

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения  
(наименование института полностью)

Кафедра «Управление промышленной и экологической безопасностью»  
(наименование кафедры)

20.04.01 Техносферная безопасность

(код и наименование направления подготовки)

Экологическая безопасность процессов и производств

(направленность (профиль))

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

на тему Усовершенствование установок, снижающих выбросы загрязняющих  
вредных веществ в атмосферу на ООО «Газпром трансгаз Самара»

Студент	<u>Т.А. Лапина</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Научный руководитель	<u>Н.Г. Шерешева</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Консультанты	<u>Т.А. Варенцова</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
	_____	_____	(личная подпись)

Руководитель программы к.т.н., доцент М.И.Фесина  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия ) \_\_\_\_\_  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019г. (личная подпись)

**Допустить к защите**  
Заведующий кафедрой д.п.н., профессор Л.Н.Горина  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия ) \_\_\_\_\_  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019г. (личная подпись)

Тольятти 2019

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ .....	9
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	10
1 Изучение проблемы загрязнения атмосферного воздуха .....	11
1.1 Анализ экологического состояния атмосферного воздуха.....	11
1.2 Законодательные основы охраны атмосферного воздуха .....	15
1.3 Методы оценки загрязнений атмосферного воздуха .....	17
1.4 Пути решения снижения загрязнений атмосферного воздуха в России	22
2 Современные методы снижения выбросов вредных веществ на ГКС .....	28
2.1 Методы снижения выбросов вредных веществ на ГКС .....	28
2.2 Исследование результатов модернизации камер сгорания .....	39
2.2.1 Усовершенствование маллоэмиссионной камеры сгорания.....	39
2.2.2 Принцип работы камеры сгорания ПСТ ГТК-10-4 .....	47
3 Экспериментальная часть .....	52
3.1 Проведение экспериментального анализа по исследованию выбросов в атмосферный воздух во время использования малоэмиссионной камеры сгорания и камеры сгорания ПСТ ГТК-10-4.....	52
3.2 Сравнение результатов исследования малоэмиссионной камеры сгорания и камеры сгорания ПСТ ГТК-10-4 и рекомендации по установке эффективной камеры сгорания .....	60
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	62
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	63

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальна проблема накопления в атмосфере парниковых газов. Следствием этого является глобальное потепление климата, которое ведет к нарушению теплового баланса на Планете в целом. Данной проблеме было уделено большое внимание и посвящен Парижский Саммит, проведенный в конце 2015 года, по вопросам климатических изменений. По итогам этой конференции был принят итоговый документ на 37-ми страницах, который предполагает, что страны должны будут не допускать повышения температуры атмосферы Земли более чем на 2 °С, а в идеале повышение должно быть ограничено 1,5 °С. В связи с этим актуальна разработка и внедрение очистных установок с целью снижения эмиссии парниковых газов в атмосферу.

Проблема загрязнения атмосферы, является основной проблемой человечества. Стремительный рост численности населения Земли в сочетании с его научно-технической вооруженностью кардинально изменили ситуацию на планете. Если еще в относительно недавнем прошлом отрицательные последствия человеческой деятельности проявлялись только на ограниченных территориях, при этом сила ее воздействия была намного меньше мощного круговорота веществ в природе, то сегодня масштабы естественных и антропогенных процессов стали сопоставимыми, при этом соотношение между ними продолжает изменяться в сторону увеличения мощности антропогенного влияния на биосферу.

Атмосферный воздух является важнейшим элементом природы, поскольку он представляет собой незаменимый источник кислорода, который требуется для существования всего живого на планете Земля. Атмосферный воздух является важной составляющей окружающей среды, частью среды обитания человека, животных и растений, он представляет собой естественную смесь газов атмосферы, которая находится за пределами жилых, производственных и других помещений.

За все время своего существования и прежде всего в XX веке, человечество уничтожило примерно 70% всех естественных экологических (биологических) систем на Земле, способных перерабатывать отходы человеческой жизнедеятельности, и продолжает их уничтожать и сегодня. Ежегодно в атмосферу выбрасываются тысячи тонн самых различных вредных веществ, которые зачастую либо вообще не поддаются переработке, либо поддаются ей очень слабо. Последствием этого является то, что служащий основой жизни для человека атмосферный воздух загрязняется и тем самым человечество наносит непоправимый вред самому себе.

Степень научной разработанности проблемы выбросов вредных веществ в атмосферный воздух рассматриваются в статьях: Субботина В.А., Аусева В.Г., Щербо И.В. [41], Бантикова Д.Ю., Елисеева Ю.С., Лаврова В.Н. и др, теоретико-методологическая основа базируется на Федеральном законе от 04.05.1999 г. №96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» (ред. от 29.07.2018 г.) [17] и патентах: патент РФ № 2225963 «Горелочное устройство» [47], патент РФ № 2315913 «Малоэмиссионная камера сгорания газовой турбины» [49], патент РФ № 2167363 «Горелка с предварительным смешением газового топлива и воздуха» [50].

В опубликованных работах рассмотрен вопрос снижения выбросов вредных веществ в атмосферный воздух путем модернизации камер сгорания.

В данной диссертации проведен сравнительный анализ горелочных устройств, выявлены преимущества и недостатки существующих на сегодняшний момент технологий сжигания природного газа и предложена наиболее эффективная установка камеры сгорания, которая позволяет максимально уменьшить выбросы вредных веществ в атмосферный воздух.

Объектом исследования данной работы являются выбросы в атмосферный воздух оксидов азота и углерода, диоксида азота, а так же камеры сгорания.

Предметом исследования являются способы снижения эмиссии парниковых газов в атмосферный воздух, методы, подобранные на основе разработанной и внедренной установки снижающей выбросы вредных веществ в атмосферу в ООО «Газпром трансгаз Самара» Тольяттинском ЛПУМГ.

Целью диссертационного исследования является усовершенствование камер сгорания, снижающих концентрации парниковых газов на предприятии ООО «Газпром трансгаз Самара».

В соответствии с целью были поставлены и решались следующие задачи:

1. Изучить проблемы загрязнения атмосферного воздуха.
2. Провести анализ методов оценки загрязнения атмосферного воздуха.
3. Исследовать принцип работы малоэмиссионной камеры сгорания.
4. Провести анализ работы камеры сгорания ПСТ ГТК-10-4.
5. Провести экспериментальное исследование выбросов в атмосферный воздух во время использования малоэмиссионной камеры сгорания и камеры сгорания ПСТ ГТК-10-4.
6. На основе сравнительного анализа результатов исследования малоэмиссионной камеры сгорания и камеры сгорания ПСТ ГТК-10 разработать рекомендации по установке эффективной камеры сгорания.

Исследуемая гипотеза работы - внедрение модернизированной малоэмиссионной камеры сгорания на предприятии ООО «Газпром трансгаз Самара» позволит сократить количество выбросов вредных веществ в атмосферный воздух.

Научная новизна состоит в разработке и внедрении малоэмиссионной камеры сгорания в ООО «Газпром трансгаз Самара» Тольяттинском ЛПУМГ.

Теоретическая значимость данной работы состоит в расширении знаний применяемого оборудования, необходимого для снижения выбросов вредных веществ в атмосферный воздух, полученные результаты могут служить рекомендацией другим предприятиям Самарской области.

Практическая значимость исследования заключается во внедрении малоэмиссионной камеры сгорания, позволяющей максимально снижать выбросы вредных веществ оксида азота и углерода в атмосферный воздух.

По результатам диссертационной работы опубликована статья Лапиной Т.А. «Снижение концентрации продуктов сгорания в результате усовершенствования малоэмиссионной камеры сгорания в составе двигателя НК-36СТ» // Сборник научных трудов VII Молодежной научной школы-конференции с международным участием «Актуальные проблемы экологии Волжского бассейна» 18-21 апреля 2019 г. Тольятти: ИЭБВ РАН, 2019 г. С. 285-289.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предлагаемая модернизированная малоэмиссионная камера сгорания, снижающая выбросы концентрации вредных веществ в атмосферу на производстве ООО «Газпром трансгаз Самара», может послужить макетом для предприятий, на производстве которых образуются выбросы вредных веществ в атмосферный воздух. Внедрение данной установки позволяет снизить выбросы вредных веществ в атмосферу: оксида азота, диоксида азота, оксида углерода и других веществ.

2. Применение нового более эффективного подхода к горелочным устройствам, в которых происходит сжигание природного газа, позволит снизить негативное воздействие предприятия ООО «Газпром трансгаз Самара» на окружающую природную среду, а так же уменьшить количество выбросов в атмосферный воздух, последствия которых приводят к образованию парникового эффекта.

Структура магистерской диссертации состоит из введения, трех глав, заключения, содержит 70 страниц, 9 рисунков, 7 таблиц и 50 используемых источников.

В первой главе диссертации осуществлялась теоретическая разработка проблемы на основе нормативно-правовые актов, которые направлены на предотвращение загрязнения атмосферного воздуха, статей по снижению

выбросов вредных веществ в атмосферу. Проведен анализ основных источников загрязнения атмосферного воздуха в России. Изучены концептуальные подходы (методы), используемые для оценки загрязнений атмосферного воздуха. Рассмотрены мероприятия по осуществлению обязательного контроля за приоритетными загрязняющими веществами на стационарных и передвижных постах, а так же перечень вредных веществ.

Во второй главе проведен анализ работы малоэмиссионной камеры сгорания. Рассмотрен принцип работы камеры сгорания ПСТ ГТК-10-4. Так же рассмотрены компоненты выбросов вредных веществ в атмосферный воздух и влияние их на окружающую среду.

В третьей главе представлено экспериментальное исследование выбросов в атмосферный воздух во время использования малоэмиссионной камеры сгорания и камеры сгорания ПСТ ГТК-10-4. Проведено сравнение результатов исследования малоэмиссионной камеры сгорания и камеры сгорания ПСТ ГТК-10-4. Предложена камера сгорания с наилучшими результатами выбросов вредных веществ в атмосферу в ООО «Газпром трансгаз Самара».

В заключении изучены проблемы загрязнения атмосферного воздуха. Проведен анализ методов оценки загрязнения атмосферного воздуха. Рассмотрены существующие горелочные устройства и предложенная модернизированная малоэмиссионная камера сгорания. По словам автора Лапиной Т.А.: «Таким образом, благодаря использованию малоэмиссионной камеры сгорания удастся уменьшить суммарный валовый выброс оксидов азота и оксида углерода с продуктами сгорания НК-36СТ на 90 т. (в годовом исчислении). Помимо этого, также можно будет снизить на 16 тыс. руб. (в расчете на один двигатель) выплаты за неблагоприятное воздействие на окружающую среду (Стандарты организации Газпром 2-1.19-541-2011)» [48].

Применение двухзонных камер сгорания в Тольяттинском ЛПУМГ ООО «Газпром трансгаз Самара» позволит снизить загрязнение атмосферного воздуха оксидами азота на 80,73% и углерода на 94,4%.

«Поэтому применение двухзонных камер сгорания в Тольяттинском ЛПУМГ ООО «Газпром трансгаз Самара» будет способствовать снижению загрязнения атмосферного воздуха оксидами азота и углерода, а также увеличению экономического эффекта в виде снижения штрафов за не превышение допустимых нормативных требований» «а также увеличению экономического эффекта в виде снижения штрафов за не превышение допустимых нормативных требований» [48].



## ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей ВКР применяют следующие термины с соответствующими определениями:

Антропогенное загрязнение — влияние на окружающую среду, вызванное деятельностью человека, мировым хозяйством.

«Эмиссия вредных веществ (от лат. emissio — выпуск) — выброс в атмосферу с отработавшими газами авиационных двигателей прямых и побочных продуктов сгорания топлива, которые могут быть причиной нежелательного воздействия ЛА на окружающую среду» [1].

Газоперекачивающий агрегат - предназначен для компримирования природного газа на компрессорных станциях газопроводов и подземных хранилищ газа.

## **ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ**

В настоящей ВКР применяют следующие сокращения и обозначения:

СО - оксиды углерода

NO<sub>x</sub> - оксиды азота

O<sub>2</sub> - кислород

КС - компрессорная станция

ГПА - газоперекачивающий агрегат

МКС - малоэмиссионная камера сгорания

МГ - магистральный газопровод

ПДВ - предельно допустимый выброс

ПДК - предельно допустимая концентрация

ВСВ - временно согласованные выбросы

ГТУ - газотурбинная установка

СЗЗ - санитарно-защитная зона

# **1 Изучение проблемы загрязнения атмосферного воздуха**

## **1.1 Анализ экологического состояния атмосферного воздуха**

Качество атмосферного воздуха является важным фактором, оказывающим прямое влияние на здоровье людей, эпидемиологическую, санитарную ситуацию, а значит, и на экономические результаты городов, регионов и всей страны в целом.

Основные источники загрязнения атмосферного воздуха в России можно разделить на естественные (лесные пожары, пыльные бури, выветривание) и искусственные (промышленные предприятия, транспорт, теплоэнергетика, сельское хозяйство, отопление жилищ).

Антропогенные (искусственные) источники загрязнения вызваны хозяйственной деятельностью человека и представляют самую большую опасность для атмосферы. К ним относятся [2, 3, 4]:

1) сжигание горючих ископаемых, сопровождаемое ежегодным выбросом в атмосферу свыше 5 млрд. тонн углекислого газа;

2) работа тепловых электростанций. В процессе сжигания высокосернистых углей выделяется сернистый газ и мазут, следствием чего является образование кислотных дождей;

3) выхлопы современных турбореактивных самолетов, содержащие оксиды азота и газообразные фторуглеводороды из аэрозолей. Их следствием является повреждение озонового слоя атмосферы (озоносферы);

4) производственная деятельность предприятий, которая сопровождается выбросами различных газов;

5) «Загрязнение взвешенными частицами (при измельчении, фасовке и загрузке, от котельных, электростанций, шахтных стволов, карьеров при сжигании мусора)» [5];

6) сжигание топлива в факельных печах. Следствием этого является образование монооксида углерода - наиболее массового загрязнителя;

7) сжигание топлива в двигателях транспортных средств и в котлах. Данный процесс сопровождается образованием оксидов азота, в результате чего появляются смог;

8) вентиляционные выбросы (шахтные стволы).

Из перечисленных выше источников загрязнения в данной диссертации будет рассмотрен процесс сжигания природного газа, в результате которого образуются выбросы эмиссий оксида углерода CO и оксида азота NO<sub>x</sub>. Данные вещества при попадании в атмосферу, в результате производственной деятельности участвуют в создании парникового эффекта.

«Оксид углерода – бесцветный газ, не имеющий запаха, немного легче воздуха, плохо растворим в воде, имеет температуру кипения: – 191,5°С» [6]. Чрезвычайно ядовит [6].

При выдыхании «CO вдыхается вместе с воздухом и поступает в кровь, где конкурирует с кислородом за молекулы гемоглобина. Оксид углерода, имея двойную химическую связь, соединяется с гемоглобином более прочно, чем молекула кислорода. Чем больше CO содержится в воздухе, тем больше молекул гемоглобина связывается с ним и тем меньше кислорода достигает клеток организма. Нарушается способность крови доставлять кислород к тканям, вызываются спазмы сосудов, снижается иммунологическая активность человека, сопровождающиеся головной болью, потерей сознания и смертью» [6].

«Угарный газ влияет на углеводный обмен, усиливает распад гликогена в печени, нарушая утилизацию глюкозы, повышая уровень сахара в крови» [6].

Автор О. Деменко в своей работе пишет: «Диоксид азота – один из самых распространенных загрязнителей атмосферы на сегодняшний день, играющий немалую роль в образовании смога и кислотных осадков» [7].

«Оксиды азота, улетающие в атмосферу, представляют серьезную опасность для экологической ситуации, так как способны

вызывать кислотные дожди, а также сами по себе являются токсичными веществами, вызывающими раздражение слизистых оболочек» [7].

«Двуокись азота воздействует в основном на дыхательные пути и лёгкие, а также вызывает изменения состава крови, в частности, уменьшает содержание в крови гемоглобина» [7].

Оксид азота - бесцветный газ, незначительно растворим в воде. Ядовит [8].

«Парниковая активность закиси азота в 298 раз выше, чем у углекислого газа. Все оксиды азота физиологически активны, относятся к третьему классу опасности» [9]. «Оксид азота NO — сильный яд, оказывающий влияние на центральную нервную систему, а также вызывающий поражение крови за счёт связывания гемоглобина. Относительно высокой токсичностью (при концентрации выше 0,05 мг/л) обладает и оксид азота NO<sub>2</sub>. Он раздражает дыхательные пути и угнетает аэробное окисление в легочной ткани, что приводит к развитию токсического отёка легких» [9].

Некоторые отрасли промышленности оказывают самое большое влияние на загрязнение атмосферы. К ним относятся:

- 1) добыча полезных и топливно-энергетических полезных ископаемых;
- 2) металлургическое производство;
- 3) производство и распределение электроэнергии, воды и газа.

Одной из наиболее характерных особенностей прогресса человечества являются большие города, где производительность труда намного выше, материальные и духовные ресурсы используются лучше, а наука, образование и культура развиваются более активно.

В большинстве российских (и, разумеется, не только российских) крупных городов наблюдается чрезвычайно интенсивное и сильное загрязнение атмосферы.

Проблемы загрязнения атмосферного воздуха как во всех городах в целом, так и в наиболее крупных из них, обуславливаются тем, что на

сравнительно небольших территориях чрезмерно сильно сконцентрированы: население, промышленные предприятия и транспорт.

Таким образом, основными источниками загрязнения городов являются передвижные и стационарные источники. При этом наибольшее загрязнение идет именно от передвижных источников.

Доля автомобильного транспорта в общем загрязнении атмосферного воздуха городов составляет свыше 40-50 %.

«В наше время ученые активно работают над созданием технологий по утилизации выбросов, экологически чистого производства, топлива. Созданы технологии по утилизации выбросов. для очищения выбросов необходимо сооружать очистительные сооружения» [10].

Предположительно к 2100 году среднегодовая температура повысится на 1,4 - 5,8 градуса. Последствия повышения температуры приведут к таянию ледников, увеличению периодов жаркой погоды. К примеру, ледник Упсала в Аргентине длина которого 60 км, ежегодно тает на двести метров.

Таяние ледников приведет к поднятию уровня моря, что приведет к затоплению низинных областей побережья и непосредственно скажется на смене места обитания таких животных как: пингвины, тюлени и белые медведи, привыкшие жить в полярных льдах. При этом многие виды растений и животных просто исчезнут, если не смогут приспособиться к новым условиям обитания [11, 12, 13].

Потепление глобального климата приведет к изменениям траектории движения циклонов и антициклонов.

Сокращение выпадений осадков приведет к уменьшению сбора урожая.

При изменении климата на Планете увеличится рост инфекционных заболеваний [11, 12].

«Во второй половине XX века для решения проблем были предложены многие схемы создания рыночного механизма, считающегося более подходящим во многих отношениях» [14].

«Эти усилия особенно увеличились в последнем десятилетии XX века, и наконец Киотский протокол в 1997 году поддержал несколько так называемых гибких механизмов: торговля квотами (квотирование и торговля), проекты совместного осуществления и механизмы чистого развития, которые были разработаны в 2001 году в Марракеше» [14].

Впрочем, невзирая на все предпринятые усилия, в течение первого периода применения указанных механизмов (2008-2012 годы) выбросы углерода в атмосферу не только не уменьшились, а наоборот, еще и возросли [14].

В конце 2015 года в Париже (Франция) проходила двухнедельная конференция по вопросам климатических изменений. По итогам этой конференции был принят итоговый документ на 37-ми страницах, который предполагает, что страны должны будут не допускать повышения температуры атмосферы Земли более чем на 2 °С, а в идеале повышение должно быть ограничено 1,5 °С [15].

Президент РФ В.В. Путин, выступая на Парижской конференции заявил о том, что Россия перевыполнила свои обязательства в рамках Киотского протокола с 1991 по 2012 год: «Благодаря усилиям России удалось почти на год затормозить глобальное потепление на земле» [16]. Снижение выбросов парниковых газов до 70% планируется к 2035 году [16].

## **1.2 Законодательные основы охраны атмосферного воздуха**

На протяжении последних двух последних десятилетий в России на государственно-правовом уровне непрерывно разрабатываются различные нормативно-правовые акты, которые направлены на предотвращение загрязнения атмосферного воздуха.

Подчеркнем, что объектом правового регулирования является атмосферный воздух, а не воздух вообще.

На сегодняшний день, главными нормативно-правовыми актами, которые обеспечивают национальную экологическую безопасность атмосферного воздуха, являются:

1) Федеральный закон от 4 мая 1999 г. № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» (в ред. от 29.07.2018) [17];

2) Постановление Правительства РФ от 02.03.2000 № 183 «О нормативах выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух и вредных физических воздействий на него» (в ред. от 14.07.2017) [18];

3) Постановление Правительства РФ от 21.04.2000 № 373 «Об утверждении Положения о государственном учете вредных воздействий на атмосферный воздух и их источников» [19].

Основные стратегические цели российской государственной политики в сфере экологии были обозначены в Экологической доктрине Российской Федерации 2002 года. В этом документе важное место отводится целям, которые непосредственно связаны с правовой охраной атмосферного воздуха.

В этом документе были сформулированы девять главных принципов, на которых основывается общегосударственная позиция в сфере охраны окружающей среды и обеспечения ее безопасности.

Помимо этого, в данном документе также были зафиксированы и требования, которые направлены на обеспечение правовой защиты атмосферного воздуха во внутреннем контуре национальной безопасности, т.е. в рамках Государственной границы Российской Федерации. Суть указанных требований заключается в следующем:

1) внедрение в хозяйственную деятельность экологических технологий;

2) развитие экологически безопасных видов транспорта, транспортных коммуникаций и топлива, включая неуглеродное;

3) «развитие экологически безопасных технологий реконструкции жилищно-коммунального комплекса и строительства нового жилья» [20];



Подчеркнем, что перечисленные требования увеличивают безопасность экологической ситуации на территории России, способствуют сохранению чистоты атмосферного воздуха, что требуется для жизнедеятельности.

Статистические данные последнего десятилетия свидетельствуют о том, что увеличивается число случаев умышленного поджога травы. Поджоги травы загрязняют атмосферный воздух и уничтожают экосистемы. Впрочем, следует иметь в виду, что практически невозможно обнаружить случаи умышленного поджога травы именно с целью загрязнения атмосферного воздуха либо иными преступными целями.

Необходимо также уделить внимание мерам ответственности за правонарушения, которые связаны с охраной атмосферного воздуха. Для этого следует обратиться к данным, которые приводятся в работах различных исследователей. К примеру, Е. С. Михайлова в своей статье насчитала в Кодексе Российской Федерации об административных правонарушениях 2001 г. (КоАП РФ) тринадцать разных составов правонарушений в сфере охраны атмосферного воздуха [21]. В Уголовном Кодексе Российской Федерации 1996 г. (УК РФ) содержится ст. 251 УК РФ, устанавливающая уголовную ответственность за загрязнение атмосферного воздуха.

Если атмосферный воздух загрязняется на больших территориях, то это может привести к массовому падежу скота в фермерских хозяйствах и заболеваниям у людей. Поэтому важно законодательно защитить не только российских граждан, но и сельское хозяйство. Как известно, основными составляющими жизни людей являются вода и атмосферный воздух. В настоящее время их защита является одной из основных задач любого развитого государства.

### **1.3 Методы оценки загрязнений атмосферного воздуха**

В результате анализа специализированной литературы и различных исследований в сфере охраны атмосферы, можно выделить два главных

концептуальных подхода (метода), используемых для оценки загрязнений атмосферного воздуха [22]:

1) оценка опасности загрязнения атмосферного воздуха по данным экологического мониторинга;

2) оценка опасности загрязнения атмосферного воздуха по данным проявления токсического процесса у биологических объектов.

Основу первого метода составляет оценка опасности событий, которые связаны с загрязнением атмосферного воздуха, в зависимости от применения существующих санитарных и гигиенических норм. В данной сфере сформировались свои научные школы, осуществляющие исследования в области:

1) мониторинга воздушной среды,

2) метеорологии,

3) экологического нормирования,

4) контроля загрязнения воздуха.

Кроме того, эти научные школы также занимаются изучением физико-химических процессов в атмосфере, анализом теории риска и опасности и т.д. [22].

Рассматриваемый метод оценки опасности загрязнения атмосферного воздуха предусматривает:

1) определение перечня приоритетных и специфических веществ;

2) осуществление контроля их содержания в воздухе населенных мест;

3) использование санитарно-гигиенических норм;

4) оценка опасности загрязнения воздуха в соответствии с различными характеристиками и параметрами изменения состояния загрязнения воздуха.

Кроме того, в рамках данного метода также осуществляется наблюдение за опасными событиями, которые связаны с загрязнением атмосферы. Итоговый результат рассматриваемого метода представляет собой комплексную оценку загрязнения атмосферы, а также получение

исходных данных, необходимых для разработки мероприятий по охране атмосферного воздуха [22].

Как правило, в содержание государственных и ведомственных программ мониторинга качества атмосферного воздуха входят мероприятия по осуществлению обязательного контроля за приоритетными загрязняющими веществами на стационарных и передвижных постах. В перечень приоритетных вредных веществ входят:

- 1) формальдегид,
- 2) бенз(а)пирен,
- 3) тяжелые металлы,
- 4) пыль в виде взвешенных частиц,
- 5) диоксид и монооксид азота,
- 6) диоксид серы и оксид углерода,
- 7) озон,
- 8) углеводороды,
- 9) взвешанные вещества с размером 10 мкм и менее ( $PM_{10}$ ) и 2,5 мкм и менее ( $PM_{2,5}$ ).

В зависимости от местных особенностей населенных пунктов на стационарных постах осуществляется мониторинг за такими специфическими загрязняющими веществами как:

- 1) бензол,
- 2) сероводород,
- 3) аммиак,
- 4) толуол,
- 5) фтористый водород.

Качество атмосферного воздуха контролируется согласно утвержденному перечню вредных веществ. При этом для каждого города существует свой перечень таких веществ.

В настоящее время во многих (но не во всех) российских городах осуществляется непрерывный мониторинг атмосферы. В соответствии с

приведенными ФГБУ ГТО им. А.И. Воейкова данными, на сегодняшний день в России сеть мониторинга качества воздуха насчитывает 258 городов, где осуществляют свою работу 709 стационарных постов наблюдений загрязнения атмосферы. Росгидромет проводит регулярные наблюдения за состоянием атмосферного воздуха в 225 городах и на 647 станциях соответственно [23].

Разумеется, что такого количества стационарных постов недостаточно на огромную страну, какой является Россия. К примеру, в Тольятти расположено 8 стационарных постов наблюдения Росгидромета. А всего по Самарской области их 33. Эта сеть была создана более сорока лет назад, сама же лаборатория может определить лишь 23 загрязняющих вещества. Когда над Тольятти повисает фотохимический смог, то могут образовываться новые вещества, однако не представляется возможным их идентифицировать.

В России, а также в большинстве стран постсоциалистического пространства наиболее апробированной является система предельно-допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ для оценки качества атмосферного воздуха. ПДК устанавливаются как для совместного присутствия определенного сочетания вредных веществ в атмосферном воздухе, так и по отдельности для каждого из веществ. ПДК в атмосферном воздухе населенных мест регулируются в виде среднесуточной и максимально-разовой ПДК.

Помимо изложенного выше метода оценки опасности, в практической деятельности также применяются и другие методы. Наибольшее распространение получили методы, которые основаны на оценке рисков воздействий загрязнителей атмосферы на биологические объекты. В отдельных странах действуют системы управления в сфере охраны атмосферного воздуха, связанные с изучением рисков токсического действия вредных веществ и заболеваемости населения.

Эти методы базируются на оценке опасности событий, которые связаны с возникновением негативных эффектов у биологических объектов

при загрязнении воздуха. Их основу составляет изучение проявлений токсических процессов при воздействии на биологические объекты. Токсичность проявляется и может быть исследована в процессе оказания воздействия на биологические объекты различного уровня организации (например, органы, организмы, популяции, группы организмов и др.). Как правило, в качестве объектов воздействия рассматривается человек, животные, растения, а также биосфера [22].

Оценка опасности негативного воздействия веществ непосредственно связана с исследованием параметров и характеристик токсического процесса на основе зависимостей «доза-эффект». Известно, что каждое вещество отличается:

- 1) широким спектром различных проявлений токсического процесса;
  - 2) особенностями воздействия на объекты;
  - 3) спецификой действия;
  - 4) основным видом токсического действия (раздражающее, аллергенное, общетоксическое, канцерогенное, мутагенное и др.);
  - 5) особенностями появлений токсического процесса;
  - 6) количественными показателями зависимости «доза-эффект» и др.
- [22].

Оценка зависимости «доза-эффект» как правило осуществляется посредством проведения различных экспериментов на животных. Целью подобных экспериментов является определение количественных параметров и характеристик данной зависимости. Последняя представляет собой связь между дозой (концентрацией) и степенью выраженности какого-либо эффекта при оказании токсичного воздействия [22].

По частоте возникновения характерных опасных событий оценивают риск возникновения какого-либо эффекта. Затем, на основании опытных данных устанавливают параметры зависимости «доза-эффект». «Доза-эффект» - это логнормальная кривая, в которой процент животных с

положительной реакцией на воздействие является функцией концентрации и времени действия вещества [22].

#### **1.4 Пути решения снижения загрязнений атмосферного воздуха в России**

Необходимо отметить, что степень загрязнения атмосферного воздуха основными загрязняющими веществами непосредственно зависит от промышленного развития города. Наибольшие максимальные концентрации вредных веществ присущи городам, чье население составляет свыше 500 тысяч жителей. Загрязнение атмосферного воздуха специфическими веществами находится в прямой зависимости от того вида промышленности, которая развита в городе. В том случае если в большом городе расположены предприятия нескольких промышленных отраслей, то это неизбежно способствует крайне высокому уровню загрязнения атмосферного воздуха. Хорошим примером является г.о. Тольятти, где развита химическая промышленность, машиностроение и энергетика. Подчеркнем, что проблему снижения выбросов многих специфических веществ пока еще не удастся полностью разрешить.

Проблему загрязнения уличного воздуха городов можно решить при помощи замены автомобилей на электромобили, однако в ближайшей, да и среднесрочной перспективе, осуществить это не представляется возможным. Одной из эффективных мер борьбы с загрязнением атмосферного воздуха является дожигание выхлопных газов с использованием специальных катализаторов.

Существенно уменьшить количество пыли в атмосферном воздухе можно посредством их газификации и теплофикации. Так, газификация позволяет существенно уменьшить выбросы в атмосферный воздух таких вредных веществ, как сажа и пыль. При теплофикации сжигание топлива

сосредоточивается на больших объектах. Благодаря теплофикации можно улучшить очистку выбросов в атмосферу.

На промышленных предприятиях, теплоэлектроцентралях и электростанциях устанавливаются специальные очистные сооружения, которые позволяют улавливать пыль и золу. Для этого применяются циклотроны, которые очищают выбросы в основном от крупных взвешенных частиц. Принцип работы этого устройства заключается в следующем: вследствие вращения воздушного потока, пылевые частицы отбрасываются к стенкам и теряют скорость, после чего они скользят вниз и скапливаются в нижней части установки.

Электрофильтры, а также матерчатые и бумажные фильтры применяются для задержки мелких взвешенных частиц. Благодаря им можно повысить эффективность очистки до 98 % и выше.

Развитие химических предприятий актуализирует проблему очистки промышленных выбросов от вредных газов. Для этой цели используют различные способы, однако основа у них одна - данные вещества поглощаются водой, содовым либо другим раствором, при этом сами выбросы пропускаются через специальные сооружения под названием скруббер. Рассеивать загрязнения помогают высокие трубы, высотой до 200-300 метров.

В охране атмосферного воздуха важная роль также должна быть отведена архитектурно-планировочным мероприятиям при застройке городов и мероприятиям по их благоустройству. Территории городов необходимо разделять на жилые и промышленные районы. Между этими районами должна располагаться достаточная защитная зона. При этом промышленные районы необходимо располагать таким образом, чтобы преобладающие ветра могли дуть по направлению от жилых районов на промышленные. Кроме того, необходимо использовать защитные возможности зеленых насаждений и озеленять защитную зону между промышленными предприятиями и жильем [24, 25, 26, 27].

Населенные места необходимо благоустраивать. Это поможет решить проблему с почвенной пылью. Конкретно, речь идет о том, что площади и улицы должны обладать гладким покрытием (к примеру, асфальтовым), а все свободные территории необходимо озеленять. Важное значение отводится автоматам, которые в определенных точках осуществляют непрерывный мониторинг за концентрацией загрязнений и передают полученную информацию в соответствующие автоматизированные системы управления.

Неутешительная статистика, связанная с состоянием атмосферного воздуха в российских городах, обуславливает необходимость разработки мероприятий, направленных на уменьшение числа загрязнителей, которые поступают в атмосферу из передвижных источников.

С нашей точки зрения, необходимо:

- улучшать качество топлива. К примеру, это можно сделать путем уменьшения содержания серы в жидком топливе. Также можно обогащать твердое топливо для того, чтобы оно практически полностью сгорало;

- использовать присадки к топливу, которые могли бы служить в качестве катализаторов и тем самым способствовать более быстрому сгоранию топлива;

- применять электронные схемы зажигания, использовать роторные двигатели;

- по мере возможности перевести автомобильный транспорт с бензина на водород, спирт или сжиженный газ;

- использовать автомобили с электрическими, электротермическими либо паровыми двигателями.

Помимо перечисленных мер, также следует осуществить и мероприятия, направленные на защиту атмосферы посредством:

- 1) рассеивания,
- 2) обработки и нейтрализации вредных выбросов от стационарных источников загрязнений.

В перечень таких мероприятий должно входить:



1) использование очистных сооружений, бактериального разложения загрязнителей;

2) применение растительного поглощения загрязнителей;

3) отбор культивирования активных видов растений на поглощение вредных аэрозолей, паров, газов, растворов.

В последние годы были разработаны различные математические модели, чей принцип работы строится на основе данных о степени загрязнения воздуха и сведений синоптиков. Они позволяют прогнозировать возможность возникновения на основных городских магистралях ожидаемую концентрацию угарного газа, фотохимического тумана, смога т.д.

Проблема снижения загрязнений атмосферного воздуха в России не остается без внимания и первых лиц государства. Так, в сентябре 2018 года Председатель Правительства РФ Д.А. Медведев заявил о необходимости сокращения вредных выбросов на крупных предприятиях. Российский премьер сделал соответствующее заявление в ходе совещания о расходах федерального бюджета в 2019 - 2021 годах.

По словам Д.А. Медведева, одним из национальных проектов России является экология, следовательно, это должно быть отражено и в бюджете. Председатель Правительства заявил по этому поводу следующее: Одной из наших главных целей является кардинальное улучшение экологической обстановки в России. Однако, для того, чтобы достичь этой цели, сначала нужно сократить объемы вредных выбросов на крупных предприятиях, ликвидировать ряд свалок и особо опасных загрязненных зон, провести очистку акваторий и берегов [28].

Так же Д.А. Медведев отметил, что новую индустрию по переработке и утилизации твердых бытовых отходов предстоит фактически создать с нуля. Российский премьер подчеркнул, что в бюджете необходимо предусмотреть возможность участия бизнеса в данной работе. Глава Правительства также напомнил, что экологические предприятия упоминаются как в государственных программах, так и в национальных проектах.

Финансирование необходимо согласовать таким образом, чтобы избежать дублирования и необоснованных сокращений [28].

Таким образом, в результате проведенного исследования проблем загрязнения атмосферного воздуха, выявлено то, что основными источниками выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, в следствии которых образуется парниковый эффект, в данной диссертации при сжигании природного газа, загрязняющими веществами, являются оксид азота и оксид углерода.

Авторами Т.Н. Белоглазова, Т.Н. Романова было отмечено: «Выбросы перечисленных выше веществ в результате транспортировки газа по магистральным газопроводам оказывают локальное воздействие. Поэтому для защиты атмосферы широко предусматриваются мероприятия планировочного характера и технологические. Места для размещения объектов выбираются в соответствии с нормативами по размерам санитарно-защитных зон (СЗЗ), благоприятного взаиморасположения предприятия и жилых массивов с учетом господствующих направлений ветров. Учитывается наличие естественных и искусственных преград между зоной жилой застройки и промышленной. При совместном выбросе углеводородов и оксидов азота необходимо предусматривать рассеивание таким образом, чтобы предотвратить возможность фотохимического смога вдоль автомобильных дорог. Планировочные мероприятия способствуют уменьшению вредных последствий выбросов, особенно имеющих циклический характер, но не приводят к снижению валовых выбросов в атмосферу» [29].

Таким образом, для предотвращения дальнейшего усиления парникового эффекта и снижения антропогенной эмиссии парниковых газов в атмосферу, очевидна необходимость в разработке новых эффективных очистных технологий промышленных выбросов. В данной работе рассматривается внедрение на предприятие ООО «Газпром трансгаз Самара» модифицированной модели камеры сгорания, обладающей наилучшими

показателями очистки загрязняющих веществ, поступающих с выбросами в атмосферу.

## **2 Современные методы снижения выбросов вредных веществ на ГКС**

### **2.1 Методы снижения выбросов вредных веществ на ГКС**

ООО «Газпром трансгаз Самара» осуществляет транспортировку природного газа метан, который в быту носит название «голубое» топливо. При сжигании метана происходит реакция горения, в результате данной реакции образуются молекулы воды и углекислого газа. Образованные в процессе реакции молекулы углекислого газа оказывают негативное влияние на окружающую среду, так как в последствии выбросов  $\text{CO}_2$  образуется парниковый эффект, который пагубно влияет на озоновый слой.

Метан используется в качестве топлива в быту и в промышленности. Оказывает благоприятное влияние на окружающий воздух, так как не содержит примесей тяжелых металлов.

На газокomppressorных станциях находятся большое количество отдельных газоперекачивающих агрегатов (ГПА) мощностью от 6 до 25 МВт.

На рисунке 1 представлена фотография газокomppressorной станции.



Рисунок 1 - Газокomppressorная станция

Во время работы газоперекачивающего агрегата (ГПА), в атмосферный воздух попадают выбросы вредных веществ оксида азота и углерода, это происходит вследствие сжигания природного газа.

На ГКС есть несколько процессов при которых происходят выбросы загрязняющих веществ в атмосферу:

- 1) «продувка газопроводов ГПА при их пусках и остановках» [30];
- 2) подготовка природного газа к дальнейшей транспортировке, прохождение газа через камеру сгорания;
- 3) выброс газа из пневмокранов после их срабатывания.

Продувка газопровода через свечу представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 - Продувка газопровода

Для достижения цели по снижению выбросов эмиссии вредных веществ необходимо разрабатывать, модернизировать установки и внедрять в производство пути снижения количества выбросов природного газа на ГКС.

Для обеспечения безопасности атмосферного воздуха в ООО «Газпром трансгаз Самара» используют меры по профилактике экологических рисков.

«Суть мероприятий по снижению выбросов в газовой промышленности заключается в принятии мер технологического и мониторингового характера, обеспечивающих безопасность воздушной среды. Так, к числу основных мер технологического характера, способствующих сокращению аварийных выбросов и утечек природного газа и попадания продуктов его горения в воздушную среду, относятся следующие:» [31]:

1) «использование при добыче газа систем утилизации попутного газа, газа выветривания и факельных газов» [31];

2) «монтаж устьевых измерительных комплексов, позволяющих проводить исследования скважин без выпуска газа в воздушную среду» [31];

3) «осуществление транспортировки низконапорного газа» [31];

4) «применение современных методов ремонта и обслуживания газопроводов» [31];

5) «внутритрубная диагностика» [31];

6) «очистка газопроводов» [31];

7) «внедрение комплексов для исследования скважин без выпуска газа в атмосферу и сокращение числа продувок за счет оптимизации режима отбора газа при его подземном хранении» [31];

8) «освоение скважин в низконапорные сети» [31];

9) «распределение газа с применением инертных газов при продувке газопроводов и технологий ремонта без остановки перекачки; проведение ревизии регуляторов газораспределительного пункта, а в случае необходимости их замена» [31];

10) «диагностика и санация трубопроводов и т.д.» [31].

Авторы Т.Н. Белоглазова, Т.Н. Романова говорят и про другие мероприятия: «К прогрессивным мероприятиям технологического характера относятся безотходные и малоотходные технологии на основе кооперации с различными объектами в целях уменьшения количества производственных

выбросов. Данные мероприятия применяются к организованным выбросам. Наибольший эффект по нейтрализации организованных выбросов проявляется при увеличении единичной мощности агрегатов и постоянном режиме их работы. На объектах дальнего транспортирования газа предусматривается централизация источников выбросов, например объединение воздушников, свечей, сбросов от предохранительных клапанов, установка общей дымовой трубы на несколько печных агрегатов. Системы централизованного сбора выбросов загрязняющих веществ в атмосферу оборудуются системами обезвреживания. Сбор, перемещение и очистка выбросов от разрозненных объектов с небольшим количеством и незначительной концентрацией вредного вещества экономически не всегда оправдывают затраты, связанные с их обезвреживанием. Поскольку подобные выбросы являются частью технологического процесса, необходимо предусматривать совершенствование технологии, материалов, оборудования» [29].

«Уровни концентрации оксидов азота в отработавших газах газоперекачивающих агрегатов отечественного производства весьма высоки ( $150\text{--}300\text{ мг/нм}^3$ ) и не удовлетворяют требованиям современных европейских стандартов на выбросы вредных веществ. Это приводит к тому, что в ряде районов эксплуатации компрессорных станций уровень загрязнения атмосферы оксидами азота превышает в 10 раз предельно-допустимую концентрацию (ПДК) на расстоянии  $0,5\text{--}1,5$  км от источника выбросов» [31].

«Наиболее перспективным методом очистки продуктов сгорания газоперекачивающих агрегатов от оксидов азота является каталитический безреагентный метод снижения попадания оксидов азота с выхлопными газами, то есть без использования дополнительных реагентов-восстановителей. Основу этого метода составляет металлоблочный гетерополикислотный катализатор с носителями, покрытыми защитным оксидным слоем и слоем активных компонентов в виде гетерополикомплексов» [31].

«Одним из способов, продлевающих срок эксплуатации газопроводов, а, следовательно, уменьшающих вероятность возникновения аварийных выбросов и утечек природного газа в воздушную среду, является внутреннее гладкостное покрытие труб на основе эпоксидной смолы» [31]:

«При этом достоинства газопроводов из труб с гладкостным покрытием особенно проявляются при большой их протяженности и высоком рабочем давлении порядка 9,8–25,0 МПа» [31].

«Что касается мер мониторингового характера, то одним из эффективных способов профилактики аварийных выбросов и утечек природного газа является постоянное воздушное наблюдение с помощью вертолетов за техническим состоянием магистральных газопроводов и газопроводов-отводов с применением лазерных и тепловизионно-телевизионных диагностических систем, позволяющих выявить, в частности, дефекты на ранней стадии их проявления. За сравнительно короткое время можно обследовать сотни и тысячи километров газопроводов без изменения технологического режима работы газотранспортной системы. Информация об обнаруженных аварийных выбросах и утечках газа незамедлительно доводится до линейно-эксплуатационных служб с предоставлением перечня и описания выявленных дефектов, их спутниковых и линейных координат, характеристики каждого дефекта в соответствии с его типом и т.д.» [30].

Таким образом, в результате проведенного исследования автора по теме «Пути снижения технологических выбросов природного газа на ГКС», можно сделать выводы, что для уменьшения выбросов вредных веществ в атмосферу нужно проводить профилактику экологических рисков таких как:

- 1) проводить наблюдения за техническим состоянием газопроводов с вертолетов;
- 2) осуществлять меры по продлению срока эксплуатации газопроводов.

«Компрессорная станция - неотъемлемая и составная часть магистрального газопровода, обеспечивающая транспорт газа с помощью энергетического оборудования, установленного на КС. Она служит



управляющим элементом в комплексе сооружений, входящих в магистральный газопровод. Именно параметрами работы КС определяется режим работы газопровода. Наличие КС позволяет регулировать режим работы газопровода при колебаниях потребления газа, максимально используя при этом аккумулирующую способность газопровода» [32].

Так же автор подчеркивает, что «Содержание горючих газов и паров в воздухе производственных помещений при эксплуатации не должно превышать 5% их нижнего предела взрываемости. Помещения, где возможно образование опасных газоздушных смесей, в соответствии с проектом оборудуются сигнализаторами до взрывоопасных концентраций газов, заблокированных с автоматикой включения аварийной вентиляции. Запрещается эксплуатировать компрессорный цех с выключенной или неисправной системой контроля загазованности. Работоспособность автоматической сигнализации и автоматическое включение аварийной вентиляции проверяются персоналом ежемесячно» [30].

«Поступление вредных веществ в помещение и их распространение в рабочей зоне необходимо предотвращать путем рационального размещения объектов и организации производственного процесса (герметизация, теплоизоляция, вывод продувочных линий за пределы помещения, исключения возможности разлива продуктов, качественная работа вентиляции и канализации, контроль воздушной среды)» [31].

Как пишет автор: «Газотранспортное предприятие, являясь субъектом-природопользователем, т.е. Предприятием, которое при осуществлении производственно-хозяйственной деятельности оказывает или может оказывать негативное воздействие (загрязнение) на качество окружающей природной среды и ее составляющие (атмосферный воздух, воды, почвы, недра), обязано»:

1) «осуществлять все виды деятельности с обязательным учетом возможных последствий воздействия на окружающую природную среду» [30];

2) «неукоснительно выполнять комплекс всех необходимых природоохранных мероприятий при эксплуатации объектов» [30];

3) «оснащать технологические процессы и оборудование аппаратурой для контроля уровня их воздействия на окружающую природную среду» [30];

4) «соблюдать установленные и согласованные технологические режимы, обеспечивающие наименьшее воздействие на окружающую природную среду» [30];

5) «обеспечивать надежную и эффективную работу всех очистных сооружений, установок и средств контроля и утилизации отходов» [30];

б) «своевременно представлять необходимую и достоверную информацию об аварийных случаях, предаварийных ситуациях и стихийных бедствиях и принимаемых мерах по ликвидации их последствий» [30].

«Каждое газотранспортное Предприятие должно иметь природоохранную службу, обеспечивающую рациональное природопользование и минимизацию вреда окружающей среде под влиянием производственно-хозяйственной деятельности Предприятия» [30].

«Природоохранная служба организует производственный экологический контроль - комплексный мониторинг эксплуатации и состояния сооружений, условий и состояния окружающей среды, который включает» [30]:

1) «технологический контроль за безопасностью эксплуатации объектов (регистрация режима эксплуатации объектов)» [30];

2) «контроль состояния технологического оборудования и технологических процессов» [30];

3) «контроль загрязнений, состоящий из наблюдений за технологическими выбросами, сбросами, отходами и наблюдений за вредными физическими воздействиями» [30].

При транспортировке газа возможно загрязнение атмосферы, путем выбросов вредных веществ в воздух рабочей зоны различных источников:

1) «отходящими продуктами сгорания газоперекачивающих агрегатов (ГТА), котельных, огневых, нагревательных установок» [30];

2) «природным газом при продувках и стравливания газа из аппаратов, коммуникаций и технологического оборудования» [30].

«Природоохранная служба Предприятия с привлечением научно-исследовательских организаций разрабатывает проекты предельно допустимых выбросов (ПДВ) или временно согласованных выбросов (ВСВ) вредных веществ, т.е. таких значений, при которых их концентрация в приземном слое атмосферы на границе санитарно-защитной зоны (СЗЗ) не превышает максимально разовых ПДК этих веществ для населенного пункта. Проекты ПДВ (ВСВ) утверждаются территориальными органами Госкомэкологии России» [30].

«Система контроля выбросов в источнике (на выхлопе ГТУ) организуется таким образом, чтобы экологические характеристики (показатели токсичности отходящих газов) соответствовали требованиям технических условий при поставке новых ГПА, а также двигателей авиационного и судового типов, ремонтируемых в заводских условиях» [30].

«Экологические характеристики контролируются в процессе испытаний приемки-сдачи агрегата в соответствии с типовой методикой проверки экологических характеристик опытных образцов ГТУ» [30].

«Контроль экологических характеристик ГТУ в процессе эксплуатации осуществляется периодически, раз в полгода - год, в соответствии с РД 51-164-92» [30].

«Для районов расположения КС необходим постоянный контроль атмосферного воздуха в пределах жилой зоны на содержание оксидов азота и эпизодический (не менее одного раза в год) - на содержание оксида углерода и метана» [30].

«Воздухоохранные мероприятия должны проводиться в объеме, позволяющем максимально снизить выброс каждого загрязняющего вещества» [30].

«Общие технологические мероприятия по ограничению выбросов вредных веществ предусматривают» [30]:

1) «модернизацию производственного оборудования в целях повышения экологической безопасности с выводом из эксплуатации устаревших, экологически опасных видов оборудования и производств» [30];

2) «повышение общей надежности оборудования, что позволяет сократить количество операций пусков-останово» [30];

3) «применение газогорелочных устройств, обеспечивающих достижение оптимальных показателей процесса горения топлива, в части снижения содержания оксидов азота, оксида углерода и углеводородов в отходящих газах» [30];

4) «проведение оптимизационных расчетов, обеспечивающих распределение нагрузки между агрегатами и компрессорными цехами с минимумом энергозатрат и загрязнения атмосферного воздуха продуктами сгорания топлива и т.п.» [30];

5) «применение воздушных и электрических систем запуска ГПА» [30];

6) «нормирование выбросов вредных веществ с продуктами сгорания энерготехнологического оборудования» [30];

7) «применение установок по нейтрализации выбросов загрязняющих веществ» [30];

8) «объединение выбросов цеховых ГПА в одну трубу» [30];

9) «применение перекачки природного газа из участков трубопроводов в действующие трубопроводы с целью сокращения выбросов природного газа в атмосферу» [30];

10) «применение безрасходных систем продувки технологических аппаратов» [30];

11) «ограничение продувок оборудования с выпуском газа в атмосферу» [30];

12) «ограничение проведения исследований скважин с выпуском газа в атмосферу» [30];

13) «обеспечение технологических режимов эксплуатации скважин, позволяющих устойчиво выносить пластовую жидкость с забоя скважин (для уменьшения продувок скважин в атмосферу)» [30].

«Специальные мероприятия, направленные на улучшение условий рассеивания выбросов, заключаются в изменении геометрических характеристик дымовой (выхлопной) трубы, главным образом в увеличении ее высоты» [30].

«Мероприятия по регулированию газовых выбросов в периоды неблагоприятных метеорологических условий предусматривают комплекс технических решений, направленных на кратковременное сокращение выбросов вредных веществ в атмосферу с целью предотвращения экстремально высокого уровня загрязнения» [30].

Подчеркнем, что «мероприятия должны быть достаточно эффективными и практически выполнимыми» [33];

«Размер сокращения выбросов для каждого предприятия в каждом конкретном городе устанавливаются и корректируются местные органы Госкомгидромета СССР в зависимости от специфики выбросов, особенностей рельефа, застройки городов и т.д. Должно быть обеспечено снижение концентрации загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы по первому режиму на 15-20%, по второму на 20-40% и по третьему на 40-60%» [33].

«К работам по регулированию выбросов при первом режиме неблагоприятных метеорологических условий относятся такие организационно-технические мероприятия, как» [30]:

1) «запрещение пусков и остановок оборудования» [30];

2) «запрещение проведения работ, связанных с залповыми выбросами вредных веществ (вскрытие и продувки технологических аппаратов и емкостей, продувки скважин в атмосферу), за исключением тех случаев, когда их немедленное выполнение необходимо для предотвращения аварии» [30];

3) «исключение работы оборудования в форсированном режиме» [30];  
4) «прекращение испытания оборудования при изменении технологического режима, приводящего к увеличению выбросов вредных веществ в атмосферу» [30];

5) «рассредоточение во времени работы технологических агрегатов, не участвующих в едином непрерывном технологическом процессе, при работе которых выбросы вредных веществ в атмосферу достигают максимальных значений» [30];

б) «сокращение количества работающего автотранспорта» [30].

«В течение всего периода НМУ необходимо осуществлять усиленный контроль за, выбросами, а именно» [30]:

1) «визуальный и приборный контроль за герметичностью оборудования и работой факельных систем путем объезда установок выездной бригадой» [30];

2) «контроль за строгим соблюдением технологических регламентов, для чего удвоить частоту проверки соответствия основных параметров процессов нормам технологического режима» [30];

3) «инструментальный контроль выбросов вредных веществ в атмосферу непосредственно в источниках и на границах санитарно-защитной зоны» [30].

«При втором режиме НМУ допускается некоторое снижение производительности Предприятия. К работам по регулированию выбросов при этом относятся все мероприятия, разработанные для первого режима НМУ, а также дополнительные мероприятия, влияющие на технологические процессы, такие как» [30]:

1) «снижение производительности отдельных аппаратов и технологических линий, работа которых связана со значительным выделением в атмосферу вредных веществ» [30];

2) «снижение давления нагнетания или его полное прекращение» [30];

3) «остановка оборудования в случае, если сроки начала планово-предупредительных работ по ремонту технологического оборудования и наступления неблагоприятных метеорологических условий достаточно близки» [30];

4) «запрещение работ на установках, связанных с утечкой загрязняющих веществ» [30];

5) «запрещение сжигания отходов производства без использования специальных установок по обезвреживанию и их утилизации» [30].

«В условиях работы Предприятия при третьем режиме НМУ, представляющем наибольшую опасность, мероприятия по регулированию газовых выбросов должны обеспечить значительное снижение концентраций загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы, при этом допускается временное сокращение производительности Предприятия, а при особо опасных метеорологических условиях - полная остановка некоторых производств» [30].

«При разработке мероприятий по регулированию выбросов следует предусмотреть возможность дискретного проведения работ, связанных с залповыми выбросами, а именно, возможность прекращения этих работ при смене одного режима неблагоприятных метеорологических условий на другой, более опасный» [30].

## **2.2 Исследование результатов модернизации камер сгорания**

### **2.2.1 Усовершенствование маллоэмиссионной камеры сгорания**

Транспортировку газа и подачу газа потребителям в Самарской области осуществляет предприятие ООО «Газпром трансгаз Самара». На данном предприятии через каждые 100 - 200 км размещены компрессорные станции. Суть компрессорных станции заключается в поддержании давления при транспортировке газа по магистральному газопроводу. После компрессорных

станций природный газ в магистральный газопровод подается очищенный от механических примесей и осушенный от влаги и газового конденсата.

В результате проведенного литературного обзора, мы пришли к выводам, что на данном предприятии ООО «Газпром трансгаз Самара» необходимо снизить процентное содержание загрязняющих веществ при помощи усовершенствования камер сгорания.

В 2015 году на компрессорной станции ТЛПУМГ была успешно испытана малоэмиссионная камера сгорания после усовершенствования газотурбинного двигателя НК-36СТ №101. Данный двигатель предназначен для привода центробежного нагнетателя в составе газоперекачивающего устройства. До усовершенствования двигатель был оснащен кольцевой, однозонной двухконтурной камерой сгорания с одним ДУСом [34, 35, 36, 37, 38]. Было исследовано, что при данной комплектации результаты экологического контроля продуктов сгорания превышали допустимых значений. Концентрация оксидов азота, приведенная к 15 % O<sub>2</sub>, достигала на номинальных режимах двигателя более 300 мг/нм<sup>3</sup>, когда допустимое значение по ГОСТ 28775-90 не более 150 мг/нм<sup>3</sup>, концентрация оксида углерода составляла 110...150 мг/нм<sup>3</sup>, при допустимом значении по ГОСТ 28775-90 не более 300 мг/нм<sup>3</sup> [39].

Для достижения данной цели по снижению выбросов эмиссии вредных веществ был разработан вариант двухзонной камеры сгорания.

Устройство Малоэмиссионной камеры сгорания и сама Малоэмиссионная камера представлена на рисунках 3 и 4.



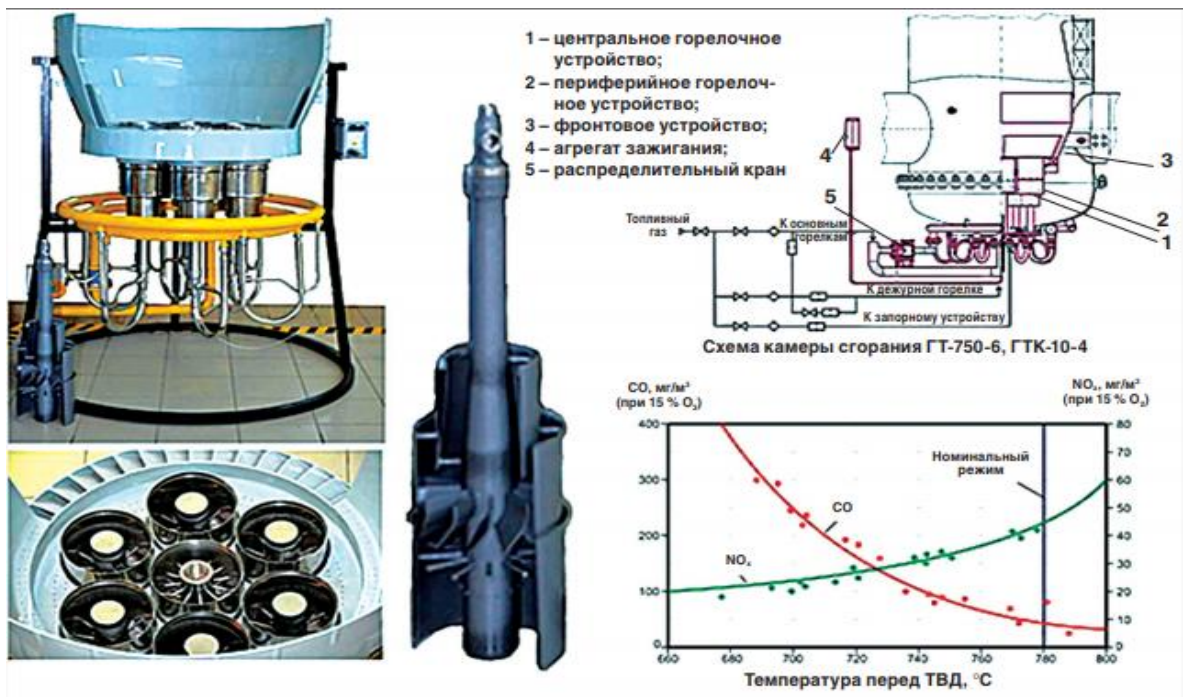


Рисунок 3 - Устройство Малоэмиссионной камеры сгорания



Рисунок 4 - Малоэмиссионная камера сгорания

При усовершенствовании данной конструкции, были реализованы следующие предложения:

1. «Температура горения непосредственно зависит от коэффициента избытка воздуха «а». Следовательно, посредством изменения соотношений компонентов (иначе говоря - варьируя величиной «а») можно управлять величиной температуры продуктов сгорания в разных зонах КС» [48].

2. Было установлено, что интенсивность образования оксидов азота происходит в высокотемпературных зонах камеры сгорания. «Здесь необходимо учитывать, что окисляется именно тот азот, который находится в воздухе, поскольку содержание азота в топливе пренебрежимо мало» [48].

3. Выявлено, что на данных камерах окись углерода образуется при горении богатых топливно-воздушных смесей в условиях недостатка кислорода и низких температурах горения.

4. Была снижена доля СО за счет повышения температуры пламени, приводящей к увеличению содержания в выхлопном газе окислов азота.

5. Должно быть минимизировано время пребывания смеси в камере сгорания.

6. Внедрена двухзонная камера сгорания, вместо однозонной двухконтурной камеры сгорания.

Данная камера сгорания состоит из двух зон, в которой зоны горения в жаровой трубе расположены последовательно. Первая зона является дежурной. В этой зоне имеется незначительная эмиссия СО, т.к. на низких режимах в этой зоне поддерживается близкое к стехиометрическому соотношение компонентов.

«Вторая зона (основная) располагается по ходу движения потока сразу же за первой зоной» [48]. «У неё есть свои стабилизаторы пламени и топливные форсунки. Она является основной. В этой зоне процесс горения происходит на «бедных» смесях при температуре 1800 – 1900 °К, когда образование окислов азота менее активно» [41].

На рисунке 5 представлен процесс горения природного газа в малоэмиссионной камере сгорания.



Рисунок 5 - Процесс горения природного газа в малоэмиссионной камере сгорания

Применение двухзонной камеры сгорания позволило снизить выбросы оксидов азота на номинальном режиме до  $173 \text{ мг/нм}^3$ , а выбросы оксида углерода до  $57 \text{ мг/нм}^3$ .

Для определения соответствия газотурбинной установки нормам выбросов вредных веществ в атмосферу, измерения проводились согласно СТО ГАЗПРОМ 2-3.5-038-2005 [40]. Для замеров использовались газоанализаторы ДАГ-16 и ДАМ-510ГН. Значения измерений загрязняющих веществ были получены при снятии исходной дроссельной характеристики на 4-х режимах, измерения проводились с интервалом  $100 \pm 30$  часов в течение 800 часов наработки двигателя.

Было проведено сравнение результатов измерений концентрации оксидов азота и углерода приведенных к 15 % кислорода до и после модернизации на номинальном режиме работы двигателя НК-36СТ малоэмиссионной камеры сгорания.

В таблице 1 представлены результаты измерений концентраций  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$  до и после модернизации камеры сгорания на номинальном режиме работы двигателя НК-36СТ.

Таблица 1 - Результаты  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$  приведенные к 15 %  $\text{O}_2$  до и после модернизации камеры сгорания в составе двигателя НК-36СТ В  $\text{мг/нм}^3$

Концентрация веществ	До модернизации	После модернизации
$\text{NO}_x$ к 15% $\text{O}_2$	337	15
$\text{CO}$ к 15% $\text{O}_2$	111	20

По результатам измерений установлено, что после модернизации концентрация оксидов азота уменьшилась в 22,5 раза, а концентрация оксидов углерода в 5,5 раз.

Графики эмиссионных характеристик двигателя НК-36СТ до и после проведения модернизации приведены на рисунке 6 и рисунке 7.

$C_{\text{CO}}, 15\% \text{O}_2$  ( $\text{мг/нм}^3$ )

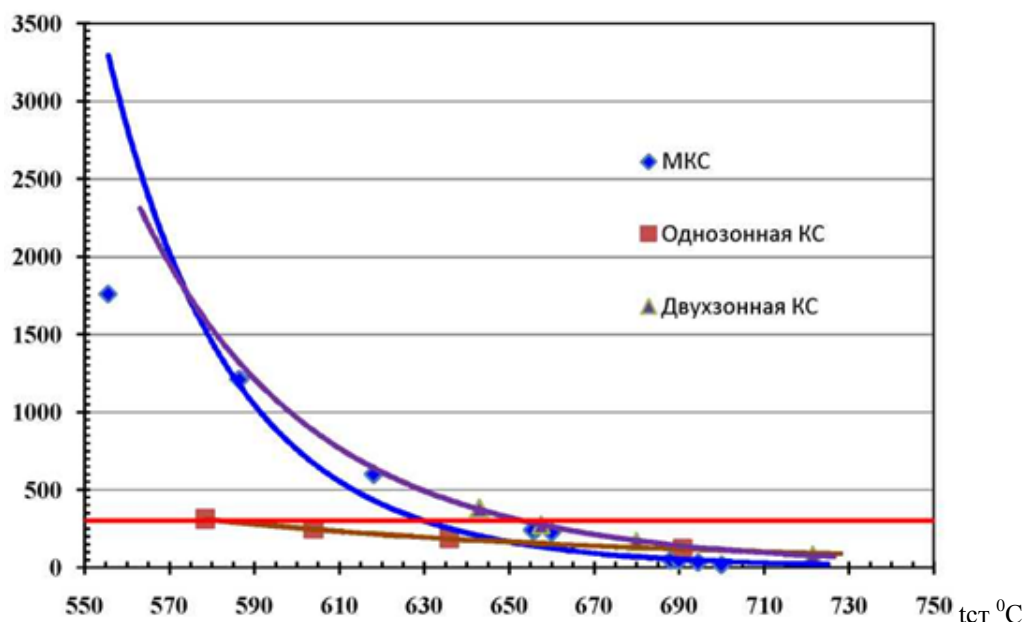


Рисунок 6 - Зависимость приведенных концентраций углерода и оксидов азота в продуктах сгорания двигателя НК-36СТ с однозонной, двухзонной и малоэмиссионной камер сгораний от температуры газов перед СТ до модернизации

$C_{CO, 15\% O_2}$  (мг/нм<sup>3</sup>)

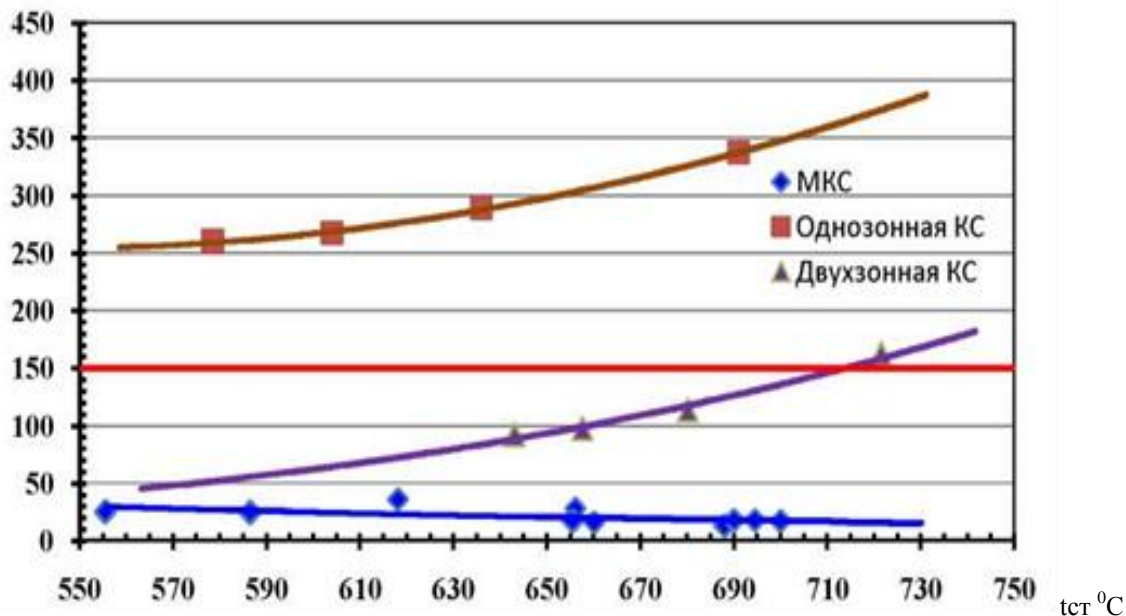


Рисунок 7 - Зависимость приведенных концентраций углерода и оксидов азота в продуктах сгорания двигателя НК-36СТ с однозонной, двухзонной и малоэмиссионной камер сгораний от температуры газов перед СТ после проведения модернизации

Из графиков следует, что средняя концентрация оксида углерода в продуктах сгорания двигателя НК-36СТ с МКС в диапазоне нагрузок 70... 100 % составила 100 мг/нм<sup>3</sup>, концентрация оксидов азота во всем диапазоне рабочих режимов не превышала 50 мг/нм<sup>3</sup> и составила на номинальном режиме 15 мг/нм<sup>3</sup>, что существенно ниже установленной предельно допустимой концентрации [41, 42].

По мере увеличения наработки двигателя НК-36СТ камеры сгорания после модернизации были проведены периодические измерения концентрации выбросов оксидов азота и углерода, приведенных к 15 % кислорода. Данные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Периодические измерения количества выбросов концентрации  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$  приведенные к 15 %  $\text{O}_2$  по мере увеличения наработки двигателя НК-36СТ

Наработка, час	tвх. двигателя, $^{\circ}\text{C}$	Обороты двигателя, об/мин	Концентрация результатов замера	
			$\text{NO}_x$ к 15% $\text{O}_2$	$\text{CO}$ к 15% $\text{O}_2$
0	13	3695	25	1759
0	14	3890	24	1211
0	14	4106	36	599
0	14	4352	28	238
119	27	4229	18	46
263	24	4081	16	226
331	14	4446	13	45
430	20	4336	13	45
573	12	4245	17	240
669	28	4213	18	34
800	33	4204	17	19

В таблице 3 представлены экологические показатели современных приводов ГПА, эксплуатируемых в ООО «Газпром трансгаз Самара»: НК-14СТ, НК-14СТ10, ПС-90ГП-1, ПС-90ГП-2 и НК-38СТ, а также показатели НК-36СТ с МКС на номинальном режиме.

Таблица 3 - Экологические показатели современных приводов ГПА В  $\text{мг}/\text{нм}^3$

Тип двигателя	$\text{NO}_x$ к 15% $\text{O}_2$	$\text{CO}$ к 15% $\text{O}_2$
НК-36СТ с МКС	15	20
НК-14СТ	214	80
НК-14СТ-10	313	110
ПС-90ГП-1	148	48
ПС-90ГП-2	177	73
НК-38СТ	61	67

Из приведенных в таблицы 3 данных следует, что двигатель НК-36СТ, оснащенный МКС, в сравнении с двигателями нового поколения, по выбросам оксидов азота и углерода на номинальном режиме имеет наилучшие показатели, удовлетворяющие нормам международных стандартов по экологическим показателям загрязнения.

Таким образом, показано, что применение МКС позволяет снизить в годовом исчислении суммарный валовый выброс оксидов азота и оксида углерода с продуктами сгорания НК-36СТ на 90 тонн и плату за негативное воздействие на окружающую среду на 16 тыс. руб. в расчете на один двигатель [41].

### **2.2.2 Принцип работы камеры сгорания ПСТ ГТК-10-4**

Горелочное устройство ПСТ ГТК-10-4 представляет собой однозонную многомодульную камеру сгорания. Принцип работы данной камеры заключается в предварительной подготовке «бедной» топливоздушная смеси, которая подается в многоконтурную систему где происходит дальнейшее распределение топлива.

При усовершенствовании конструкции горелочного устройства ГТК-10-4, было предложено установить: дежурные горелки, систему запуска агрегата, установку позволяющую распределять топливо, топливный коллектор, а так же доработать конструкции штатного фронтального устройства, смесителя и топливных трубопроводов.

Общий вид модернизированной камеры сгорания ГТК-10-4 и внешний вид горелок изображены на рисунках 8 и 9.





Рисунок 8 - Камера сгорания ГТК-10-4

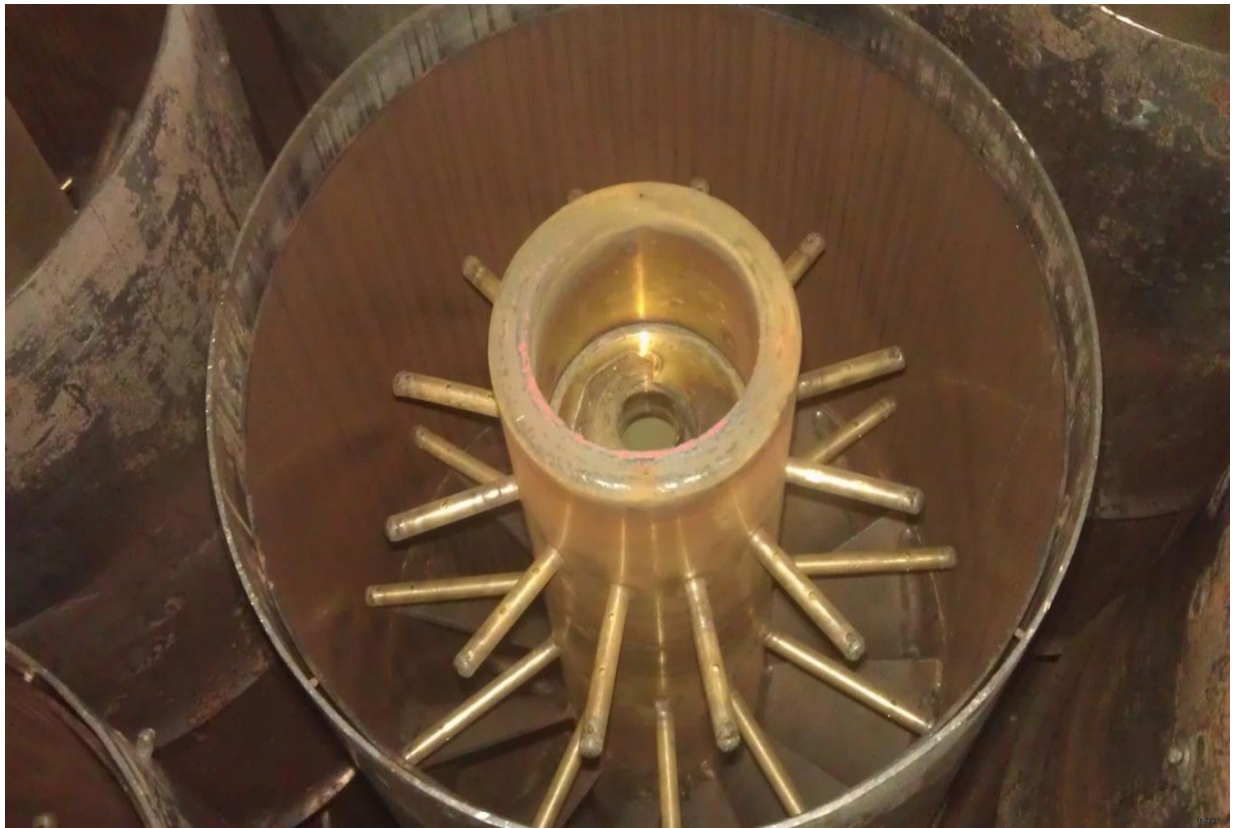


Рисунок 9 - Горелка



В своей работе авторы Р.С. Кашапо, Р.Ш. Муслимов, А.Р. Тухватуллин пишут: «Разработка конструкции ГУ была осуществлена для среднестатистических параметров работы на номинальном режиме штатной камеры сгорания ГТК-10-4» [43].

Так же авторы отмечают: «Однако, если учесть, что режим с пониженной нагрузкой будет относительно непродолжительным, то добиться устойчивой работы КС с выбросами СО не более 300 мг/нм<sup>3</sup> можно за счет изменения гидравлического сопротивления горелок и оптимального распределения расхода воздуха через смеситель» [43].

Было исследовано, что после модернизации камеры сгорания ПСТ ГТК-10-4 концентрация оксидов азота (NO<sub>x</sub>), приведенная к 15 % O<sub>2</sub>, составляла не более 50 мг/нм<sup>3</sup>.

При модернизации камеры ГТК-10-4 было установлено, что для снижения выбросов оксидов азота и оксида углерода необходимо использовать предварительное смешение топлива. При усовершенствовании данной конструкции камеры сгорания ГТК-10-4, были реализованы следующие предложения:

- установка защитного экрана, которая позволит избежать подачи воздуха, направленного на охлаждение стенок;
- установка горелочного устройства, позволяющая предварительно смешивать топливо [43].

Особенностью камер сгорания с горелочным устройством заключается в том, что диапазон работы КС происходит с низкой концентрацией выбросов оксида углерода. Распределение расхода воздуха через смеситель должно быть с одинаковыми параметрами, для достижения стабильных выбросов в атмосферу концентрации СО не более 300 мг/нм<sup>3</sup> [43].

При эксплуатации агрегата с горелочными устройствами ПСТ авторами было замечено, «что и в случае работы горелки на расчетных режимах, возможно появление вибрационного горения на режиме запуска и прогрева, то есть в момент перехода с диффузионного режима на

предварительное смешение топлива появляются колебания давления. Частота пульсаций давления при этом соответствует первой гармонике собственных частот горячей части камеры сгорания» [43].

Применяя описанную выше методику, то есть: произведя распределение воздуха по контурам КС и оптимизацию гидравлического сопротивления проточной части смесителя ГУ, авторами был проведен ряд экспериментов с различными длинами смесителя на ГПА ГТК-10-4. Результаты исследований приведены в таблице 4 [43].

Таблица 4 - Результаты измерений выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$  на основных режимах работы при различных длинах зоны смешения ГУ в условиях ГПА ГТК-10-4  
Размеры в  $\text{мг/нм}^3$

Длина смесителя, мм	$\text{NO}_x$	$\text{CO}$
155	32,7	24,5
85	41,3	13,4
60	54,5	2,1

По словам авторов Р.С. Кашапо, Р.Ш. Муслимов, А.Р. Тухватуллин: «На основных режимах работы КС в условиях ГПА ГТК-10-4, после этапа прогрева, пульсации давления отсутствуют» [43, 44, 45].

Так же авторами отмечено, что «Несмотря на то, что используемая методика позволила снизить уровень и продолжительность пульсаций давления, авторам не удалось с помощью нее установить все существующие причины возникновения автоколебаний» [43].

Авторы Р.С. Кашапо, Р.Ш. Муслимов, А.Р. Тухватуллин подчеркивают, что «В настоящее время механизм (возможно даже механизмы) поддержания неустойчивости горения на переходных режимах в КС с предварительным смешением топлива в мировой практике не изучен достаточно глубоко. При этом объяснения многих решаемых проблем, связанных с подавлением неустойчивости горения, носят гипотетический характер» [43, 46].

Таким образом, во второй главе нами было изучено устройство и принципы работы двух камер сгорания: малоэмиссионной камеры сгорания в составе газотурбинного двигателя НК-36СТ и камеры сгорания ПСТ ГТК-10-4, предназначенные для сжигания топливовоздушной смеси, состоящей из топлива и природного газа.

### 3 Экспериментальная часть

#### 3.1 Проведение экспериментального анализа по исследованию выбросов в атмосферный воздух во время использования малоэмиссионной камеры сгорания и камеры сгорания ПСТ ГТК-10-4

С целью оптимального выбора усовершенствованной камеры сгорания были проведены в течение года раз в квартал замеры по малоэмиссионной камере сгорания и камере сгорания и камеры сгорания ПСТ ГТК-10-4.

Замеры проводились согласно Методическим указаниям по проведению контрольных измерений и расчету концентраций и мощностей вредных выбросов в продуктах сгорания ГПА на компрессорных станциях ООО «Газпром трансгаз Самара» МУ-01.24-141-2008. Измерения вредных выбросов проводились один раз в квартал на каждом работающем агрегате на режиме эксплуатации ГПА. Для замеров использовались газоанализаторы ДАГ-16.

При оценке эффективности мероприятий по снижению вредных выбросов в выхлопных газах ГТУ измерения проводились не менее, на трех режимах в диапазоне нагрузок от 60 до 70 % до максимальной, определяемой предельными значениями параметров ГПА таблица 5 и таблица 6.

Таблица 5 - Результаты замеров концентраций продуктов сгорания в малоэмиссионной камере сгорания

Параметр	Режим				Примечание
	1 квартал	2 квартал	3 квартал	4 квартал	
Концентрация кислорода, %	16,1	16,5	16,4	16,3	Исход
Концентрация диоксида углерода, %	2,8	2,9	2,9	2,8	Исход
Концентрация оксида углерода	46	48	48	47	Исход

Продолжение таблицы 5

Размеры в ppm

Параметр	Режим				Примечание
	1 квартал	2 квартал	3 квартал	4 квартал	
Концентрация оксида углерода, мг/м <sup>3</sup>	57,5	58,1	57,9	57,8	Расчет
Концентрация оксидов азота (NO <sub>x</sub> )	6	7	7	6	Исход
Концентрация оксидов азота (NO <sub>x</sub> ) мг/м <sup>3</sup>	12,32	12,91	12,67	12,46	Расчет
Концентрация оксида азота (NO)	5,7	5,9	5,8	5,8	Расчет
Концентрация оксида азота (NO), мг/м <sup>3</sup>	7,64	7,85	7,77	7,74	Расчет
Концентрация диоксида азота (NO <sub>2</sub> )	0,3	0,4	0,3	0,3	Расчет
Концентрация диоксида азота (NO <sub>2</sub> )	0,3	0,4	0,3	0,3	Расчет
Концентрация диоксида азота (NO <sub>2</sub> ), мг/м <sup>3</sup>	0,62	0,71	0,68	0,67	Расчет

Таблица 6- Результаты замеров концентраций продуктов сгорания в камере сгорания ПСТ ГТК-10-4  
Размеры в ppm

Параметр	Режим				Примечание
	1 квартал	2 квартал	3 квартал	4 квартал	
Концентрация кислорода, %	15,56	17,1	16,4	15,96	Исход
Концентрация диоксида углерода, %	3,1	2,05	2,39	2,68	Исход
Концентрация оксида углерода	157	231	175	194	Исход
Концентрация оксида углерода, мг/нм <sup>3</sup>	196,25	288,75	231,12	206	Расчет
Концентрация оксидов азота (NO <sub>x</sub> )	47	45	46	43	Исход
Концентрация оксидов азота (NO <sub>x</sub> ) мг/нм <sup>3</sup>	96,49	92,39	94,31	93,58	Расчет
Концентрация оксида азота (NO)	44,7	42,8	43,53	42,68	Расчет
Концентрация оксида азота (NO), мг/нм <sup>3</sup>	59,83	57,29	58,26	56,95	Расчет
Концентрация диоксида азота (NO <sub>2</sub> )	2,4	2,3	2,2	2,3	Расчет

Продолжение таблицы 6

Размеры в ppm

Параметр	Режим				Примечание
	1 квартал	2 квартал	3 квартал	4 квартал	
Концентрация диоксида азота (NO <sub>2</sub> ), мг/м <sup>3</sup>	4,82	4,62	4,67	4,71	Расчет

Отбор проб выхлопных газов производился через отверстия диаметров 10-12 мм.

В выхлопных газах ГТУ производилось измерение концентрации:

- 1) оксида азота (NO), ppm;
- 2) диоксидов азота (NO<sub>2</sub>), ppm;
- 3) или оксидов азота (NO<sub>x</sub>), ppm;
- 4) оксида углерода (CO), ppm;
- 5) диоксида углерода (CO<sub>2</sub>), %;
- 6) кислорода (O<sub>2</sub>), %.

На агрегатах типа ГТК-10 анализ продуктов сгорания проводился в обоих газоходах с последующим осреднением результатов измерений.

Измерения проводились на установившихся режимах. Отклонения теплотехнических параметров не должны были превышать:

- 1) частота вращения роторов (n) ± 10 мин<sup>-1</sup>;
- 2) температура наружного воздуха (t<sub>н</sub>) ± 0,5 °С;
- 3) температура газов перед или за свободной турбиной (t<sub>сг</sub>) ± 2,5 °С;

Отклонения показаний измеряемых концентраций не должны превышать:

– NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO ± 2 ppm;

– O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> ± 0,1 %.

Продувка контейнера при отборе пробы на метан должна выполняться не менее 3-х минут.

При изменении режима работы ГТУ, время до проведения измерений - 30 минут. Перечень параметров, необходимых для расчета, представлен в таблице 7.

Таблица 7 - Перечень измеряемых параметров

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Размерность	Примечание
1	Температура атмосферного воздуха.	t <sub>н</sub>	°С	-
2	Барометрическое давление.	В	мм рт. ст	-
3	Температура воздуха на входе в компрессор.	t <sub>вх</sub>	°С	-
4	Разрежение в воздухозаборной камере.	ΔP <sub>вх</sub>	мм вод. ст.	-
5	Давление газов за ТНД.	P <sub>тнд</sub>	мм вод. ст.	Для ГПА типа ГТК-10.
6	Избыточное давление воздуха за компрессором ВД.	P <sub>2</sub>	кг/см <sup>2</sup>	-
7	Температура продуктов сгорания перед ТВД.	t <sub>1</sub>	°С	Для ГПА типа ГТК-10.
8	Температура продуктов сгорания за ТВД, перед СТ.	t <sub>5</sub>	°С	Для ГПА типа Ц-6,3; Ц-16; ГПУ-10.
9	Температура продуктов сгорания за СТ.	t <sub>2</sub>	°С	Для ГПА типа ГТК-10.



Продолжение таблицы 7

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Размерность	Примечание
10	Плотность топливного газа.	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	Данные химлаборатории.
11	Низшая теплотворная способность топливного газа.	Hu	ккал/кг	Для ГТК-10 ккал/нм <sup>3</sup> .
12	Частота вращения ротора высокого давления.	n <sub>ВД</sub>	об/мин	-
13	Частота вращения ротора низкого давления.	n <sub>НД</sub>	об/мин	Для ГПА типа Ц-16, Ц-25, ГПУ-10.
14	Частота вращения СТ	n <sub>СТ</sub>	об/мин	-
15	Концентрация оксида азота.	C <sub>NO</sub>	ppm	-
16	Концентрация диоксида азота.	C <sub>NO2</sub>	ppm	-
17	Концентрация оксида углерода.	C <sub>CO</sub>	ppm	-
18	Концентрация метана	C <sub>CH4</sub>	мг/нм <sup>3</sup>	-
19	Концентрация кислорода.	C <sub>O2</sub>	%	-
20	Концентрация диоксида углерода.	C <sub>CO2</sub>	%	-
21	Коэффициент трансформации оксида азота в диоксид азота.	K <sub>тр</sub>	-	0,5 – лето; 0,55 – весна; 0,57 – осень; 0,63 – зима.
22	Коэфф. избытка воздуха.	$\lambda$	-	-

Продолжение таблицы 7

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Размерность	Примечание
23	Расход топливного газа (измеренный).	G <sub>TГ</sub>	кг/час	Данные измерения расходомерного устройства ГТУ или результаты теплотехнических расчетов.
24	Стехиометрический коэффициент избытка воздуха.	L <sub>0</sub>	-	Величина постоянная, равная =17,16.
25	Плотность продуктов сгорания при t=0 °С и P=1,10332 кг/см <sup>2</sup> .	γ <sub>0</sub>	кг/нм <sup>3</sup>	Величина постоянная, равная 1,282 кг/нм <sup>3</sup> .

Обработка результатов измерений производится в соответствии с МУ–01.24-141-2008 [40].

1. Расчёт концентраций оксидов азота в продуктах сгорания по измерению NO<sub>x</sub> для безрегенеративных ГПА:

1) по формуле (1) производится расчёт концентрации оксида азота C<sub>NO</sub>. Данная концентрация вычисляется в единицах измерения ppm;

$$C_{NO(ppm)} = 0,95 \cdot C_{NO_x(ppm)} \quad (1)$$

2) по формуле (2) производится расчёт концентрации диоксида азота C<sub>NO2</sub> в ppm (2);

$$C_{NO_2(ppm)} = 0,05 \cdot C_{NO_x(ppm)} \quad (2)$$

3) «концентрация оксида азота в мг/нм<sup>3</sup>, вычисляют по формуле» [32]  
(3);

$$C_{NO} = C_{NO(ppm)} \cdot 1,34 \quad (3)$$

4) концентрация диоксида азота в мг/нм<sup>3</sup>, вычисляют по формуле (4);

$$C_{NO_2} = C_{NO_2(ppm)} \cdot 2,053 \quad (4)$$

5) расчет концентрации оксидов азота  $C_{NO_x}$  в газоходе в мг/нм<sup>3</sup>, вычисляют по формуле (5).

$$C_{NO_x} = C_{NO_x(ppm)} \cdot 2,053 \quad (5)$$

2. Расчёт концентраций оксидов азота в продуктах сгорания по измерению  $NO_x$  для регенеративных ГПА:

1) по формуле (6) производится расчёт концентраций оксида азота  $C_{NO}$  в ppm (6);

$$C_{NO(ppm)} = 0,9 \cdot C_{NO_x(ppm)} \quad (6)$$

2) по формуле (7) производится расчет концентраций диоксида азота ( $C_{NO_2}$ ) в ppm;

$$C_{NO_2(ppm)} = 0,1 \cdot C_{NO_x(ppm)} \quad (7)$$

3) расчёт концентрации  $NO_x$  в газоходе в ppm, вычисляют по формуле (8);

$$C_{NO_x(ppm)} = C_{NO(ppm)} + C_{NO_2(ppm)} \quad (8)$$

4) расчёт концентрации оксида углерода в мг/м<sup>3</sup>, вычисляют по формуле (9).

$$C_{CO} = C_{CO(ppm)} \cdot 1,25 \quad (9)$$

### **3.2 Сравнение результатов исследования малоэмиссионной камеры сгорания и камеры сгорания ПСТ ГТК-10-4 и рекомендации по установке эффективной камеры сгорания**

Если сравнивать малоэмиссионную камеру сгорания и камеру сгорания ПСТ ГТК-10-4, то «Малоэмиссионная камера сгорания газовой турбины, содержащая фронтное устройство и цилиндрическую жаровую трубу с отверстиями для подачи воздуха, расположенными по окружности жаровой трубы, отличающаяся тем, что фронтное устройство состоит по меньшей мере из двух модулей с полостями предварительного перемешивания топлива с воздухом, при этом отношение расстояния между осями соседних модулей к внутреннему диаметру жаровой трубы ( $a/D$ ) составляет 0,4-0,5, а отношение длины полости предварительного перемешивания каждого модуля к диаметру его выходного сопла ( $L/D_1$ ) равно 0,6-0,8, жаровая труба включает полость горения топливовоздушной смеси и полость смешения горячих газов с воздухом, при этом жаровая труба включает сплошную внутреннюю стенку и наружную перфорированную оболочку, кольцевой канал между которыми выполнен с возможностью подвода охлаждающего воздуха в полость смешения, причем  $L_1/D=0,9-1,1$ , где  $L_1$  - длина полости горения, а отверстия для подачи воздуха выполнены в полости смешения» [47], а горелочное устройство ПСТ ГТК-10-4 представляет собой однозонную многомодульную камеру сгорания.

На основании полученных данных таблицы 5 и таблицы 6 следует, что количество выбросов оксида азота при сжигании газа в усовершенствованной малоэмиссионной камере сгорания в 4 раза меньше, чем при сжигании природного газа усовершенствованной камерой сгорания ПСТ ГТК-10-4.

Так же отметим, что по данным таблицы 5 и таблицы 6 количество выбросов оксида азота, которое происходит при сжигании природного газа в усовершенствованной малоэмиссионной камере сгорания в 12 раз меньше, чем при сжигании природного газа в усовершенствованной камере сгорания ПСТ ГТК-10-4.

Применение малоэмиссионной камеры сгорания на Предприятии ООО «Газпром трансгаз Самара» позволит значительно снизить концентрацию оксидов азота и углерода в атмосферном воздухе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования принципов работы малоэмиссионной камеры сгорания и камеры сгорания ПСТ ГТК-10-4, было установлено, что процесс горения у данных камер сгорания происходит на "бедных" смесях.

Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что двигатель НК-36СТ, который оснащен малоэмиссионной камерой сгорания, имеет наиболее лучшие показатели по выбросам оксидов углерода и азота на номинальном режиме по сравнению с двигателями нового поколения. Эти показатели полностью соответствуют нормам международных стандартов по экологическим показателям загрязнения.

«Таким образом, благодаря использованию малоэмиссионной камеры сгорания удастся уменьшить суммарный валовый выброс оксидов азота и оксида углерода с продуктами сгорания НК-36СТ на 90 т. (в годовом исчислении). Помимо этого, также можно будет снизить на 16 тыс. руб. (в расчете на один двигатель) выплаты за неблагоприятное воздействие на окружающую среду (Стандарты организации Газпром 2-1.19-541-2011)» [48].

Так же «На основании полученных данных следует, что количество выбросов оксида азота и углерода в усовершенствованной двухзонной камере сгорания на максимальном режиме работы двигателя снижается на 80,73% и 94,4%, что соответствует требованиям ГОСТ 28775-90. Поэтому применение двухзонных камер сгорания в Тольяттинском ЛПУМГ ООО «Газпром трансгаз Самара» будет способствовать снижению загрязнения атмосферного воздуха оксидами азота и углерода, а также увеличению экономического эффекта в виде снижения штрафов за не превышение допустимых нормативных требований» [48].

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Эмиссия вредных веществ [Электронный ресурс] – URL: [https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_tech/3972/%D0%AD%D0%BC%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B8%D1%8F](https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_tech/3972/%D0%AD%D0%BC%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B8%D1%8F) (дата обращения: 08.04.2019).
2. Хитрик, Ю.И., Щепетьева, Т.В. Проблема загрязнения атмосферного воздуха в городах России тенденции и пути решения / Ю.И. Хитрик, Т.В. Щепетьева // Сборник трудов конференции. – 2017. – С. 136–137.
3. Ахметьев, Д.А., Сарбаев, В.И. Система мероприятий по снижению загрязнений атмосферного воздуха автомобильным транспортом / Д.А. Ахметьев, В.И. Сарбаев // Сборник трудов конференции. – 2016. – С. 437–442. [Электронный ресурс] – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27565860> (дата обращения: 02.02.2019).
4. Биненко, В.И., Решетников, А.И. Парниковые газы в атмосфере / В.И. Биненко, А.И. Решетников // Региональная экология. – № 3. – 2010. – С. 24-38. [Электронный ресурс] – URL: <https://readera.ru/analiz-izmenchivosti-anomalij-prizemnoj-temperatury-vozduha-i-koncentracii-14092630> (дата обращения: 02.02.2019).
5. Химия аэрозолей и пыли [Электронный ресурс] – URL: <https://studfiles.net/preview/4583940/page:4/> (дата обращения: 08.04.2019).
6. Южно-Уральская погода [Электронный ресурс] – URL: <http://www.chelpogoda.ru/pages/610.php> (дата обращения: 01.04.2019).
7. Диоксид азота: влияние на человека [Электронный ресурс] – URL: [https://www.syl.ru/article/172799/new\\_dioksid-azota-vliyanie-na-cheloveka-dioksid-azota-klass-opasnosti](https://www.syl.ru/article/172799/new_dioksid-azota-vliyanie-na-cheloveka-dioksid-azota-klass-opasnosti) (дата обращения: 01.04.2019).
8. Оксиды азота [Электронный ресурс] – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%B4\\_%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D1%82%D0%B0\(I\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%B4_%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D1%82%D0%B0(I)) (дата обращения: 28.03.2019).

9. Влияние оксидов азота на окружающую среду [Электронный ресурс] – URL: <https://studfiles.net/preview/3545845/page:2/> (дата обращения: 21.02.2019).

10. Сихынбаева, Ж.С. Некоторые вопросы об учете загрязнения окружающей среды аэрозолями в задачах развития энергетических систем / Ж.С. Сихынбаева, О. Джемал, К.А. Жолдасбекова // Международный журнал экспериментального образования. – 2013. – № 3.– С. 99–102. [Электронный ресурс] – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20233198> (дата обращения: 21.03.2019).

11. Последствия парникового эффекта [Электронный ресурс] – URL: <https://lektsii.org/14-6459.html> (дата обращения: 21.02.2019).

12. Парниковый эффект его причины и негативные последствия для всего человечества [Электронный ресурс] – URL: <https://greenomak.ru/ekologicheskie-problemy/parnikovyj-effekt> (дата обращения: 02.04.2019).

13. 10 самых серьезных последствий глобального потепления [Электронный ресурс] – URL: <https://www.infoniac.ru/news/10-samyh-ser-eznyh-posledstviy-global-nogo-potepleniya.html> (дата обращения: 25.02.2019).

14. Буквич, Р.М., Петрович, Д.Р. Парниковый эффект и рыночные механизмы Киотского протокола / Р.М. Буквич, Д.Р. Петрович // Вестник НГИЭИ. – 2017. – № 3 (70). – С. 140–157.

15. Ковалев, Ю.Ю. В завершение Саммита ООН по климату в Париже: неустойчивость территориальных систем и новые риски регионального развития / Ю.Ю. Ковалев // Известия Уральского федерального университета. – 2016. – № 1. (149). – С. 91–108. [Электронный ресурс] – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26008625> (дата обращения: 10.01.2019).

16. Хлюстова, Я. Шутова, Е., Подорванюк Н. Чем закончилась конференция по климату / Я. Хлюстова, Е. Шутова, Н. Подорванюк // Газета.Ru [Электронный ресурс] – URL:



[https://www.gazeta.ru/science/2015/12/11\\_a\\_7954835.shtml](https://www.gazeta.ru/science/2015/12/11_a_7954835.shtml) (дата обращения: 09.01.2019).

17. Об охране атмосферного воздуха [Электронный ресурс] : Федеральный закон от 04.05.1999 № 96-ФЗ (в ред. от 29.07.2018). - URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_22971/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22971/) (дата обращения: 09.01.2019).

18. Постановление Правительства РФ от 02 марта 2000 № 183 «О нормативах выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух и вредных физических воздействий на него» (в ред. от 14.07.2017) [Электронный ресурс] – URL: <https://base.garant.ru/2157544/> (дата обращения: 15.02.2019).

19. Постановление Правительства РФ от 21.04.2000 № 373 «Об утверждении Положения о государственном учете вредных воздействий на атмосферный воздух и их источников» [Электронный ресурс] – URL: <https://base.garant.ru/2157684/> (дата обращения: 15.02.2019).

20. Экологизация экономики [Электронный ресурс] – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologizatsiya-ekonomiki-problemy-i-perspektivy> (дата обращения: 28.03.2019).

21. Ивакин, В.И., Юридическая ответственность за нарушение правового режима природных объектов, природных ресурсов / В.И. Ивакин, А.И. Бобылев. – М. : Волтерс Клувер, 2017. – 385 с.

22. Звягинцева, А.Н. Системы оценки опасности при загрязнении атмосферного воздуха: сравнение подходов / А.Н. Звягинцева // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. – 2016. – № 3. – С. 125–127.

23. Киселев, А.В., Волкодаева, М.В. О развитии системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха / А.В. Киселев, М.В. Волкодаева // Записки Горного института. – 2018. – № 15. – С. 16–18.

24. Давыдова, И.С., Гапоненко, А.В. Проблема загрязнения атмосферного воздуха в городах / И.С. Давыдова, А.В. Гапоненко // Science of

Europe. – 2018. – № 16. – С. 7–11. [Электронный ресурс] – URL: <http://european-science.org/wp-content/uploads/2017/05/VOL-2-No-14-14-2017.pdf> (дата обращения: 10.02.2019).

25. Минприроды сообщило о праве граждан на мониторинг воздуха без лицензии [Электронный ресурс] – URL: <https://www.rbc.ru/society/10/01/2018/5a55dd509a79470ca9b207e7> (дата обращения: 10.02.2019).

26. Карабаева, Г., Ташова, А. Причины загрязнения атмосферного воздуха и его влияние на человека / Г. Карабаева, А. Ташова // Современные проблемы науки и образования. – 2016. – № 15. – С. 15–19. [Электронный ресурс] – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27606199> (дата обращения: 10.02.2019).

27. Киселев, А.В., Волкодаева, М.В. О развитии системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха / А.В. Киселев, М.В. Волкодаева // Записки Горного института. – 2018. – № 15. – С. 15–22 [Электронный ресурс] – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-razvitiy-sistemy-ekologicheskogo-monitoringa-kachestva-atmosfernogo-vozduha> (дата обращения: 10.02.2019).

28. Медведев заявил о необходимости сокращения вредных выбросов на крупных предприятиях [Электронный ресурс] – URL: <https://www.pnp.ru/author/maryam-gulalieva/95/> (дата обращения: 01.12.2018).

29. Белоглазова, Т.Н., Романова, Т.Н. Защита атмосферы от выбросов при эксплуатации магистральных газопроводов / Т.Н. Белоглазова, Т.Н. Романова // Журнал Успехи современного естествознания. – 2017. – № 12. – С. 111–116. [Электронный ресурс] – URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36615> (дата обращения: 21.03.2019).

30. Пути снижения технологических выбросов природного газа на ГКС [Электронный ресурс] – URL: <https://studfiles.net/preview/5855784/> (дата обращения: 01.12.2018).

31. Новожилова, С.С. Мероприятия по снижению воздействия на окружающую среду при транспортировке газа / С.С. Новожилова // Экологические основы прогрессивных технологий. – 2018. – С. 184–187. [Электронный ресурс] – URL: [https://docviewer.yandex.ru/view/0/?\\*=C4HzMwR8Nv8Xts0nrqyVnOJ1aC97InVybCI6Imh0dHA6Ly9lYXJjaGl2ZS50cHUucnUvYml0c3RyZWftLzExNjgzLzQ2NzIxLzEvY29uZmVyZW5jZV90cHUtMjAxNy1DNtJfcDE4NC0xODcucGRmIiwidGl0bGUiOiJjb25mZXJlbnNIX3RwdS0yMDE3LUM1Ml9wMTg0LTE4Ny5wZGYiL](https://docviewer.yandex.ru/view/0/?*=C4HzMwR8Nv8Xts0nrqyVnOJ1aC97InVybCI6Imh0dHA6Ly9lYXJjaGl2ZS50cHUucnUvYml0c3RyZWftLzExNjgzLzQ2NzIxLzEvY29uZmVyZW5jZV90cHUtMjAxNy1DNtJfcDE4NC0xODcucGRmIiwidGl0bGUiOiJjb25mZXJlbnNIX3RwdS0yMDE3LUM1Ml9wMTg0LTE4Ny5wZGYiL) (дата обращения: 01.03.2018).

32. Эксплуатация компрессорных станций [Электронный ресурс] – URL: <https://studopedia.org/14-9904.html> (дата обращения: 01.03.2018).

33. РД 52.04.52-85 Методические указания. Регулирование выбросов при неблагоприятных метеорологических условиях. – Введ. 1986-12-01. – М.: Госкомгидрометом СССР, 1986. – 20с. [Электронный ресурс] – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200031405> (дата обращения: 01.04.2018).

34. Davis, L.B., Black, S.H. GE Power Systems Schenectady, NY Dry Low NO<sub>x</sub> Combustion Systems for GE Heavy-Duty Gas Turbines / L.B. Davis, S.H. Black // International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition. – 1996. – P. 1–9. [Электронный ресурс] – URL: [https://www.ge.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en\\_US/documents/technical/ger/ger-3568g-dry-low-nox-for-hdgt.pdf](https://www.ge.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/documents/technical/ger/ger-3568g-dry-low-nox-for-hdgt.pdf) (дата обращения: 26.12.2018).

35. Giovanni, C. Thermoacoustic Analysis of Combustion Instability Importing RANS / C. Giovanni, E. Cosatto, S.M. Camporeale // Academia. [Электронный ресурс] – URL: [https://www.comsol.com/paper/download/151741/campa\\_paper.pdf](https://www.comsol.com/paper/download/151741/campa_paper.pdf) (дата обращения: 26.12.2018).

36. Schuermans, B. Thermoacoustic Modelling and Control of Multi Burner Combustion Systems / B. Schuermans, V. Bellucci, C.O. Paschereit // ASME. – 2003. – P. 11. [Электронный ресурс] – URL:

<https://www.researchgate.net/publication/280443759> (дата обращения: 27.12.2018).

37. Lieuwen, T.C., Yang, V. Progress in Astronautics and Aeronautics / T.C. Lieuwen, V. Yang // ASME. – 2005. – pp.445–481.

38. Zito, D. Design Validation on Pressurized Test Rig of Upgraded Velonox Combustion System for FClass Engine / D. Zito, F. Bonzani, C. Piana // ASME. – 2010. – P. 7.

39. ГОСТ 28775-90. Агрегаты газоперекачивающие с газотурбинным приводом. – Введ. 1992-01-01. – М. : Стандартиформ, 2005. – 21с.

40. Стандарты организации Газпром 2-3.5-038-2005. Инструкция по проведению контрольных измерений вредных выбросов газотурбинных установок на компрессорных станциях. – Введ. 2005.12.15. М. : Изд-во ООО «Газпром экспо», 2005. 43с.

41. Субботин, В.А. Опыт эксплуатации двигателей НК-36СТ и НК-47 модернизированных с целью снижения концентраций оксидов азота и углерода в продуктах сгорания газоперекачивающих агрегатов / В.А. Субботин, В. Г. Аусев, С.Г. Сергеев, А.А. Соколов, И.В. Щербо, С.А. Холодков // Вестник СГАУ им. академика С. П. Королева. – 2018. – № 6. – С. 71–75. [Электронный ресурс] – URL: <http://repo.ssau.ru/handle/Mezhdunarodnaya-nauchnotekhnicheskaya-konferenciya-Problemy-i-perspektivy-razvitiya-dvigatellestroeniya> (дата обращения: 28.02.2019).

42. Гречишников, О.В. Гомогенные горелки двухзонных камер сгорания / О.В. Гречишников, И.И. Остапец, А.Д. Росляков // Вестник СГАУ им. академика С.П. Королева. – 2017. – № 5 (54). – С. 36–43.

43. Кашапов, Р.С. Исследования динамической неустойчивости горения в камере сгорания газоперекачивающего агрегата ГТК-10-4 / Р.С. Кашапов, Р.Ш. Муслимов, А. Р. Тухватуллин // Сборник трудов конференции. – 2015. – С. 392–397. [Электронный ресурс] – URL:

<http://repo.ssau.ru/bitstream/Mezhdunarodnaya-nauchnotekhnicheskaya-konferenciya-Problemy> (дата обращения: 28.02.2019).

44. Тухбатуллин, Ф.Г. Малотоксичные горелочные устройства газотурбинных установок / Ф.Г. Тухбатуллин, Р.С. Кашапов. – М. : Недра, 1997. –160 с.

45. Раушенбах, Б.В. Вибрационное горение / Б.В. Раушенбах. – М. : Физматгиз, 1961. – 500 с.

46. Кашапов, Р.С. Опыт создания горелочного устройства с предварительным смешением топлива для камеры сгорания газоперекачивающего агрегата ГТК-10-4 со «сверхнизким» уровнем эмиссии  $\text{NO}_x$ . / Р.С. Кашапов, Д.А. Максимов, Ф.Г. Тухбатуллин. – М. : ЦИАМ, 1995. –154 с.

47. Пат. 2315913 Российская Федерация, МПК F23R3/20. Малоэмиссионная камера сгорания газовой турбины / Медведев А. В., Ташкинов В. А., Максин В. И., Баранов В. А. ; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «АВИАДВИГАТЕЛЬ». – № 2005129938/06 ; / заявл. 26.09.2005; опубл. 27.01.2008, Бюл. № 3. – 4 с. [Электронный ресурс] – URL: <http://www.findpatent.ru/patent/231/2315913.html> (дата обращения: 26.02.2019).

48. Лапина, Т.А. Снижение концентрации продуктов сгорания в результате усовершенствования малоэмиссионной камеры сгорания в составе двигателя НК-36СТ / Т.А. Лапина // Сборник научных трудов VII Молодежной научной школы-конференции с международным участием «Актуальные проблемы экологии Волжского бассейна» 18-21 апреля 2019 г. Тольятти: ИЭБВ РАН, - 2019 г. - С. 285-289. [Электронный ресурс] – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/snizhenie-kontsentratsiy-produktov-sgoraniya-v-rezultate-usovershenstvovaniya-maloemissionnoy-kamery-sgoraniya-v-sostave-dvigatelya> (дата обращения: 13.04.2019).

49. Пат. 2225963 Российская Федерация, МПК F23D14/62 Горелочное устройство / Кашапов Р. С., Максимов Д. А., Скиба Д.

В., Куликов С. В., Баштанников М. Н. ; заявитель и патентообладатель Кашапов Рафаэль Салихзянович. – № 2005129938/06; / заявл. 06.05.2002; опубл. 20.03.2004, Бюл. № 2. – 7 с. [Электронный ресурс] – URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2225963> (дата обращения: 26.02.2019).

50. Пат. 2167363 Российская Федерация, МПК F23D14/62, F23R3/28 Горелка с предварительным смешением газового топлива и воздуха / Токарев В. В., Кириевский Ю. Е. ; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Авиадвигатель». – № 99111333/06; / заявл. 25.05.1999; опубл. 20.05.2001, Бюл. № 5. – 4 с. [Электронный ресурс] – URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2167363> (дата обращения: 26.02.2019).