

УДК 658.562.012.7

УНИФИКАЦИЯ И РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ СЕЛЕКТИВНОГО КАТАЛИТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЛЯ КАЖДОГО ТИПА ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ В ДИАПАЗОНЕ МОЩНОСТИ ОТ 4 ДО 32 МВт

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

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия

Статья поступила в редакцию 03.07.2025

В статье приводятся результаты внедрения системы селективного каталитического восстановления в транспорте газа при эксплуатации газоперекачивающих агрегатов. Проведен расчет необходимого объема катализатора и расхода реагента для обеспечения эффективной работы системы селективного каталитического восстановления. Описаны основные элементы системы селективного каталитического восстановления. Проведена Оценка эффективности снижения негативного воздействия на атмосферный воздух с использованием системы селективного каталитического восстановления.

Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат, система селективного каталитического восстановления, унификация системы селективного каталитического восстановления, реагент.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4-59-70

EDN: DHQXLC

ВВЕДЕНИЕ

Снижение техногенного воздействия на экосистему является одной из ключевых задач повестки сегодняшнего дня. Совершенствование технологий транспортировки газа представляет собой комплексную задачу, связанную с разработкой современных подходов к диагностике, мониторингу и контролю состояния окружающей среды. Загрязнение окружающей среды токсичными продуктами сгорания органического топлива остаётся одной из важнейших экологических проблем.

В настоящее время на законодательном уровне наблюдается ужесточение требований к соблюдению нормативов выбросов загрязняющих веществ в отходящих газах газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Согласно экологической политике, концентрация оксидов азота в продуктах сгорания не должна превышать 50 мг/м³. Использование перспективных газотурбинных двигателей, оснащённых малоэмиссионными камерами сгорания в составе ГПА, позволяет обеспечить соблюдение установленных нормативов для вновь разрабатываемых агрегатов.

Тем не менее, данное решение не устраняет проблему превышения эмиссии NO_x в продуктах сгорания значительного количества ГПА, находящихся в эксплуатации.

Таким образом, возникает необходимость в поиске универсального и унифицированного способа снижения концентрации NO_x в продуктах сгорания газотурбинных приводов как на новых, так и на уже эксплуатируемых ГПА. Одним из таких способов может стать внедрение в состав ГПА системы селективного каталитического восстановления (СКВ).

ПОДХОД И АНАЛИЗУ УНИФИКАЦИИ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ НА ОСНОВЕ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Унификация технических решений на основе научно-практических исследований нацелена на повышение эффективности, надежности и совместимость различных технических систем, что достигается путем проведения исследований и экспериментов, изучения передового опыта. Для решения задачи снижения техногенного воздействия на экосистему за счет совершенствования технологий транспортировки газа необходимо унифицировать:

- конструктивные и компоновочные решения системы селективного каталитического восстановления;
- программу и методику испытаний.

Унификация программы и методов испытаний это научно-обоснованный выбор и внедрение единых процедур контроля качества, удовлетворяющих современному уровню науки и потребностям практики. Главная цель унификации программы и методов испытаний состоит в том, что процедуры должны быть надежны, а результаты сопоставимы с результатами других лабораторий [24].

Петроченков Антон Борисович, доктор технических наук, профессор, ректор. E-mail: rector@pstu.ru

Черепанов Никита Александрович, аспирант кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации».

E-mail: nikita.cherepanow@gmail.com

В основе установления правил и процедур программы и методов испытаний отнесем три группы критериев:

- ✓ Аналитические – определяются современным уровнем методологии.
- ✓ Технологические – определяются задачами, поставленными в жизненном цикле изделий.
- ✓ Техничко-экономические – определяются практическими возможностями лаборатории.

К аналитическим критериям унификации отнесем:

- специфичность – способность определять параметр или группу параметров, показателей качества.
- точность – это качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины;
- достоверность измерений характеризует степень доверия к результатам измерений. Достоверность оценки погрешностей определяют на основе законов теории вероятностей и математической статистики. Это дает возможность для каждого конкретного случая выбирать средства и методы измерений, обеспечивающие получение результата, погрешности которого не превышают заданных границ;
- правильность измерений – качество измерений, отражающее близость к нулю систематических погрешностей в результатах измерений.
- сходимость – качество измерений, отражающее близость друг к другу результатов измерений, выполняемых в одинаковых условиях. Сходимость измерений отражает влияние случайных погрешностей;
- воспроизводимость – это такое качество измерений, которое отражает близость друг к другу результатов измерений, выполняемых в различных условиях (в разное время, в различных местах, разными методами и средствами);
- погрешность измерения – отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины. Погрешность измерений представляет собой сумму ряда составляющих, каждая из которых имеет свою причину.

Группа критериев технологического характера включает в себя:

- значимость параметров и показателей качества;
- длительность метода по отношению к срокам ввода в эксплуатацию;
- метод контроля (разрушающий, неразрушающий).

ТРИ ПОДХОДА ДЛЯ ВЫБОРА КАТАЛИЗАТОРОВ

Расчет количества катализатора, необходимого для обеспечения заданной эффективности очистки, является одним из основных условий реализации СКВ-процесса. Расчеты необходимо проводить при одновременном учете ряда подходов.

Во-первых, расчеты осуществляются по кинетическим уравнениям денитрификации с учетом влияния на процесс основных параметров: константы скорости реакции для используемого катализатора и времени протекания реакции, температуры, концентрации реагентов и продуктов, а также линейной скорости газового потока. Поскольку каталитический процесс протекает на поверхности катализаторов, то при кинетическом расчете должны учитываться значения удельных общих (определяемой по адсорбции азота) и внешней геометрической площадей поверхностей катализаторов, а следовательно, и их геометрические формы [1-5].

Во-вторых, объем загруженного катализатора определяется качеством смешения аммиака с дымовым газом по сечению реактора. Теоретически при мольном соотношении $NH_3/NO_x > 1$ можно обеспечить эффективность очистки 100%. Однако нормирование проскока непрореагировавшего аммиака на уровне 5 млн-1 исключает возможность дозирования избыточного количества аммиака. Также является очевидным, что для высокой эффективности очистки при мольном соотношении $NH_3/NO_x < 1$ необходимо, чтобы мольное соотношение NH_3/NO_x по сечению реактора перед катализатором было постоянным [6,7]. На практике этого достигнуть не удастся, поэтому заданные условия процесса (эффективность и проскок аммиака) могут быть в определенной мере обеспечены за счет увеличения количества катализатора. В этом случае в части сечения реактора эффективность очистки окажется ниже заданной (например, из-за недостаточного количества NH_3), в остальном сечении, напротив, эффективность будет выше заданной.

В-третьих, необходимое количество катализатора зависит от скорости его дезактивации, определяемой концентрацией и химической природой каталитических ядов в дымовых газах и золе [8-10].

РАСЧЕТ НЕОБХОДИМОГО ОБЪЕМА КАТАЛИЗАТОРА И РАСХОДА РЕАГЕНТА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ СИСТЕМЫ СКВ

Исходные данные по качественному и количественному составу выхлопных газов ГПА-16 «Урал» были приняты в соответствии с данными разработчика ГПА – ПАО НПО «Искра» и приведены в таблице 1:

Таблица 1 – Состав выхлопных газов за свободной турбиной ГТУ-16П при $T_n = +15^\circ\text{C}$

Режим работы ГТУ, % ном. мощности	100	50
Коэффициент избытка воздуха	3,53	4,72
Состав выхлопных газов при стандартной влажности воздуха (объемные %):		
O_2	14,35	15,90
N_2	75,55	76,10
CO_2	2,88	2,17
H_2O	7,22	5,83
Содержание вредных веществ, прив. К 15 % O_2 , мг/м ³ , не более:		
NO_x		
CO	180	137
SO_x^*	47	128
*- для состава топливного газа по ГОСТ 23184-83 с максимальным содержанием серосодержащих соединений по ГОСТ 5542	0,3	
Полная температура потока, $^\circ\text{C}$	486,6	404,8
Расход газа, кг/с	55,38	42,92

Расчетные значения требуемого объема катализатора, удельного расхода реагента для режимов 100 % и 50 % мощности работы ГПА (жидкость «AdBlue» – 32,5 % водный раствор карбамида), зависимости расчетного значения гидравлического сопротивления от площади каталитического реактора.

Таблица 2 – Расчетные значения объема катализатора и расхода реагента (100 % мощности ГТУ)

ГТУ-16П (100 % ном. мощности)		
параметр	значение	ед. измерения
Массовый расход выхлопных газов	55,38	кг/с
Температура выхлопных газов	486,6	$^\circ\text{C}$
Давление, абс	101350	Па
Концентрация NO_x	180	мг/м ³
Концентрация CO	47	мг/м ³
Молярная масса выхлопных газов	28,3128	г/моль
Универсальная газовая постоянная	8,314	м ² *кг/(с ² *К*моль)
Плотность горячих выхлопных газов	0,454372039	кг/м ³
Объемный расход выхлопных газов при н.у.	45,95850622	м ³ /с
Объемный расход горячих выхлопных газов	121,8824999	м ³ /с
Массовый расход NO_x	21,93884999	г/с
Массовый расход CO	5,728477497	г/с
Массовый расход реагента	18,20924549	г/с
Требуемый минимальный объем катализатора	18	м ³
Массовый расход реагента	65,55328377	кг/ч

На основании данных расчетов по требуемому объему катализатора и с учетом существующей компоновки оборудования, ограничений по «этажности» установки каталитических модулей друг на друга (не более четырех) была спроектирована следующая компоновка каталитических модулей в реакторе (таблица 4).

Экспериментальная проверка каталитических систем проведена на каталитическом реакторе типа ГПА-16 МВт (таблица 4), проведен комплекс аэродинамических расчетов выхлопного тракта с установленной системой СКВ; рассчитан объем катализатора и расход реагента необходимый

Таблица 3 – Расчетные значения объема катализатора и расхода реагента (50 % мощности ГТУ)

ГТУ-16П (50 % ном. Мощности)		
параметр	значение	ед. измерения
Массовый расход выхлопных газов	42,92	кг/с
Температура выхлопных газов	404,8	°С
Давление, абс	101350	Па
Концентрация NO_x	137	мг/м ³
Концентрация CO	128	мг/м ³
Молярная масса выхлопных газов	28,4002	г/моль
Универсальная газовая постоянная	8,314	м ² *кг/(с ² *К*моль)
Плотность горячих выхлопных газов	0,510779627	кг/м ³
Объемный расход выхлопных газов при н.у.	35,61825726	м ³ /с
Объемный расход горячих выхлопных газов	84,02841013	м ³ /с
Массовый расход NO_x	11,51189219	г/с
Массовый расход CO	10,7556365	г/с
Массовый расход реагента	9,554870516	г/с
Требуемый минимальный объем катализатора	10	м ³
Массовый расход реагента	34,39753386	кг/ч
Массовый расход реагента	825,5408126	кг/сутки

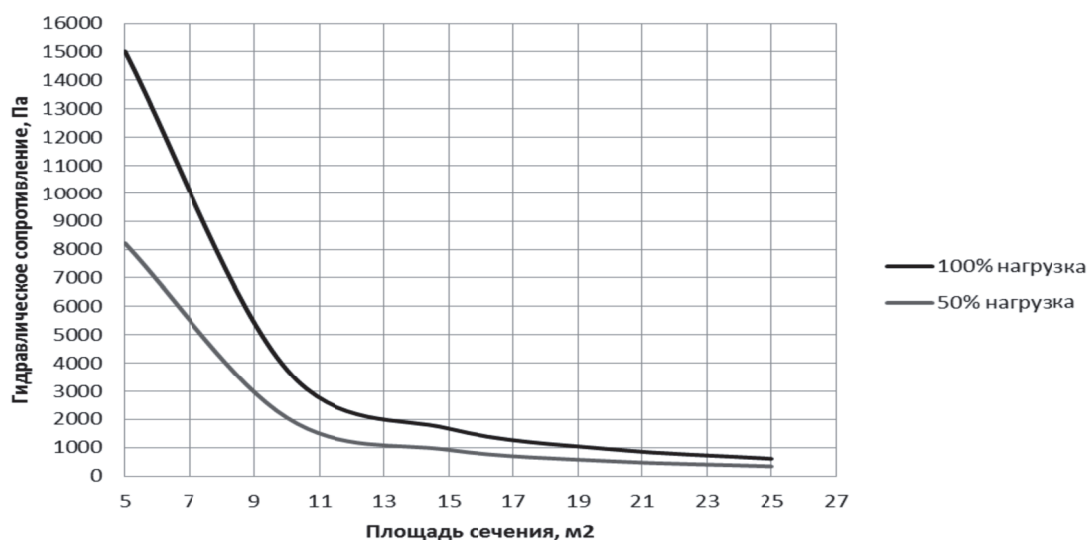


Рисунок 1 – Зависимость гидравлического сопротивления каталитического реактора от проходного сечения (при размерах блоков сотовой керамики 150x150x1300)

Таблица 4 – Компоновка модулей каталитического реактора

Графическое изображение	Расчетное гидравлическое сопротивление, Па	Площадь газотока, м²	Габариты Ш x В x Г, мм
	883	20,62	5330x3870x1560

для обеспечения эффективной работы системы СКВ. Была разработана программа и методика испытаний.

Носитель катализатора представляет собой сотовый материал, который производится из специально подготовленной сотовой керамики, на которую наносится оксид титана, создающий разветвленную многоуровневую систему пор.

Таблица 5 – Количество катализаторов,
устанавливаемых в каталитический реактор для различных типов ГПА

Установка	Расход выхлопного газа, кг/с	Температура, °С	Концентрация NO_x , мг/м ³	Количество катализаторов, шт.	Расход реагента, кг/ч
ГТД-4РМ	26,0	425	121,0	6	9,0
ГПА-6,3	32,6	535	151,7	8	11,3
ГПА-10	55,6	511	258,8	12	19,2
ГПА-16	70,0	570	325,8	16	24,2
ГПА-25 и большей мощности	79,6	514	370,4	18	27,6

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ВЫХЛОПНОГО ТРАКТА С УСТАНОВЛЕННОЙ СИСТЕМОЙ СКВ

Как было описано выше для эффективной очистки дымовых газов ГПА от окислов азота при проектировании системы необходимо было выполнить следующие условия:

- обеспечить должный уровень равномерности распределения термолизированного реагента по входному сечению катализатора (по молярному соотношению оксидов азота и термолизированного реагента отклонение не должно превышать 15 %) [11-14];
- обеспечить отклонение потока выхлопных газов ГТУ по скорости потока, набегающего на узел впрыска, не более 10 %;
- сохранить отклонение потока выхлопных газов ГТУ по сечению выхлопного тракта не более 10 % по температуре;
- установить отклонение потока выхлопных газов ГТУ по сечению выхлопного тракта по углу потока не более 15°.

Для решения данной проблемы в конструкции системы СКВ была применена выравнивающая решетка (перфорированный лист $Rv\ 3-5$, установленный на расстоянии около 2 м до катализатора перпендикулярно потоку), обеспечивающая снижение турбулизации потока выхлопных газов ГПА (Рисунок 2).

В результате примененная компоновка системы СКВ с установленной выравнивающей решеткой обеспечила:

- отклонение векторов скоростей от нормали на входе в катализатор не более 15 %, скоростей потока на входе в катализатор не более 15 %;
- гидравлическое сопротивление, создаваемое трактом выхлопа и элементами системы СКВ, согласно измерениям не превышало 600 Па.

Для достижения требуемой степени распределения реагента в сечении выхлопного тракта и выбора оптимального расположения форсунок впрыска реагента были проведены дополнительные расчеты.

Обеспечение равномерного распределения реагента по сечению выхлопного тракта и, соответственно, эффективность системы очистки наиболее зависима от режима работы ГПА и окружающих условий, с целью комплексной отработки различных способов ввода реагента была установлена дополнительная система впрыска реагента, основанная на отборе части дымовых газов из выхлопного тракта, термолизации реагента в их потоке и вводе термолизированного реагента в поток посредством распределительной решетки [15-19].

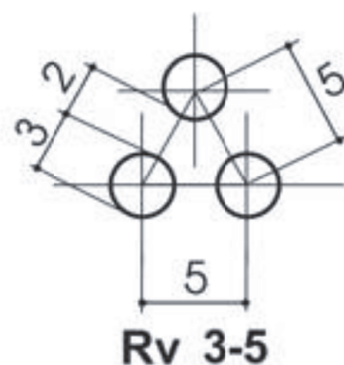


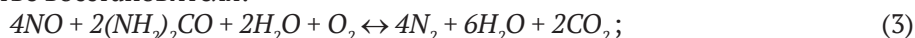
Рисунок 2 – Фрагмент сечения
выравнивающей решетки

Восстановитель впрыскивается в поток дымовых газов на входе в катализатор. Преобразование NO_x происходит на поверхности катализатора путем одной из следующих основных реакций.

1. С аммиаком в качестве восстановителя:



2. С мочевиной в качестве восстановителя:



Скорость подачи и расход восстановительного реагента определяются концентрацией NO_x на входе и выходе системы очистки.

При работе дополнительной системы впрыска ввод реагента осуществлялся в области устоявшегося потока дымовых газов (после выравнивающей решетки), что позволило сгладить влияние различных режимов работы системы СКВ и окружающих условий.

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ СКВ

Система СКВ представляет собой модули, устанавливаемые в выхлопном тракте газоперекачивающего агрегата и дополнительные модули обеспечения ее работы, размещаемые на площадке агрегата. Состав и общий вид доработанного выхлопного тракта ГПА с установленной системой СКВ представлен на рисунке 3.

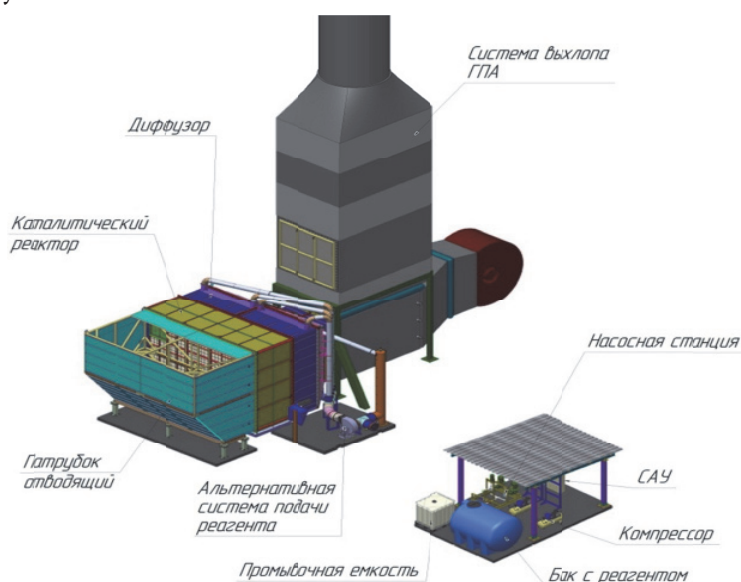


Рисунок 3– Общий вид доработанного выхлопного тракта ГПА (эскиз)

Основные технические характеристики системы приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Основные технические характеристики системы СКВ

Тип первичного носителя катализатора	сотовая керамика
Расчетный объем катализатора, л	8500
Номинальная производительность по очищаемым выбросам, $nm^3/ч$	121000
Температура катализа, °C	350-550
Тип восстановителя (реагента)	32 % раствор карбамида
Расход реагента по активному веществу (максимальный), кг/ч	11,3
Номинальное аэродинамическое сопротивление, Па	600

В состав системы СКВ входят: реактор каталитический (рисунок 4), представляющий собой сборный корпусной узел, который состоит из четырех панелей [20]. После сборки грани панелей образуют плоскую фланцевую поверхность, ответную с одной стороны фланцу диффузора, а с другой стороны фланцу патрубка отводящего.

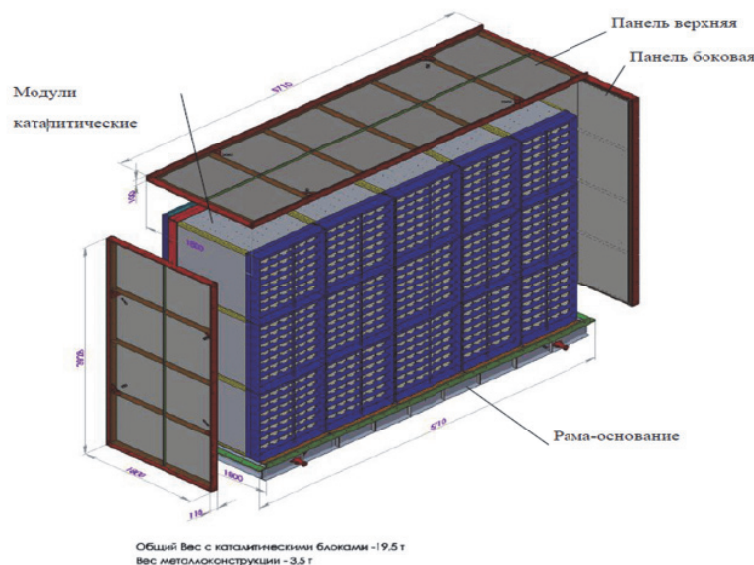


Рисунок 4 – Реактор каталитический

Каталитический реактор вмещает в себя 15 модулей каталитических общей массой около 16000 кг. Между каталитическими модулями и корпусом установлены гибкие металлические детали-заглушки, обеспечивающие невозможность движения воздуха в обход катализатора. Заглушки крепятся к модулям и стенкам реактора посредством шагового сварного шва. Габариты собранного реактора составляют: 2000x5710x4128 мм, масса металлоконструкций реактора составляет 3500 кг [21].

Система подачи реагента (основная) включает:

- форсуночные узлы, установленные в существующей части выхлопа ГПА;
- модуль распределительной системы трубопроводов с форсунками.

Система подачи реагента (дополнительная) включает в себя:

- газоходы;
- газоход-термолизатор с установленной внутри форсункой;
- заслонку, предназначенную для разбавления горячего потока дымовых газов и снижения тепловой нагрузки на вентилятор;
- вентилятор;
- распределительный коллектор для равномерной раздачи реагента в газовом потоке.

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ СКВ

В таблице 7 приведены годовые выбросы оксидов азота и углерода до и после использования системы СКВ для очистки выхлопных газов (расчет проведен на 6570 маш. /часов в год на 1 ГПА).

Таблица 7 – Годовой валовый выброс загрязняющих веществ до и после использования системы СКВ

Наименование загрязняющего вещества	Валовый выброс, т/год		Экологический эффект	
	до очистки	после очистки	т	%
1	2	3	4	5
NO_2	59,083	16,367	-42,716	72
NO	35,218	9,745	-25,473	72
Общее количество оксидов азота (NO_x)	94,301	26,112	-68,189	72
Оксид углерода (CO)	28,311	27,176	-1,135	4

Оценка эффективности снижения негативного воздействия на атмосферный воздух проведена по результатам серии замеров состава отходящих газов по загрязненным веществам с определением концентраций – оксидов азота суммарно в пересчете на NO_x и кислорода в составе отходящих газов [22]. Результаты замеров для возможности сопоставления значений были приведены к 15 % содержанию O_2 при расчете расхода продуктов сгорания по каждому замеру – нагрузках 0,5/0,8/1,0 от номинального режима работы. Из общего числа замеров только 7 замеров были выполнены при одновременном контроле состава отходящих газов до и после системы СКВ, остальные три замера были выполнены при работе ГПА без системы СКВ (без подачи реагента) [23].

РАСЧЕТ ПРЕДОТВРАЩЕННОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО УЩЕРБА

Оценка ущерба, причиняемого газовыми выбросами загрязнений в атмосферу, может производиться по формуле:

$$Y = \gamma \cdot \sigma \cdot f \cdot M, \quad (5)$$

где Y – оценка ущерба, руб./год;

γ – условный удельный ущерб от выбросов одной тонны условного загрязнителя (принимается равным 77,26 руб./усл. т);

σ – показатель относительной опасности загрязнения над территориями различных типов (для территорий промышленных предприятий – 4,0);

f – поправка, учитывающая характер рассеяния примесей в атмосфере (1,0);

M – приведенная масса годового выброса загрязнений.

Значение приведенной массы выбросов в атмосферу определяется по формуле:

$$M = \sum_{i=1}^N (A_i \cdot m_i), \quad (6)$$

где m_i – масса годового выброса примеси i -го вида в атмосферу, т/г;

A_i – показатель относительной агрессивности примеси i -го вида, усл.т/т;

N – общее число примесей, выбрасываемых в атмосферу (NO_x , CO).

Расчет экологического ущерба производится до и после внедрения системы СКВ на основе данных, представленных в таблице 8.

Таблица 8 – Исходные данные для расчета

Наименование загрязняющего вещества	Валовый выброс, т		Показатель относительной агрессивности примеси i -го вида, усл.т/т	Приведенная масса вещества до мероприятия, руб./усл.т. (M_1)	Приведенная масса вещества после мероприятия, руб./усл.т. (M_2)
	до очистки	после очистки			
NO_2	59,083	16,367	41,1	2428,31	672,68
NO	35,218	9,745	41,1	1447,46	400,52
CO	28,311	27,176	1,0	28,31	27,18
Всего				3904,08	1100,38

Ущерб атмосферному воздуху до внедрения системы СКВ (Y_1) составит:

$$Y_1 = 77,26 \cdot 4,0 \cdot 1,0 \cdot 3904,08 = 1206527,21 \text{ руб.} \quad (7)$$

Аналогичный показатель после внедрения системы СКВ (Y_2) составит:

$$Y_2 = 77,26 \cdot 4,0 \cdot 1,0 \cdot 1100,38 = 340063,92 \text{ руб.} \quad (8)$$

Таким образом, объем предотвращенного экологического ущерба от внедрения системы СКВ составит:

$$Y_{\text{пред.}} = Y_1 - Y_2 = 866463,30 \text{ руб.} \quad (9)$$

РАСЧЕТ ЗАТРАТ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Применение средозащитных мероприятий и технических средств требует значительных капитальных и эксплуатационных затрат. Капитальные вложения в защиту атмосферы в ряде отраслей промышленности составляют 20-30 % от основного производства.

Капитальные вложения K_a на атмосферозащитные мероприятия, связанные с внедрением СКВ составляют 24905520,00 руб., в т.ч. НДС. Учитывая срок эксплуатации СКВ, равного 23 годам, объём приведенных годовых капитальных затрат составит 1082848,7 руб.

Объём годовых эксплуатационных расходов C_a , связанных с функционированием СКВ, включает следующие виды затрат:

$$C_a = Z_{э/э} + Z_m. \quad (10)$$

Затраты на электроэнергию:

$$Z_{э/э} = V_{э/э} \cdot C_{э/э} \cdot t = 2 \cdot 3,5 \cdot 6\,570 = 45990,0 \text{ руб.} \quad (11)$$

Затраты на мочевины:

$$Z_m = V_{м/год} \cdot C_m = 157680 \cdot 11 = 1734480 \text{ руб.} \quad (12)$$

Итого, годовые эксплуатационные расходы составят:

$$C_a = 45990,0 + 1734480 = 1780470,0 \text{ руб.} \quad (13)$$

Объём приведенных годовых затрат составит:

$$Z_a = C_a + K_a \cdot E_n, \quad (14)$$

где E_n – нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений средозащитного назначения принимается равным 0,15 (для газовой промышленности).

$$Z_a = 1780470,0 + 1082848,7 \cdot 0,15 = 1942897,3. \quad (15)$$

Чистый экономический эффект атмосферозащитных мероприятий рассчитывается по формуле:

$$\Delta_a = Y_{пред.} - Z_a + D, \quad (16)$$

где, $Y_{пред.}$ – объём предотвращенного экологического ущерба от внедрения системы СКВ составляет 866463,30;

D – годовой прирост дохода от улучшения производственных результатов, рассчитанный как экономия денежных средств по платежам за негативное воздействие на окружающую среду составляет 1248024,0 руб./год.

$$\Delta_a = 866463,30 - 1942897,3 + 1248024,0 = 171590. \quad (17)$$

Положительная величина чистого экономического эффекта свидетельствует о том, что комплекс атмосферозащитных мероприятий, связанный с внедрением системы СКВ экономически оправдан.

Общая экономическая эффективность капитальных вложений в атмосферозащитные мероприятия оценивается на основе формулы:

$$E_a = \frac{P_a - C_a + D}{K_a}, \quad (18)$$

$$E_a = \frac{866463,30 - 1780470,0 + 1248024,0}{1082848,7} = 0,31. \quad (19)$$

В случае, если $E_a > E_n$, то капитальные вложения в природоохранные мероприятия считаются эффективными.

Срок окупаемости капитальных вложений:

$$T_{ок} = \frac{1}{E_a}, \quad (20)$$

$$T_{ок} = \frac{1}{0,31} = 3,19 \approx 3,5 \text{ года.} \quad (21)$$

Общая экономическая эффективность затрат экологического характера рассчитывается как отношение объёма полного экономического эффекта к сумме вызвавших этот эффект приведенных затрат.

$$\Delta_z = \frac{D + Y_{пред.}}{(C_a + E_n \cdot K_a)}, \quad (22)$$

где Δ_z – общая эффективность природоохранных затрат;

C_a – текущие затраты;

K_a – капитальные вложения, определившие эффект;

E_n – норматив эффективности капитальных вложений.

$$\mathcal{E}_3 = \frac{866463,30 + 1248024,0}{(1780470,0 + 0,15 \cdot 1082848,7)} = 1,08. \quad (23)$$

Экономический эффект ($\mathcal{E}_3$) или результат природоохранных затрат, представляет собой предотвращенный экономический ущерб и дополнительный доход от улучшения производственной деятельности предприятий в условиях лучшей экологической обстановки. Рассчитанная величина общей (абсолютной) экономической эффективности природоохранных затрат экологического отражает положительную результативность мероприятий по внедрению системы СКВ.

Основные эколого-экономические показатели представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Эколого-экономические показатели внедрения системы СКВ

№	Наименование показателя	До внедрения СКВ	После внедрения СКВ	Эффект
Показатели эколого-экономической эффективности				
1.	Приведенная масса годового выброса загрязнений из источника, усл. т. (оксид азота и оксид углерода)	3904,08	1100,38	2803,7
2.	Годовой ущерб от выбросов вредных веществ, руб./год	1206527,21	340063,92	866 463,30 (предотвращенный ущерб)
Показатели экономической эффективности				
3.	Экономия денежных средств по платежам за негативное воздействие на окружающую среду (сверхнормативная плата за НВОС), руб./год	1248024,0	0	1248024,0
4.	Чистый экономический эффект руб.			171590,00
5.	Общая экономическая эффективность капитальных вложений			+0,31
6.	Срок окупаемости капитальных вложений			3,5 года
7.	Общая (абсолютная) экономическая эффективность затрат экологического характера			+1,08

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка эффективности снижения негативного воздействия на атмосферный воздух проведена по результатам серии замеров состава отходящих газов по загрязненным веществам с определением концентраций – оксидов азота суммарно в пересчете на NO_x и кислорода в составе отходящих газов. Результаты замеров для возможности сопоставления значений были приведены к 15% содержанию O_2 при расчете расхода продуктов сгорания по каждому замеру – нагрузках 0,5/0,8/1,0 номинального режим работы ГПА. Из общего числа замеров только 7 замеров были выполнены при одновременном контроле состава отходящих газов до и после системы СКВ, остальные три замера были выполнены при работе ГПА без системы СКВ (без подачи реагента).

Эффективность очистки, в зависимости от выбранного режима и расхода реагента, составила от 71% до 100%, что свидетельствует о том, что работа СКВ не превышает целевой показатель 50 мг/м^3 .

Испытания на существующей системе СКВ показали снижение концентрации NO_x выхлопных газов ГПА-16 «Урал» и возможностью унификации системы для других типов ГПА и выбора количества катализаторов для каталитического реактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пугач, Л.И. Нетрадиционная энергетика – возобновляемые источники, использование биомассы, термохимическая подготовка, экологическая безопасность / Л. И. Пугач, Ф. А. Серант, Д. Ф. Серант. – Новосибирск: НГТУ, 2006 – 345 с.
2. Липов, Ю.М. Компоновка и тепловой расчет парового котла [Текст] / Ю. М Липов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 208 с.
3. Токсичные ингредиенты продуктов сгорания органического топлива / [Электронный ресурс] // ИМДОС-М. Газомазутные горелки для печей нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. – URL: <http://promgorelki.ru/2013-05-28-14-05-37> (дата обращения: 01.05.2025).
4. Жуйков, А. В. Снижение оксидов азота в топках котлов / А.В. Жуйков // Журнал СВУ. Техника и технологии. – 2011. – № 6. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/snizhenie-oksidov-azota-v-topkakh-kotlov> (дата обращения: 29.05.2025).
5. Крутиев, В.А. Исследование комбинированного метода уменьшения выбросов окислов азота / В.А. Крутиев, Т.Б. Эфендиев, А.Д. Горбаненко // Электрические станции. – 1977. – №4. – С. 12-14.
6. SCR: New and Improved // Chemical Engineering URL: <https://www.chemengonline.com/scr-new-and-improved/?printmode=1> (дата обращения: 10.04.2025).
7. Simple Cycle SCR Operating Experience // Cormetech URL: <https://www.cormetech.com/wp-content/uploads/2018/05/200512PowerGen-simplecycle.pdf> (дата обращения: 10.04.2025).
8. Andrews R.L., “Effect of flue gas recirculation in emission from heating oil combustion” / Andrews R.L., Siegmund C.W., Levine D.A. // Paper №68-21, APCA Meeting. Minneapolis, 1968.
9. Bagwell F.A. «Utility boiler operating modes for reduced nitric oxide emissions» // JAPCA, 1971. Vol.21, №11, p.19-23.
10. Takahashi Y. Development of super-law NOx PM-burner // Technical review. Mitsubishi Heavy Industries. - 1979. - №134. - pp. 1-11.
11. Nuria Fernández-Miranda, M. Antonia Lopez-Anton, Teresa Torre-Santos, Mercedes Díaz-Somoano, M. Rosa Martínez-Tarazona Impact of Oxy-Fuel Conditions on Elemental Mercury Re-Emission in Wet Flue Gas Desulfurization Systems // Environmental Science & Technology. - 2016. - №50 (13). - pp. 7247-7253. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00210>.
12. Xuesen Du, Jiyun Tang, Xiang Gao, Yanrong Chen, Jingyu Ran, and Li Zhang. Molecular Transformations of Arsenic Species in the Flue Gas of Typical Power Plants: A Density Functional Theory Study // Energy & Fuels. - 2016. - №30 (5). – pp. 4209-4214. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b03029>.
13. Constance L. Senior, Corey A. Tyree, Noah D. Meeks, Chethan Acharya, Joseph D. McCain, Kenneth M. Cushing Selenium Partitioning and Removal Across a Wet FGD Scrubber at a Coal-Fired Power Plant // Environmental Science & Technology. - 2015. - № 49 (24). - pp. 14376-14382. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03722>.
14. Eric C. Tyo, A. W. Castleman, Jr., Detlef Schröder, Petr Milko, Jana Roithova, Jean Michel Ortega, Maria Agostina Cinellu, Fabio Cocco and Giovanni Minghetti. Large Effect of a Small Substitution: Competition of Dehydration with Charge Retention and Coulomb Explosion in Gaseous [(bipyR)Au(μ-O)2Au(bipyR)]²⁺ Dications. Journal of the American Chemical Society 2009, 131 (36) , 13009-13019. <https://doi.org/10.1021/ja902773b>
15. B.N. Abramovich, Y.A. Sychev, Shunt active correction system analysis in conditions of industrial enterprises networks. International Journal of Applied Engineering Research, 2016, 11(4), pp. 2640–2645.
16. B.N. Abramovich, Y.A. Sychev, D.N. Pelenev, Invariant protection of high-voltage electric motors of technological complexes at industrial enterprises at partial single-phase ground faults. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 327(5), 052027.
17. B.N. Abramovich, P.A. Kuznetsov, Yu.A. Sychev, Protective Controller against Cascade Outages with Selective Harmonic Compensation Function. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1015(2), 022001.
18. Yu.A. Sychev, V.N. Kostin, V.A. Serikov, M.E. Aladin, Nonsinusoidal modes in power-supply systems with nonlinear loads and capacitors in mining. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2023, (1), pp. 159–179.
19. Y.A. Sychev, M.E. Aladin, S.V. Aleksandrovich, Developing a hybrid filter structure and a control algorithm for hybrid power supply. International Journal of Power Electronics and Drive Systems, 2022, 13(3), pp. 1625–1634.
20. 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
21. Petrochenkov A., Makarov A., Cherepanov N. Evaluation of process efficiency of gaseous products combustion within selective catalytic reduction system in gas pumping units with gas turbine drive used // International Journal for Quality Research. – 2024. – vol.19, n2, 10.24874/IJQR19.02-08. DOI: 10.24874/IJQR19.02-08.
22. Lyakhomskii A., Petrochenkov A., Perfil'eva E., Romodin A., Mishurinskikh S., Kokorev A., Zuev S. Assessment of the harmonics influence on the power consumption of an electric submersible pump installation. Energies. 2022. - 15. - 7.
23. 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.
24. Ключков, Ю. С. Методика моделирования бизнес-процессов / Ю. С. Ключков, Т. С. Яницкая, Е. А. Стрельников [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2005. – № 4. – С. 26-34.

UNIFICATION AND IMPLEMENTATION OF A SELECTIVE CATALYTIC REDUCTION SYSTEM FOR EACH TYPE OF GAS COMPRESSOR UNIT WITHIN THE POWER RANGE OF 4 TO 32 MW

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

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

This paper presents the results of implementing a Selective Catalytic Reduction (SCR) system in gas transportation processes involving the operation of gas compressor units (GCUs). The study includes the calculation of the required catalyst volume and reagent consumption to ensure the efficient performance of the SCR system. The key components of the SCR system are described. The effectiveness of reducing atmospheric air pollution through the use of the SCR system is assessed.

Keywords: gas compressor unit, selective catalytic reduction system, SCR system unification, reagent.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4-59-70

EDN: DHQXLC

REFERENCES

1. *Pugach, L.I.* Netradicionnaya energetika – vozobnovlyayemye istochniki, ispol'zovanie biomassy, termohimicheskaya podgotovka, ekologicheskaya bezopasnost' / L. I. Pugach, F. A. Serant, D. F. Serant. – Novosibirsk: NGTU, 2006 – 345 c.
2. *Lipov, Yu. M.* Komponenty i teplovoy raschet parovogo kotla [Tekst] / Yu. M. Lipov. – M.: Energoatomizdat, 1988. – 208 c.
3. Toksichnye ingredienty produktov sgoraniya organicheskogo topliva / [Elektronnyj resurs] // IMDOS-M. Gazomazutnye gorelki dlya pechej neftepererabatyvayushchej i neftekhimicheskoy promyshlennosti. – URL: <http://promgorelki.ru/2013-05-28-14-05-37> (data obrashcheniya: 01.05.2025).
4. *Zhujkov, A. V.* Snizhenie oksidov azota v topkakh kotlov / A.V. Zhujkov // Zhurnal SFU. Tekhnika i tekhnologii. – 2011. – № 6. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/snizhenie-oksidov-azota-v-topkakh-kotlov> (data obrashcheniya: 29.05.2025).
5. *Krutiev, V.A.* Issledovanie kombinirovannogo metoda umen'sheniya vybrosov okislov azota / V.A. Krutiev, T.B. Efendiev, A.D. Gorbanenko // Elektricheskie stancii. – 1977. – №4. – S. 12-14.
6. SCR: New and Improved // Chemical Engineering URL: <https://www.chemengonline.com/scr-new-and-improved/?printmode=1> (data obrashcheniya: 10.04.2025).
7. Simple Cycle SCR Operating Experience // Cormetech URL: <https://www.cormetech.com/wp-content/uploads/2018/05/200512PowerGen-simplecycle.pdf> (data obrashcheniya: 10.04.2025).
8. *Andrews R.L.* "Effect of flue gas recirculation in emission from heating oil combustion" / Andrews R.L., Siegmund C.W., Levine D.A. // Paper №68-21, APCA Meeting. Minneapolis, 1968.
9. *Bagwell F.A.* "Utility boiler operating modes for reduced nitric oxide emissions" // JAPCA, 1971. Vol.21, №11, p.19-23.
10. *Takahashi Y.* Development of super-law NOx PM-burner // Technical review. Mitsubishi Heavy Industries. – 1979. – №134. – pp. 1-11.
11. *Nuria Fernández-Miranda, M. Antonia Lopez-Anton, Teresa Torre-Santos, Mercedes Díaz-Somoano, M. Rosa Martínez-Tarazona* Impact of Oxy-Fuel Conditions on Elemental Mercury Re-Emission in Wet Flue Gas Desulfurization Systems // Environmental Science & Technology. – 2016. – №50 (13). – pp. 7247-7253. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00210>.
12. *Xuesen Du, Jiyun Tang, Xiang Gao, Yanrong Chen, Jingyu Ran, and Li Zhang.* Molecular Transformations of Arsenic Species in the Flue Gas of Typical Power Plants: A Density Functional Theory Study // Energy & Fuels. – 2016. – №30 (5). – pp. 4209-4214. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b03029>.
13. *Constance L. Senior, Corey A. Tyree, Noah D. Meeks, Chethan Acharya, Joseph D. McCain, Kenneth M. Cushing* Selenium Partitioning and Removal Across a Wet FGD Scrubber at a Coal-Fired Power Plant // Environmental Science & Technology. – 2015. – № 49 (24). – pp. 14376-14382. – URL: <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03722>.
14. *Eric C. Tyo, A. W. Castleman, Jr., Detlef Schröder, Petr Milko, Jana Roithova, Jean Michel Ortega, Maria Agostina Cinellu, Fabio Cocco and Giovanni Minghetti.* Large Effect of a Small Substitution: Competition of Dehydration with Charge Retention and Coulomb Explosion in Gaseous [(bipyR)Au(μ-O)2Au(bipyR)]2+ Dications. Journal of the American Chemical Society 2009, 131 (36), 13009-13019. <https://doi.org/10.1021/ja902773b>
15. *B.N. Abramovich, Y.A. Sychev,* Shunt active correction system analysis in conditions of industrial enterprises networks. International Journal of Applied Engineering Research, 2016, 11(4), pp. 2640–2645.
16. *B.N. Abramovich, Y.A. Sychev, D.N. Pelevnev,* Invariant protection of high-voltage electric motors of technological complexes at industrial enterprises at partial single-phase ground faults. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 327(5), 052027.
17. *B.N. Abramovich, P.A. Kuznetsov, Yu.A. Sychev,* Protective Controller against Cascade Outages with Selective Harmonic Compensation Function. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1015(2), 022001.
18. *Yu.A. Sychev, V.N. Kostin, V.A. Serikov, M.E. Aladin,* Nonsinusoidal modes in power-supply systems with nonlinear loads and capacitors in mining. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2023, (1), pp. 159–179.
19. *Y.A. Sychev, M.E. Aladin, S.V. Aleksandrovich,* Developing a hybrid filter structure and a control algorithm for hybrid power supply. International Journal of Power Electronics and Drive Systems, 2022, 13(3), pp. 1625–1634.
20. *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. Elektrotekhnika, informacionnye tekhnologii, sistemy upravleniya. – 2023. – № 46. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.2.09
21. *Petrochenkov A., Makarov A., Cherepanov N.* Evaluation of process efficiency of gaseous products combustion within selective catalytic reduction system in gas pumping units with gas turbine drive used // International Journal for Quality Research. – 2024. – vol.19, n2, 10.24874/IJQR19.02-08. DOI: 10.24874/IJQR19.02-08.
22. *Lyakhomskii A., Petrochenkov A., Perfil'eva E., Romodin A., Mishurinskikh S., Kokorev A., Zuev S.* Assessment of the harmonics influence on the power consumption of an electric submersible pump installation. Energies. 2022. – 15. – 7.
23. *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-tekhnicheskoe vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. – 2009. – № 5 (87). – S. 166-177.
24. *Klochkov, Yu. S.* Metodika modelirovaniya biznes-processov / Yu. S. Klochkov, T. S. Yanickaya, E. A. Strel'nikov [i dr.] // Problemy mashinostroeniya i avtomatizacii. – 2005. – № 4. – S. 26-34.

Anton Petrochenkov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector. E-mail: rector@pstu.ru

Nikita Cherepanov, postgraduate student of the Department of Microprocessor-Based Automation Tools.

E-mail: nikita.cherepanow@gmail.com