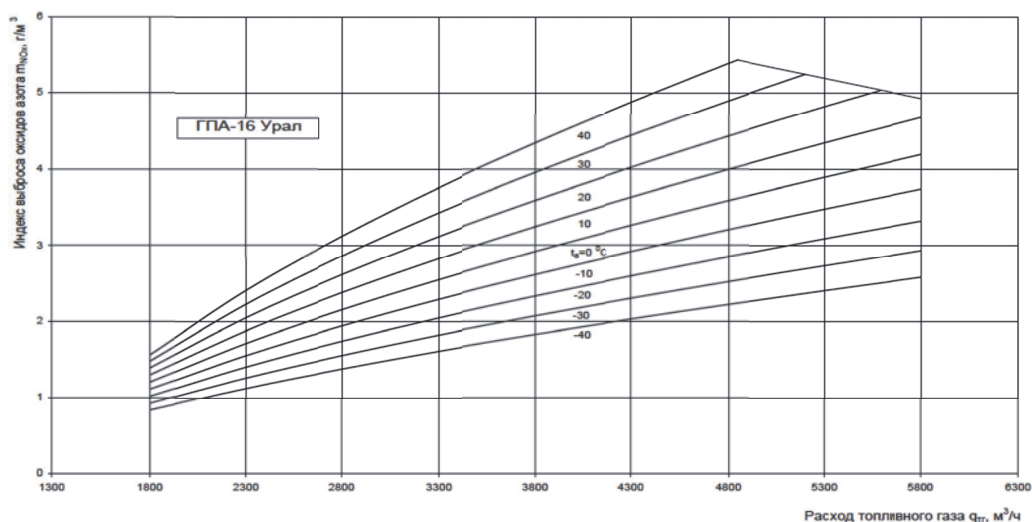


Рисунок 6 – Диаграмма индекса выброса оксидов азота от расхода топливного газа и температуры атмосферного воздуха для агрегата ГПА-16 «Урал»

Для основной системы подачи реагента характерны следующие этапы работы:
по сигналу системой автоматического управления на вход в форсуночные узлы подается рас-
твор мочевины 32,5 %;

внутри выхлопной системы газоперекачивающих агрегатов через систему форсунок происхо-
дит мелкодисперсное распыление реагента;

мелкие капли реагента подхватываются потоком выхлопных газов и движутся в сторону ката-
лизатора; по мере движения каплей по диффузору жидкость испаряется, гидролизуется и термо-
лизуется.

В таблицах 3-5 приведен анализ сгорания газообразных продуктов ГПА после внедрения СКВ в
зависимости от выбора реагента и режима работы.

Таблица 3 – Частота вращения ТНД – 3799-4200 об/мин

Наименование загрязняющего вещества	Валовый выброс, т		Экологический эффект	
	до очистки	после очистки	т	%
1	2	3	4	5
Реагент – карбамид				
NO₂	0,154	0,008	0,146	95
NO	0,092	0,005	0,087	95
CO	0,211	0,208	0,004	2
Реагент – аммиак				
NO₂	0,194	0,020	0,174	90
NO	0,115	0,012	0,103	90
CO	0,202	0,208	0,006	3

При частоте вращения ТНД ГПА 3799-4200 об/мин эффективность очистки при использовании
в качестве реагента карбамид выше на 5,3 % в сравнении с использованием в качестве реагента
аммиак.

При частоте вращения ТНД ГПА 4500 об/мин эффективность очистки при использовании в каче-
стве реагента аммиак выше на 5,3 % в сравнении с использованием в качестве реагента карбамид.

При частоте вращения ТНД ГПА 5000-5010 об/мин эффективность очистки при использо-
вании в качестве реагента аммиак выше на 23,6 % в сравнении с использованием в качестве
реагента карбамид.

Таблица 4 – Частота вращения ТНД – 4500 об/мин

Наименование загрязняющего вещества	Валовый выброс, т		Экологический эффект	
	до очистки	после очистки	т	%
1	2	3	4	5
Реагент – карбамид				
NO_2	0,257	0,030	0,227	88
NO	0,153	0,018	0,135	88
CO	0,179	0,172	0,007	4
Реагент – аммиак				
NO_2	0,257	0,018	0,239	93
NO	0,153	0,011	0,142	93
CO	0,183	0,170	0,011	6

Таблица 5 – Частота вращения ТНД – 5000-5010 об/мин

Наименование загрязняющего вещества	Валовый выброс, т		Экологический эффект	
	до очистки	после очистки	т	%
1	2	3	4	5
Реагент – карбамид				
NO_2	0,337	0,099	0,238	71
NO	0,201	0,059	0,142	71
CO	0,168	0,163	0,005	3
Реагент – аммиак				
NO_2	0,335	0,025	0,310	93
NO	0,200	0,015	0,185	93
CO	0,188	0,162	0,026	16

В целом, согласно полученным результатам, можно сделать вывод, что при увеличении частоты вращения ТНД ГПА эффективность очистки увеличивается при использовании в качестве реагента аммиак и снижается при использовании в качестве реагента карбамид.

В дальнейшем была выполнена аппроксимация данных по вышеприведенным результатам для возможности построения зависимости по эффективности работы системы СКВ на трех режимах проведения испытаний для различного расхода реагента.

На рисунках 7, 8, 9 представлены зависимости концентрации оксидов азота суммарно (в пересчете на NO_x) до и после системы СКВ на различных режимах испытаний при изменении расхода реагента впрыском в отходящие газы ГПА.

Установлено, что 100 % эффективность очистки отходящих газов от оксидов азота с использованием системы СКВ наблюдается на режиме 0,5 от номинала при всех расходах реагента и на режиме 0,75 от номинала при малых расходах реагента (0,32-0,36 л/мин). В то же время на режиме испытаний 0,75 от номинала достигнут требуемый уровень концентрации после системы СКВ в 50 мг/м³ (т.е. достигнута концентрация в 43-48 мг/м³ при расходе реагента 0,47-0,48 л/мин).

На режиме, равном номинальному, эффективная работа системы СКВ наблюдается при увеличении расхода реагента до 0,8-1,0 л/мин. Концентрации NO_x (приведенное к 15 % O_2 в дымовых газах) до 50 мг/м³.

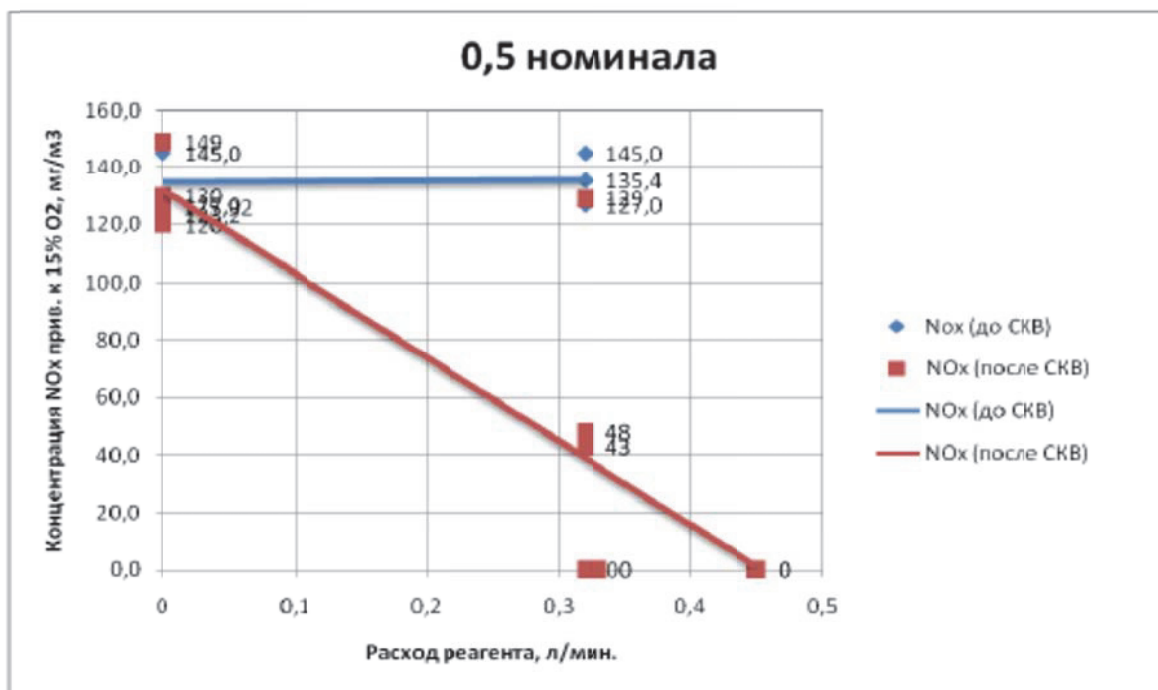


Рисунок 7 – Концентрация оксидов азота суммарно до и после системы СКВ в 0,5 от номинального режима работы

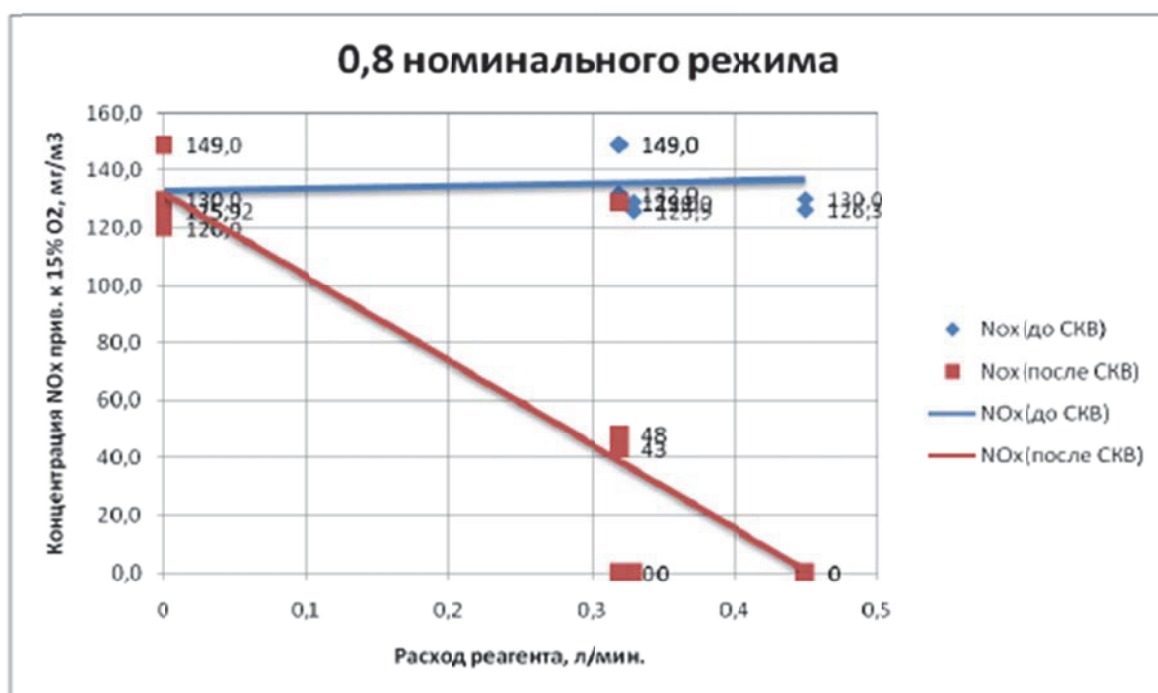


Рисунок 8 – Концентрация оксидов азота суммарно до и после системы СКВ в 0,8 от номинального режима работы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Всего было выполнено и обработано 17 серий замеров оксидов азота в составе отходящих газов. Замеры были выполнены при одновременном контроле состава отходящих газов до и после системы СКВ, кроме двух серий замеров, выполненных без подачи реагента.

При сопоставлении данных испытаний было установлено:

- на режиме 0,5 от номинала и расходе реагента 0,78 л/мин концентрация оксидов азота суммарно в пересчете на NO_x после системы СКВ равнялась 0, что соответствует 100% эффективности системы очистки отходящих газов;

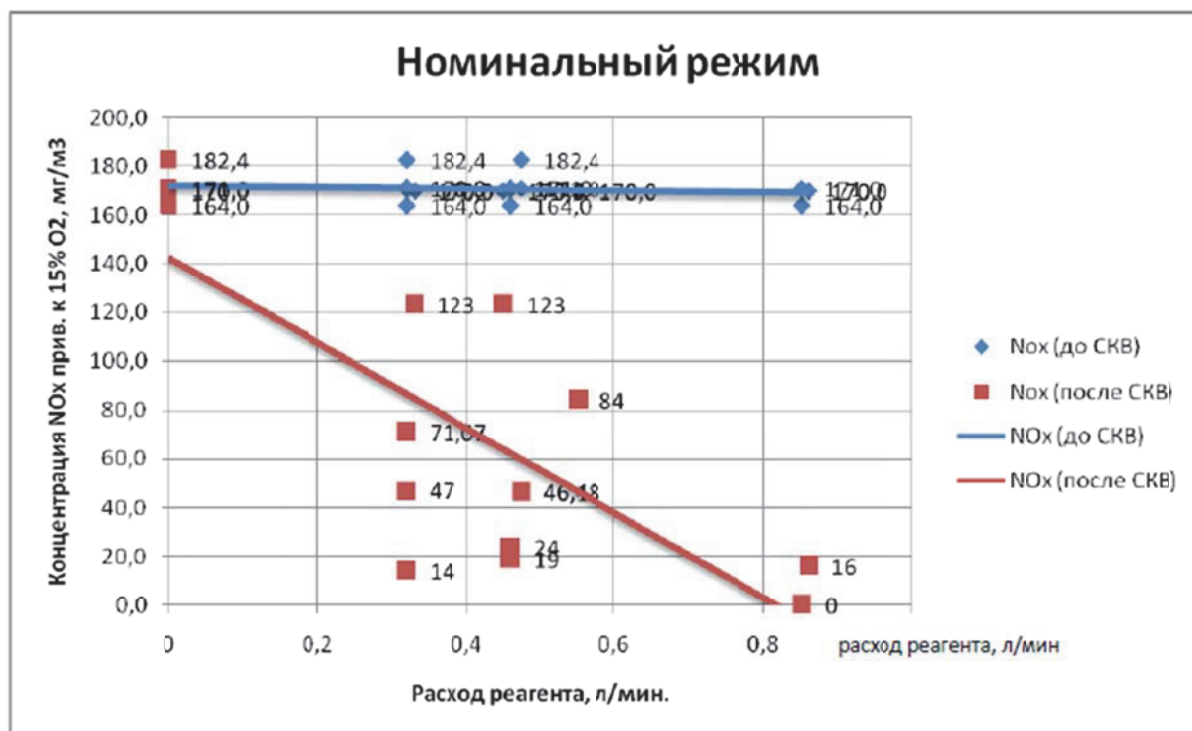


Рисунок 9 – Концентрация оксидов азота суммарно до и после системы СКВ в номинальном режиме работы

- на режиме 0,75 от номинала и расходе реагента в диапазоне от 0,395 и 0,89 л/мин концентрация оксидов азота суммарно после системы СКВ варьировалась от 4 до 42 мг/м³, что составило 48-96 % эффективности системы очистки отходящих газов;

- на режиме 0,9-1,0 от номинала и расходе реагента в диапазоне 0,49-1,03 л/мин концентрация оксидов азота суммарно после системы СКВ варьировалась в пределах 6-25 мг/м³, что соответствует 85-96 % эффективности системы очистки отходящих газов.

При анализе результатов испытаний была выполнена аппроксимация данных по всем полученным результатам для возможности построения зависимости по эффективности работы системы СКВ для различного расхода реагента.

Результаты данных свидетельствуют о подтверждении 100% эффективности очистки отходящих газов от оксидов азота при применении системы СКВ на режиме 0,5 от номинала при всех расходах реагента. В то же время наблюдается прямая зависимость эффективности (вплоть до 100 %) при увеличении расхода реагента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петроченков, А.Б. Об одном формализованном методе оценки управленческих решений (на примере управления электротехническими объектами) / А.Б. Петроченков, А.В. Ромодин, Н.И. Хорошев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2009. – № 5 (87). – С. 166-177.
2. Lyakhomskii A. Assessment of the harmonics influence on the power consumption of an electric submersible pump installation / Lyakhomskii A., Petrochenkov A., Perfil'eva E., Romodin A., Mishurinskikh S., Kokorev A., Zuev S. // Energies. – 2022. – № 15(7):2409.
3. Petrochenkov A.B. Experience in developing a physical model of submersible electrical equipment for simulator systems: research and training tasks on the agenda of a key employer / Petrochenkov A.B., Romodin A.V., Mishurinskikh S.V., Seleznev V.V., Shamaev V.A. // Proceedings of 2018 17th Russian Scientific and Practical Conference on Planning and Teaching Engineering Staff for the Industrial and Economic Complex of the Region, PTES 2018. – St. Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 114-117.
4. Елтышев, Д.К. К вопросу о применении генетических методов для решения задач поддержки жизненного цикла электрооборудования / Д.К. Елтышев, А.Б. Петроченков, С.В. Бочкарёв // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2009. – № 2 (20). – С. 136-142.
5. Abramovich B. The application of modern information technologies for power monitoring and control in conditions of distributed generation / B. Abramovich, Y. Sychev, V. Prokhorova // Proceedings of 16th Conference of Open Innovations Association FRUCT. – 2014. – P. 3-8.
6. Abramovich B.N. The shunt active filters implementation for power quality increasing in electrical networks of Priobskoye deposit / B.N. Abramovich, Yu.A. Sychev, V. Burchevskiy, R.A. Ulbaev, V.V. Polishuk // Neftyanoe khozyaystvo - Oil Industry. – 2011. – № 6. – С. 130-132.
7. Abramovich B.N. Hybrid harmonic compensation device adapted for variable speed drive system / B.N.

- Abramovich, Y.A. Sychev, R.Y. Zimin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2017. — № 87(3). DOI:10.1088/1755-1315/87/3/032002.
8. Abramovich B.N. Shunt active correction system analysis in conditions of industrial enterprises networks / B.N. Abramovich, Y.A. Sychev // International Journal of Applied Engineering Research. — 2016. — № 11(4). — P. 2640–2645.
 9. Черепанов, Н.А. Система селективного каталитического восстановления для снижения выбросов NOX газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом / Н.А. Черепанов, А.Б. Петроченков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. — 2023. — № 46. — DOI: 10.15593/2224-9397/2023.2.09
 10. Кулиш, О.Н. Сокращение выбросов оксидов азота в атмосферу на предприятиях газовой промышленности / Кулиш О.Н., Кужеватов С.А., Орлова М.Н. // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. — 2010. — №1. — С.8-12.
 11. Енсен-Хольм, Х. Аспекты проектирования процесса СКВ для снижения выбросов NOx от тепловых электрических станций / Х. Енсен-Хольм, П. Линдерхофф, С. Сафронов // Haldor Topsoe A/S. — 2017
 12. Крутиев, В.А. Исследование комбинированного метода уменьшения выбросов окислов азота // Электрические станции. — 1977. — №4. — С. 12-14.

QUALITY MANAGEMENT OF GASEOUS PRODUCTS COMBUSTION IN A GAS COMPRESSOR UNIT USING A SELECTIVE CATALYTIC REDUCTION SYSTEM

© 2025 A.B. Petrochenkov, N.A. Cherepanov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

This study presents the results of implementing a selective catalytic reduction (SCR) system in gas transport operations using gas compressor units (GCU) driven by gas turbines. The calculated values of NO_x emission power, flue gas flow rate, and temperature are determined as functions of gas turbine unit (GTU) load and ambient air temperature. The experimental results indicate that 100% NO_x removal efficiency was achieved at 50% of the nominal operating mode for all reagent consumption levels and at 75% of the nominal operating mode for low reagent consumption (0.32-0.36 L/min). At 75% of the nominal mode, the required post-SCR NO_x concentration level of 50 mg/m³ was reached (actual concentration: 43-48 mg/m³ with reagent consumption of 0.47-0.48 L/min).

Keywords: Gas compressor unit, gas turbine unit, selective catalytic reduction, NO_x removal efficiency, flue gas temperature, excess air ratio, pollutant emissions, SCR reagent (urea/ammonia), emission rate, operational loads.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-5-15

EDN: KJHCPO

REFERENCES

1. Petrochenkov, A.B. Ob odnom formalizovannom metode ocenki upravlencheskih reshenij (na primere upravleniya elektrotekhnicheskimi ob'ektami) / A.B. Petrochenkov, A.V. Romodin, N.I. Horoshev // Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. — 2009. — № 5 (87). — S. 166-177.
2. Lyakhomskii A. Assessment of the harmonics influence on the power consumption of an electric submersible pump installation / Lyakhomskii A., Petrochenkov A., Perfil'eva E., Romodin A., Mishurinskikh S., Kokorev A., Zuev S. // Energies. — 2022. — № 15(7):2409.
3. Petrochenkov A.B. Experience in developing a physical model of submersible electrical equipment for simulator systems: research and training tasks on the agenda of a key employer / Petrochenkov A.B., Romodin A.V., Mishurinskikh S.V., Seleznev V.V., Shamaev V.A. // Proceedings of 2018 17th Russian Scientific and Practical Conference on Planning and Teaching Engineering Staff for the Industrial and Economic Complex of the Region, PTES 2018. — St. Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. — P. 114-117.
4. Eltysh, D.K. K voprosu o primeneniі geneticheskikh metodov dlya resheniya zadach podderzhki zhiznennogo cikla elektrooborudovaniya / D.K. Eltysh, A.B. Petrochenkov, S.V. Bochkaryov // Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki. — 2009. — № 2 (20). — S. 136-142.
5. Abramovich B. The application of modern information technologies for power monitoring and control in conditions of distributed generation / B. Abramovich, Y. Sychev, V. Prokhorova // Proceedings of 16th Conference of Open Innovations Association FRUCT. — 2014. — P. 3-8.
6. Abramovich B.N. The shunt active filters implementation for power quality increasing in electrical networks of Priobskoye deposit / B.N. Abramovich, Yu.A. Sychev, V. Burchevsky, R.A. Ulbaev, V.V. Polishuk // Neftyanoe khozyaystvo - Oil Industry. — 2011. — № 6. — S. 130-132.
7. Abramovich B.N. Hybrid harmonic compensation device adapted for variable speed drive system / B.N. 8. Abramovich, Y.A. Sychev, R.Y. Zimin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2017. — № 87(3). DOI:10.1088/1755-1315/87/3/032002.
8. Abramovich B.N. Shunt active correction system analysis in conditions of industrial enterprises networks / B.N. Abramovich, Y.A. Sychev // International Journal of Applied Engineering Research. — 2016. — № 11(4). — P. 2640–2645.
9. Cherepanov, N.A. Sistema selektivnogo kataliticheskogo vosstanovleniya dlya snizheniya vybrosov NOX gazoperekachivayushchih agregatov s gazoturbinnym privodom / N.A. Cherepanov, A.B. Petrochenkov // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informacionnye tekhnologii, sistemy upravleniya. — 2023. — № 46. — DOI: 10.15593/2224-9397/2023.2.09
10. Kulish, O.N. Sokrashchenie vybrosov oksidov azota v atmosferu na predpriyatiyah gazovoy promyshlennosti / Kulish O.N., Kuzhevato S.A., Orlova M.N. // Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse. — 2010. — №1. — S.8-12.
11. Ensen-Hol'm, H. Aspekty proektirovaniya processa SKV dlya snizheniya vybrosov NOx ot teplovykh elektricheskikh stancij / H. Ensen-Hol'm, P. Linderhoff, S. Safronov // Haldor Topsoe A/S. — 2017
12. Krutiev, V.A. Issledovanie kombinirovannogo metoda umen'sheniya vybrosov okislov azota // Elektricheskie stancii. — 1977. — №4. — S. 12-14.

Anton Petrochenkov, Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, the Chair of the Microprocessor Units of Automatisatıon Department, E-mail: petrochenkov@pstu.ru.

Nikita Cherepanov, Graduate Student of the Microprocessor Units of Automatisatıon Departmen. E-mail: nikita.cherepanow@gmail.com