

Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»
Кафедра «Тепловые энергетические установки»
Специальность 6М071700 – Теплоэнергетика

Допущен к защите
Зав.кафедрой _____
«__»_____20__г

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
пояснительная записка

Тема «Методы прогнозирования вредных выбросов ГТУ по
комплексу технологических параметров
газоперекачивающих агрегатов»

Магистрант _____ Сулейменова Д.Т.
Руководитель диссертации _____ Кибарин А.А.
Рецензент _____

Алматы, 2014г.

Содержание

Введение.....	6
Глава 1 Состояние проблемы загрязнения воздушной среды газотурбинными газоперекачивающими агрегатами компрессорных станций магистральных газопроводов Казахстан.....	7
1.1 Воздействие существующей системы газопроводов на окружающую среду	7
1.2 Образование оксидов азота при сжигании природного газа.....	11
1.3 Анализ теоретических моделей образования токсичных компонентов в камерах сгорания ГТУ	23
1.3.1 Модели течения в камере сгорания	26
1.4 Средства защиты окружающей среды (ОС) действующих газоперекачивающих станций и их экологическая оценка	29
1.5 Анализ схем и конструкций камер сгорания ГТУ с пониженным выходом вредных веществ.....	33
1.5.1 Технологические способы снижения NO_x в отработавших газах газотурбинных установок	34
1.5.2 Конструктивные способы снижения NO_x в отработавших газах газотурбинных установок	35
Глава 2 Анализ взаимосвязей концентраций вредных выбросов с рабочими параметрами газотурбинных установок	37
2.1 Влияние технологических параметров ГПА на вредные выбросы.....	37
2.2 Ранжирование рабочих параметров газотурбинных газоперекачивающих агрегатов по степени влияния на вредные выбросы.....	38
2.2.1 Анализ влияния внешних условий работы газотурбинных установок на выбросы оксидов азота и углерода	38
2.2.2 Анализ влияния рабочих параметров ГТК-10-4 на выбросы оксидов азота и углерода	39
Глава 3 Методика прогнозирования вредных выбросов по технологическим параметрам газотурбинной установки.....	49
3.1 Прогнозирование выбросов оксидов азота для газотурбинных агрегатов ГТК-10-4.....	49
3.2 Прогнозирование выбросов оксида углерода для агрегатов ГТК-10-4.....	51
Заключение.....	53
Список использованной литературы.....	54
Приложение А.....	59

Аңдатпа

Газ шығырлы құрылғылардың зиянды тастандыларын болжамдау үшін ГАҚ технологиялық параметрлерінің жиынтығы бойынша әдістер қарастырылды. Қазіргі таңдағы газ айдайтын құбырлардың қоршаған ортаға әсері зерттелді. Зерттеулер нәтижесі бойынша атмосфераның негізгі ластайтын азот пен көміртегі оксидтерінің есептеулері жүргізіліп, графиктері тұрғызылды. Есептеулер нәтижесі бойынша, құрылғының техникалық жағдайы коэффициенті енгізілген әдіс ұсынылды.

Аннотация

Для прогнозирования вредных выбросов ГТУ, были рассмотрены методы их определения по комплексу технологических параметров газоперекачивающих агрегатов. Было рассмотрено воздействие существующей системы газопроводов на окружающую среду. По данным экспериментальных исследований были определены концентрации основных загрязнителей атмосферного воздуха – оксидов азота и углерода. Исходя из расчетов предложена методика прогнозирования вредных выбросов по технологическим параметрам, в которой вводится коэффициент технического состояния.

Annotation

For forecasting of harmful emissions of GPU, methods on a complex of technological parameters of gas-distributing units were considered. Impact of existing system of gas pipelines on environment was considered. According to data of expertize schedules of concentration of the main pollutants of atmospheric air – nitrogen and carbon oxides were calculated and made. Proceeding from calculations the technique of forecasting of harmful emissions in which the coefficient of technical condition is entered is offered.

Введение

В настоящее время предприятия газовой отрасли стали уделять больше внимания решению природоохранных проблем. Важным звеном в системе экологической безопасности является производственный экологический мониторинг, который проводится с целью наблюдения и прогноза изменения качества окружающей природной среды, и, в частности, мониторинг вредных выбросов газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на компрессорных станциях магистральных газопроводов.

Газотурбинные компрессорные станции относятся к категории крупных стационарных источников выбросов оксидов азота (NO_x) и углерода (СО), в связи с этим возникает необходимость разработки и совершенствования методов контроля и сокращения вредных выбросов газоперекачивающих агрегатов.

Цель работы – разработка метода прогнозирования вредных выбросов ГТУ по комплексу технологических параметров газоперекачивающих агрегатов, так как в процессе эксплуатации происходят существенные изменения в величине выбросов в сторону увеличения.

Существуют множество методик определения вредных выбросов, в том числе и для газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на компрессорных станциях магистральных газопроводов, отличающихся сложностью и точностью. Большинство методик разработаны для новых камер сгорания, а в процессе эксплуатации очень важно иметь простую методику, основанную на реальных измерениях параметров ГПА.

В работе рассмотрены закономерности влияния рабочих параметров газоперекачивающих агрегатов на концентрации оксидов азота и углерода в выхлопных газах, а также предложена методика связи с коэффициентом технического состояния агрегата.

1. Состояние проблемы загрязнения воздушной среды газотурбинными газоперекачивающими агрегатами компрессорных станций магистральных газопроводов Казахстана

1.1 Воздействие существующей системы газопроводов на окружающую среду

Транспортировка газа по магистральным трубопроводам (МГ) относится к экологически опасному виду производства и сопровождается рядом негативных воздействий на окружающую среду.

Максимальному воздействию при работе объектов магистрального газопровода в штатном режиме подвергается воздушный бассейн, другие компоненты окружающей среды – почвы, растительность, поверхностные и подземные воды, животный мир – испытывают значительно меньшие воздействия.

При работе в штатном режиме наибольшее воздействие на качество воздуха оказывают выбросы газоперекачивающих агрегатов, топливом для которых является перекачиваемый газ. На выбросы газоперекачивающих агрегатов приходится по объему около 98-99 % всех валовых выбросов в атмосферу от стационарных источников.

При залповых выбросах, сопровождающих, как правило, ремонтно-профилактические работы на линейной части или процессы пуска-останова агрегатов, в выбросах резко преобладают углеводороды.

Концентрации основных загрязнителей атмосферного воздуха – оксидов азота и углерода – в значительной степени зависят от режимов сгорания топливного газа и технического состояния газоперекачивающих агрегатов. Следует отметить, что на большинстве компрессорных станций режимных карт сжигания газа нет.

Одним из основных МГ Казахстана является газопровод «Средняя Азия Центр» (САЦ) с отводом МГ «Мака́т-Северный Кавказ». В процессе эксплуатации газопровода заметно снизились располагаемые мощности действующих ГПА и в настоящее время по данным исследований [1, 2, 3] они составляют как показал анализ (средние показатели):

1. Компрессорная станция (КС) Бейнеу (ГТ-750-6 - $N_{cp} = 4500$ кВт; ГТК-10-4 - $N_{cp} = 8218$ кВт);
2. КС Опорная (ГТ-750-6 - $N_{cp} = 4800$ кВт);
3. КС Кульсары (ГТ-750-6 - $N_{cp} = 3740$ кВт; ГТК-10-4 - $N_{cp} = 7651$ кВт);
4. КС Мака́т (ГТ-750-6 - $N_{cp} = 4776$ кВт; ГТК-10-4 - $N_{cp} = 7342$ кВт);
5. КС Индер (ГТ-750-6 - $N_{cp} = 4832$ кВт; ГТК-10-4 - $N_{cp} = 7739$ кВт; ГПА-Ц-6,3 - $N_{cp} = 5843$ кВт);
6. КС Джангала (ГТ-750-6 - $N_{cp} = 3213$ кВт; ГТК-10-4 - $N_{cp} = 7940$ кВт);
7. КС Редут (ГПА-10-01 - $N_{cp} = 8385$ кВт);
8. КС Тайман (ГПА-10-01 - $N_{cp} = 7133$ кВт);
9. КС Акколь (ГПА-10-01 - $N_{cp} = 8275$ кВт).

Большое количество ГПА имеют техническое состояние, не отвечающее требованиям нормативных документов, да и наработка многих агрегатов близка к предельной наработке. В довольно широких пределах колеблется и величина межремонтного периода, что объясняется индивидуальными условиями эксплуатации и недостаточно высоким, в ряде случаев, качеством технического обслуживания и ремонта. В настоящее время проводится широкомасштабная реконструкция МГ САЦ, но даже вывод из работы ряда агрегатов, ввод новых цехов, кардинально не изменит ситуацию (рисунок 1).

Как видно из рисунка 1 порядка 50 % ГПА имеют предельную наработку и соответственно пониженное техническое состояние, что, в конечном счете, приводит к повышению выбросов токсичных компонентов.

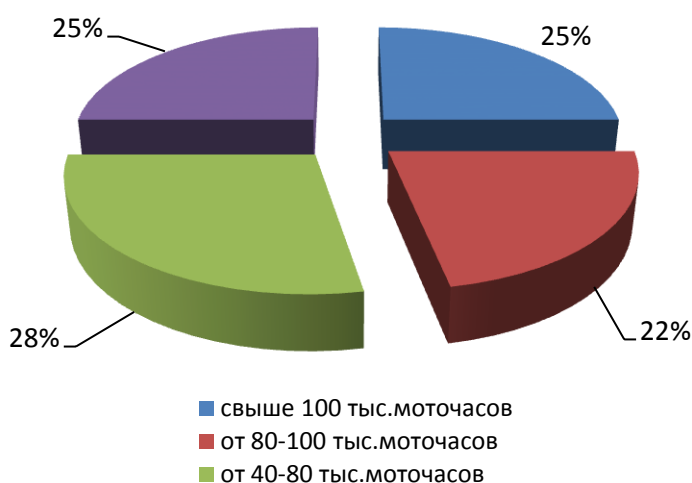


Рисунок 1
Наработка агрегатов после реконструкции ГТС «САЦ»

Значительные наработки агрегатов определяют возрастающую роль технической диагностики ГПА и необходимость создания методики прогноза концентраций оксидов азота и углерода в отходящих газах ГПА по контролируемым параметрам работы агрегатов для решения задач экологической безопасности на компрессорных станциях.

Основными причинами снижения технико-экономического состояния ГПА являются, прежде всего [3, 4, 5]:

- негерметичность воздушного тракта пластинчатых регенераторов, обуславливает снижение мощности и КПД ГТУ и повышение неравномерности температурного поля перед ТВД. Утечки воздуха из секций регенераторов порядка 1-2 % соответствуют относительным потерям мощности ГТУ - 4 % и КПД - 2 %;

- увеличение радиальных зазоров в проточных частях осевого компрессора, турбин высокого и низкого давлений и в уплотнениях рабочего колеса ЦБН вследствие эрозии и коррозии с соответствующим снижением мощности и КПД ГТУ и ЦБН. Увеличение среднего радиального зазора ОК

на 1 мм снижает мощность ГТУ на 9 %, КПД на 5%; такое же изменение для ТВД – соответственно на 5 и 2,5 %; ТНД – соответственно на 1 и 0,8 %;

- перетечки продуктов сгорания через зазоры между «зубом» направляющих лопаток ТВД и обоймой вследствие конструктивной недоработки уплотнения, обуславливают снижение мощности ГТУ до 1 МВт;

- вредный подогрев циклового воздуха на всасе в ВЗК вследствие разрушения теплоизоляции регенераторов, газоходов, выхлопных труб или не герметичности запорной арматуры антиобледенительной системы обуславливает снижение мощности ГПА. Вредный подогрев воздуха на входе ОК может достигать значительных величин – до 10 °С (средняя величина оценивается 2-2,5 °С), что эквивалентно недогрузке ГТУ до 1200 кВт;

- увеличение гидравлического сопротивления входного тракта ГТУ из-за его загрязнения и выхлопного вследствие утечек из регенератора, приводит к снижению мощности и КПД ГТУ (увеличение сопротивления входного тракта на 100 мм вод. ст. приводит к снижению мощности на 3,5 % и КПД на 2 %, для выходного тракта – соответственно 2,5 % и 1,5 %);

На многих ГТУ такое неблагоприятное сочетание конструктивных и эксплуатационных дефектов может приводить к снижению их располагаемой мощности до 50 % [5, 6, 7].

Кроме того, низкое техническое состояние ГПА приводит к увеличению удельных расходов топлива и выбросов вредных веществ в атмосферу.

В 2008-2010 гг. на компрессорных станциях УМГ «Атырау» был осуществлен мониторинг выбросов вредных веществ. Всего в период мониторинга контроль состава отходящих газов был осуществлен на 152 газоперекачивающих агрегатах.

Количество выбрасываемых в атмосферу загрязнителей в значительной степени зависит от типов газоперекачивающих агрегатов.

Всего за период мониторинга превышение нормативных концентраций оксида углерода было отмечено в 32 случаях, превышение концентраций оксидов азота – в 41 случаях. В некоторых случаях на одном и том же агрегате нормативы превышались и по оксиду углерода и по оксидам азота, всего количество агрегатов, на которых отмечено превышение нормативов, составило 55.

Таким образом, в режиме, не соответствующему нормативному, в период с 2008 г. по 2010 г. работало около 36,2% подвергшихся контролю агрегатов.

Максимальные концентрации в отходящих газах оксида углерода характерны для агрегатов ГТК-10-04, минимальные – для ГПА-10-01.

Аналогичная картина наблюдается и для оксидов азота – максимальные концентрации отмечаются в выбросах компрессорных агрегатов типа ГТК-10-4, минимальные – ГПА-10-01.

Результаты расчета параметров газо-воздушной смеси и концентраций загрязняющих веществ, для номинального режима работы агрегатов показывают, что концентрации наиболее массовых и опасных загрязняющих

веществ изменяются в пределах: оксид азота – 100-600 мг/нм³; углерода оксид - 40-400 мг/нм³. Это свидетельствует о достаточно высоких концентрациях загрязняющих веществ в уходящих газах ГТУ.

В настоящее время компрессорные станции МГ САЦ работают ниже проектной мощности, однако в некоторых случаях на границе санитарно-защитных зон наблюдаются превышение нормативных концентраций загрязняющих веществ, обусловленные воздействиями ГПА.

При существующем техническом состоянии при выходе на проектную мощность транспортировки газа и вводе в действие простаивающих ныне агрегатов концентрации загрязняющих веществ в приземном слое на границе санитарно-защитных зон многократно возрастут, что неизбежно повлечет за собой превышение ПДК и как следствие, штрафные санкции природоохранных органов.

В связи с этим нормализация работы ГПА становится одной из основных задач при ремонте и модернизации магистральных газопроводов.

1.2 Образование оксидов азота при сжигании природного газа

Изучение процессов образования топливовоздушной смеси и кинетики химических реакций, происходящих между реагентами, является основой для познания и управления процессом сгорания с целью сокращения времени его протекания, достижения полноты сгорания топлива и снижения образования токсичных компонентов.

Уровень теоретических работ в настоящее время не позволяет полностью использовать имеющиеся в этой области сведения для оптимизации процессов сгорания. В последнее время особенно интенсивно исследуется проблема целостности процесса сгорания посредством анализа отработавших газов. Конечная стадия сгорания условно называемая периодом дожигания представляет собой весьма сложную и менее изученную часть процесса сгорания, Существуют точки зрения, согласно которым, на данной стадии следует искать причины образования токсичных компонентов отработавших газов.

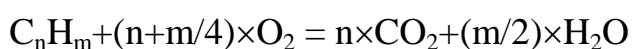
Эффективность процесса сгорания и совершенство камеры сгорания оценивается главным образом на основании того, как сгорает конечная часть топлива. Однако, следует подчеркнуть, что изучение экспериментальном путем сложных явлений, происходящих в стадии дожигания является весьма трудней задачей. Методика эмпирических исследований до настоящего времени полностью не освоена, и поэтому усовершенствование процесса сгорания и создание более эффективных камер сгорания являются актуальными.

До начала 80-х годов прошлого столетия не уделялось должного внимания факту наличия в отработавших газах оксидов азота, и исследовательским работам по изучению причин их образования не придавали практического значения. Наличие в воздухе оксидов азота

является одной из основных причин образования смога в районе крупных городов.

Подробное описание процесса сгорания и влияние на него различных факторов изучены в работах [8, 9]. Рассмотрим причины образования токсичных компонентов. Реакции сгорания углеводородов в камере сгорания двигателя являются весьма сложными. Известно, что реакции сгорания углеводородов относятся к типу цепных реакций с разветвлениями, при которых важное значение имеют цепи, образуемые от основной цепи. Характер протекания реакции зависит от температуры и давления в камере сгорания, от способа образования рабочей смеси и способа ее воспламенения.

Химическая реакция полного сгорания углеводорода может быть выражена стехиометрическим уравнением:



Представленное уравнение было бы верным только в том случае, если бы молекула топлива подверглась одновременному столкновению с $(n+m/4)$ молекулами кислорода. Вероятность такого столкновения настолько мала, что вообще не может приниматься во внимание в соответствии с теорией цепной реакции. В период подготовки топлива некоторые молекулы углеводородов подвергаются распаду и при этом выделяются весьма активные неустойчивые радикалы. Они взаимодействуют с молекулами кислорода, образуют соединения с общей формулой $RCNO$. Когда концентрация этих продуктов реакций достигает критической величины, происходит их взрывной распад и начинается цепь реакций сгорания. Сгорание углеводородов независимо от характера разветвлений реакции всегда заканчивается образованием конечных продуктов CO и CO_2 [8].

Реакция окисления может привести к образованию перекисей, т.е. относительно устойчивых активных промежуточных продуктов окисления, которые подвергаются распаду, образуя формальдегид.

Активные промежуточные продукты окисления периодически подвергаются распаду, выделяя свободные радикалы, дающие начало новой ветви цепей. Данный процесс приобретает лавинообразный характер. На основании указанной схемы последовательность реакции окисления углеводородов можно представить следующим образом: вначале образуется некоторое количество активных радикалов, вступающих в реакцию с кислородом, затем появляются активные перекиси, которые, реагируя с молекулами углеводорода, образуют молекулы перекиси водорода. После образования активного радикала перекиси реакция окисления может развиваться в соответствии со схемой образования перекиси или радикалов формальдегидов. Характер развития зависит от момента появления радикала.

В первом и во втором случае в результате реакции окисления образуется окись углерода и радикал OH . Реакция окисления окиси углерода в двуокись носит цепной характер.

В условиях высокотемпературного горения топлива азот воздуха становится реакционно способным, образуя оксиды NO, NO₂, N₂O и др. В продуктах сгорания в основном имеют место NO_x в виде NO и NO₂. Исходным является оксид азота. Поэтому целесообразно рассмотреть механизм образования NO. Образование его при сжигании топлива возможно в результате окисления молекулярного азота воздуха при высокой температуре и связанного азота топлива входящего в его состав. Образуется NO и из азота воздуха во фронте пламени через промежуточные радикалы при высокой скорости реакции и называется "быстрым" оксидом азота [10]. Таким образом, можно выделить три важнейших механизма образования оксида азота: воздушных или "термических", "быстрых" и топливных, каждый из которых имеет свои характеристики [11, 12].

Химическая кинетика образования оксида азота в процессах горения является предметом интенсивных исследований, но до сих пор наиболее важные аспекты явления остаются невыясненными, так как не достигнуто еще глубокого понимания явлений химической кинетики [13].

Образование "термических" оксидов азота.

Большинство авторов основывает анализ образования NO в пламенах на базе теории Я.Б. Зельдовича [14]:



В механизме Зельдовича реакция (1.2) протекает гораздо медленнее реакции (1.3), поэтому стадией, определяющей скорость процесса, можно считать ряд идущих друг за другом реакций (1.2). Эта реакция характеризуется высоким активационным барьером в основном из-за большой энергии связи молекулы N₂. При таком подходе считалось, что скорость образования NO мала по сравнению со скоростью реакций горения, так что образование NO происходит в зоне догорания, после того как продукты сгорания достигнут своих равновесных значений и процесс горения не оказывает влияния как на образование NO, так и на снижение его концентрации, а концентрация кислорода определяется только равновесием диссоциированного кислорода.

Рассмотрим кинетику образования атомов кислорода при термической диссоциации молекул. Предположим, что эффективность процесса диссоциации и рекомбинации не зависит от природы третьего компонента. Скорость изменения концентрации O при диссоциации запишется в виде

$$\frac{dC_o}{d\tau} = K_{11} \cdot C_{\text{O}_2} \cdot C_M - K_{14} \cdot C_o^2 \cdot C_M$$

где C_o , C_{O_2} , C_M - мольная доля соответствующего компонента;

K_{11} и K_{14} - константы скорости прямой и обратной химической реакции.

В области температур характерных для зоны горения камер $C_O \ll C_{O_2}$, поэтому можно считать, что $C_{O_2} = const$, и $C_M = 1$.

Тогда, обозначая C_O через x получим:

$$\frac{dx}{d\tau} = K_{11} \cdot C_{O_2} - K_{14} \cdot x^2 \quad (1.5)$$

или

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{1}{2 \cdot t} (1 - x^2) \quad (1.6)$$

где

$$t = \frac{1}{4 \cdot K_{14} \sqrt{K_{O_2} \cdot C_{O_2}}} \quad (1.7)$$

и K_{O_2} - константа равновесия реакции диссоциации.

Интегрируя (1.7) при начальных условиях $\tau=1$ и $t=0$ получим:

$$x = \frac{1 - \exp(-\tau/t)}{1 + \exp(-\tau/t)} \quad (1.8)$$

Результаты расчета [15,16] показывают, что достижение химического равновесия атомарного кислорода идет с невысокими скоростями. Например, при температурах более 2000 К для достижения термодинамического равновесия требуется время на порядок больше, чем время пребывания в камере сгорания, поэтому реакцию (1.1) нельзя считать основным источником атомов кислорода, которые являются окислителем NO. Следовательно, существуют другие реакции - поставщики кислорода. Значит, хотя реакции горения топлив непосредственно и не влияют, как это принято считать [15, 17], на окисление азота воздуха, они должны оказывать воздействие на поддержание в реагирующей системе по крайней мере термодинамически равновесных концентраций атомов кислорода. Отметим, что концентрация кислорода, определяемая из условия равновесия реакции диссоциации кислорода в продуктах сгорания не равна равновесной концентрации кислорода в продуктах сгорания, так как атомарный кислород помимо рекомбинации по (1.4) вступает еще в реакции с Н, ОН в других реакциях, поэтому правильнее было бы определять О с учетом реакций горения. Во многих работах [18, 19] для описания механизма образования NO привлекают дополнительно реакцию:



Константа скорости реакции (1.9) при 2000 К примерно равна константе скорости реакции (1.3). Кроме того, концентрация гидроксильных групп имеет более высокую величину по сравнению с концентрацией кислорода О даже в заплаченной зоне. Поэтому реакция (1.9) может играть существенную роль в образовании NO при уменьшении коэффициента избытка воздуха, когда уменьшение концентрации O_2 приводит к замедлению реакции (1.3) [20].

Следовательно, расширенный механизм Зельдовича включает реакции (1.2), (1.3) и (1.9). Современные экспериментальные исследования образования NO в послепламенной зоне лабораторных горелок подтвердили сформулированный выше в общих чертах механизм Зельдовича [21]. Расчеты водородно-воздушных смесей [19] указывают на возможность исключения зоны реакции из рассмотрения образования оксидов азота, расчеты показывают, что вплоть до давления 10 МПа даже при начальной температуре 600 К количество NO, образующейся в зоне реакции пламени крайне незначительно из-за малых времен пребывания [22].

Однако многочисленные исследования показали, что в зоне горения замеренная скорость образования NO существенно выше, чем оцененная по реакциям (1.2), (1.3) и (1.9) отдельно от процесса горения.

Наибольшее рассогласование между измеренной скоростью образования NO и скоростью предсказанной по упрощенной схеме, наблюдается при горении богатых углеводородо-воздушных смесей [22, 23]. При исследованиях образования NO в пламенах бедных и слабо обогащенных смесей водород-кислород-азот [23] установлено, что увеличенная скорость образования NO вблизи зоны горения обусловлена сверхравновесными концентрациями радикалов O и OH. Поэтому, чтобы предсказать скорость образования NO вблизи зоны горения, необходимо совместно рассматривать процесс образования NO и процесс горения.

Наиболее строгим является совместное интегрирование кинетических уравнений образования NO и процесса горения. Существует несколько способов совместного рассмотрения образования NO и процесса горения, причем использование такого подхода требует знания детального механизма реакций, описывающих процесс горения, и применения достаточно сложной вычислительной техники. Число горючих и окислителей, применяемых в практике и важных для теории процессов горения, очень велико. Обычно используют топлива, имеющие сложный многокомпонентный состав. В настоящее время, однако, можно надеяться на построение детальных кинетических механизмов лишь для весьма ограниченного количества топлив H₂, CO, CH₄ и некоторых других [22, 23, 24]. Приближенные модели горения других топлив разрабатываются, однако возможность использования этих моделей для предсказания скорости образования NO сомнительна, так как эти модели часто недостаточно аккуратно оценивают концентрации радикалов в процессе горения [22, 24].

Упрощенный подход к учету влияния неравновесных концентраций радикалов на скорость образования NO был предложен многими исследованиями [22,23]. В этих работах концентрации радикалов оцениваются с использованием приближения парциального равновесия, в котором принимается, что быстрые бимолекулярные реакции





локально равновесны. Концентрации OH и O при этом могут быть отнесены к концентрациям стабильных (молекулярных) компонентов, которые легко измеряются.

В работе [25] указывается, что уточненная схема реакций Зельдовича дает точные скорости образования в обеих зонах пламени, если концентрация OH и O определены с учетом кинетики химических реакций. В работах [25, 26] показано, что в бедных, и умеренно обогащенных топливом смесях ускоренное образование при горении можно учесть, привлекая механизм Зельдовича и условие сверхравновесной концентрации радикалов.

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод, что образование NO в бедных и умеренно обогащенных смесях идет по понятному механизму и предсказуемо. Однако, большинство работ были проведены в условиях одновременного течения, которые отсутствуют даже в простейшей камере сгорания. Кроме того, в ряде работ опыты, проводились в ударной трубе, где температура относительно высока (2900 К) и постоянная, что благоприятствует действию механизма Зельдовича. Следовательно, эти опыты плохо имитируют процессы, проходящие в камере сгорания, где достаточное количество NO наблюдалось даже при низких температурах и больших коэффициентах воздуха, когда, в соответствии с механизмом Зельдовича, образование NO не происходит [27, 28]. Это наблюдение привело к предложению низкотемпературного механизма образования оксидов азота отличного от механизма Зельдовича, с участием других активных компонентов [28].

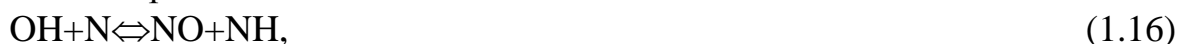
В работе [101] механизм образования представлен так (1.11) и далее:



В работе [104] предполагается, что NO может образовываться в соответствии с реакцией



в работе [102] отмечается, что в присутствии водяных паров образование возможно по реакциям



Авторами работ [28] предложен четырехступенчатый механизм низкотемпературного образования,



Здесь процесс (1.18) поставляет NO. По мнению автора [29] процесс



мог бы дать значительно больше N_2O .

В работе [29] отмечается, что механизм (1.18)...(1.21) вероятно имеет практическое значение только в условиях, соответствующих реактору со смешением.

Такие механизмы как (1.18)...(1.21) и (1.17) могли бы объяснить образование больших концентраций NO_x в бедных смесях, однако до сих пор их применимость не доказана в случае условий, характерных для реальных камер сгорания. Ряд авторов для моделирования кинетики образования оксидов азота использовали некоторые дополнительные реакции.

Наиболее полный анализ уравнений процессов, протекающих в зоне горения и оказывающих влияние на образование NO_x в пламенах дан в работах [29, 30], из которых следует, что условия образования оксидов азота при горении до сих пор не разработаны в достаточной мере и требуют глубокой проработки весьма сложной химической кинетики в сочетании с детальным изучением тепломассообмена и его влияния на химическую кинетику.

На основании приведенного обзора литературы и исследований последних лет можно сделать вывод:

1. Образование "термических" NO в пламенах имеет место не после окончания процесса горения, а начинается непосредственно в зоне горения и зависит от многочисленных процессов протекающих в пламенах. При этом образование NO происходит не только в результате реакций атомарного кислорода с молекулой азота, но и в ряде других.

2. Образование атомарного кислорода в пламенах происходит не только за счет диссоциации O_2 , но и в ряде других реакций, концентрация O в зоне горения на 1-2 порядка выше равновесной, определяемой из условий диссоциации молекулярного кислорода и может составлять в пламенах углеводородов $\sim 0,4...0,8\%$.

3. Зависимость выхода NO от температуры значительно слабее, чем это предполагалось ранее.

4. Максимальная температура в ядре зоны горения существенно ниже расчетной теоретической, вследствие наличия сверхравновесных концентраций промежуточных продуктов реакций горения и теплообменных процессов.

Образование "быстрых" оксидов азота.

Существование "быстрых" оксидов азота впервые было отмечено в [31], опыты Фенимора явились важнейшим достижением, так как было обнаружено, что быстрое образование NO происходит во фронте пламени раньше, чем оно могло бы начаться по реакциям (1.2), (1.3). Было сделано предположение, что при химических реакциях с участием осколков углеводородов и азота из атмосферного воздуха возникают азотосодержащие радикалы, которые затем окисляются с образованием NO_x . Автором [31] была предложена следующая схема



и (1,2), (1.9). Авторы [32] предложили для описания выхода NO_x при горении богатых углеводородо-воздушных смесей расширенный механизм Зельдовича необходимо дополнить реакциями (1.23) и



В работе [31] используются дополнительно уравнения



В работе [33] предложен следующий механизм образования NO_x сначала (1.23), затем



и обратная реакция (1.16).

В работах [27, 33] исследовалась роль реакций (1.23), (1.24) и был сделан вывод, что эти реакции могут явиться причиной ускоренного образования NO так как были обнаружены в зоне пламени значительные концентрации HCN и CN .

В работе [33] было показано, что решающую роль играет радикал CH_2 , а в работе [34] было установлено, что количественный выход NO при горении углеводородов пропорционален CH независимо от коэффициента избытка воздуха.

На основании опытов, приведенных в [35], можно сделать вывод, что все виды углеводородного топлива обнаруживают примерно одинаковые закономерности образования оксида азота от времени и α , у однотипных углеводородов увеличение соотношения C/H в молекулах сопровождается увеличением количества "быстрых" оксидов азота. В работах [34, 35, 36] на основании спектроскопических исследований показано, что концентрация радикалов HCN , CN , CH , C уменьшается с увеличением коэффициента избытка воздуха, а концентрация OH возрастает.

Выход оксидов азота во фронте пламени в сравнимых условиях при горении метана, выше, чем при горении CO и существенно выше, чем при горении водорода (при $\alpha = 1$ для $\text{CH}_4 \approx 60 \text{ млн}^{-1}$ и $\text{H}_2 \approx 5 \text{ млн}^{-1}$) [26].

Эти и другие данные [25] позволяют отметить, что быстрое образование оксидов азота во фронте пламени - явление, органически связанное с горением, и присущее пламенам углеводородов и топлив, содержащих углерод, задача снижения "быстрых" оксидов азота еще не решена.

Образование "топливных" оксидов азота.

Понятие "топливных" оксидов азота распространяется в основном на твердые и жидкие топлива, которые имеют в своем составе соединения азота или при наличии в газовом топливе аммиака. Часть азота топлива во фронте пламени превращается в оксиды азота. Исследования пламени при сжигании однородных смесей показали, что часть азота, превращающаяся в NO, с увеличением содержания азота в топливе и эквивалентного соотношения компонентов уменьшается. Скорость образования "топливных" оксидов азота слабо зависит от температуры.

Поскольку топлива, используемые в настоящей работе либо не содержат топливного азота, либо содержат его в незначительной степени дальнейшим механизмом образования "топливных" NO рассматриваться не будет.

В заключение следует отметить, что точно определить концентрацию оксидов азота невозможно, даже если кинетика химических реакций известна точно, из-за недостаточного знания или учета гидродинамических характеристик.

Главным фактором, определяющим образование термических NO_x является температура в зоне горения. Действительно NO_x экспоненциально возрастает с повышением температуры пламени. Поэтому для уменьшения выхода NO_x в первую очередь необходимо снизить температуру в зоне горения, и прежде всего исключить локальный заброс температуры. Недостаточно достигнуть приемлемого снижения средней температуры в зоне горения камеры, если останутся локальные области высокой температуры. Вторым важным фактором является время пребывания продуктов сгорания в зоне высоких температур.

Снижение одновременно и температуры и времени пребывания достигается увеличением расхода воздуха через фронт камеры или повышением $\alpha_r \gg 1,5$ в первичной зоне. Но в традиционных камерах сгорания с центробежными форсунками или регистровыми горелками это приводит к увеличению выбросов CO, C_nH_m.

Из анализа литературных источников видно, что механизмы и кинетика образования токсичных компонентов в отработавших газах (CO, C_nH_m и NO_x) очень разнообразны. Конечные их концентрации зависят от многих факторов: от параметра состояния, от гидродинамических характеристик процесса горения, от условий теплообмена в зоне горения, от схемы и конструкции горелочных устройств, от условий подготовки смеси и др. Поэтому при проектировании, создании и модернизации камер сгорания ГТУ необходим индивидуальный подход, но вместе с тем необходимо разработать общие принципы создания малотоксичных камер сгорания перспективных газотурбинных установок.

1.3 Анализ теоретических моделей образования токсичных компонентов в камерах сгорания ГТУ

В связи с проблемой борьбы с загрязнением атмосферы токсичными продуктами сгорания органического топлива необходима уже на этапе проектирования, а далее при испытаниях камер сгорания для сравнения экспериментальных и расчетных данных, методика оценки токсичности двигателя, в том числе и по выбросам оксидов азота.

За последние годы предпринималось много попыток создать модель процесса горения в камере сгорания ГТД, позволяющую прогнозировать характеристики выбросов. На сегодня в литературе описано много систем расчета уровня выбросов NO_x из камер сгорания, которые существенно разнятся по сложности, применимости и строгости. Применяемая модель образования загрязняющих веществ должна представлять собой разумный компромисс между погрешностью моделирования, практичностью, удобством применения, экономичностью вычислений и возможностью дальнейшего улучшения.

Материалы [37] показывают, что современные многомерные модели горения только качественно согласуются с измерениями и поэтому их следует использовать как вспомогательное средство в эмпирическом методе проектирования с целью изучения различных физико-химических процессов, происходящих в камерах сгорания газовых турбин. По мере совершенствования моделей физических процессов и строгости численных методов расчета аналитические модели будут играть все более важную роль при проектировании и доводке камер сгорания.

Трудности разработки и использования сложных математических моделей в совокупности с неуверенностью в достоверности получаемых результатов [38,39] стимулируют разработку методов основанных на упрощающих допущениях [40,39]. К наиболее простым моделям расчета уровней выбросов NO_x в стандартных условиях, и прогнозирования выбросов в условиях отличных от расчетных относятся эмпирические зависимости. Хорошие обзоры чисто эмпирических уравнений даны в [40, 27, 41]. В таблице 1.1 представлены некоторые уравнения и параметры входящие в них. Из таблицы 1.1 видно, что представленные уравнения дают различную оценку влияния отдельных параметров на выбросы NO_x .

Так влияние давления на выход NO_x оценивается значением от $P^{0,5}$ до $P^{1,5}$, влияние температуры значительно и неоднозначно оценивается в уравнениях, в некоторые выражения не входит время пребывания τ , неоднозначно влияние соотношения топливо-воздух. Массовый расход воздуха входит не во все уравнения, в некоторых выражениях присутствуют дополнительные параметры. Видно, что взаимосвязь параметров неоднозначна и связь представленных уравнений не проста, но ограниченность параметров и простота уравнений привлекательны для использования их при оценке возможных выбросов NO_x в предварительных расчетах. Следует отметить, что применение этих уравнений ограничено конкретными типами камер сгорания ГТД, при использовании этих уравнений для камер других типов двигателей необходимо вводить поправки

[42]. Эти зависимости не учитывают физических процессов проходящих в камере сгорания, так как входные параметры не отражают ни схемы, ни геометрии камеры сгорания, а также используемый метод сжигания топлива, а ведь именно процессы проходящие в камере сгорания определяют в значительной степени выброс оксидов азота.

Таблица 1.1 Эмпирические уравнения для определения выбросов из камер сгорания ГТД.

Уравнение	Давление	Температура	Расход воздуха	Соотношение топливо-воздух	Другие	Ссылка
$C_{NO} = A \exp\left(\frac{T_6}{300}\right) P_{\kappa}^{0,5} G_6^{-0,22} \left(\frac{1}{\alpha}\right)^{1,4}$	$P_{\kappa}^{0,5}$	$\exp\left(\frac{T_6}{300}\right)$	$G_6^{-0,22}$	$f^{1,4}$		[82]
$C_{NO} = B \exp\left(\frac{T_6}{248}\right) P_{\kappa}^{0,5} G_6^{-1} \left(\frac{1}{\alpha}\right)$	$P_{\kappa}^{0,5}$	$\exp\left(\frac{T_6}{248}\right)$	G_6^{-1}	f		[82]
$C_{NO} = D \exp\left(\frac{T_6}{200}\right) P_{\kappa}^{0,5} \left(\frac{1}{\alpha}\right)$	$P_{\kappa}^{0,5}$	$\exp\left(\frac{T_6}{200}\right)$		f		[84]
$C_{NO} = E \exp\left(\frac{1,14T_6}{300}\right) P_{\kappa}^{1,5} G_6^{-1} T_6^{-0,5} \left(\frac{f}{1+f}\right)$	$P_{\kappa}^{1,5}$	$\exp\left(\frac{1,14T_6}{300}\right) T_6^{-0,5}$	G_6^{-1}	$\left(\frac{f}{1+f}\right)$		[84]
$C_{NO} = k \exp\left(\frac{-38000}{T_s}\right) P_{\kappa}^{1,79} G_6^{-1} T_6^{-1} O_{равн} \left(\frac{f}{f_s}\right)$	$P_{\kappa}^{1,79}$	$\exp\left(\frac{-38000}{T_s}\right) T_6^{-1}$	G_6^{-1}	$\left(\frac{f}{f_s}\right)$	$O_{равн}$	[14]
$C_{NO} = \frac{AV_c \exp\left(\frac{-0,009}{T_s}\right) P_{\kappa}^{1,2}}{G_6 T_s (\Delta P / P)^{0,5}}$	$P_{\kappa}^{1,2}$	$\exp\left(\frac{-0,009}{T_s}\right) T_s^{-1}$	G_6^{-1}		$V_c / (\Delta P / P)^{0,5}$	[22]

Расчеты, проведенные в [43] показали, что использование простых уравнений позволяет описать выход NO_x в традиционных камерах с погрешностью до 30 %, большая строгость едва ли возможна, если не включить в уравнения значительно более строгое рассмотрение рабочего процесса протекающего в камерах сгорания. Кроме того, эмпирические соотношения не позволяют проследить, как меняется эмиссия при изменении конструкции фронтального устройства или самой камеры сгорания.

Большинство более сложных моделей, предложенных для прогнозирования выделений NO_x в камерах сгорания, содержит две части. Первая часть имеет кинетическую схему образования оксидов азота, разработанную из правдоподобного химического механизма их образования в первичной зоне камеры. Вторая часть - это модель течения, которая связывает кинетику образования оксидов азота с газодинамическими и тепловыми процессами, протекающими здесь, структурой турбулентного пламени, влияющими на процесс образования NO_x .

1.3.1 Модели течения в камере сгорания.

Чтобы достаточно строго рассчитывать скорость образования оксидов азота в продуктах сгорания топлива в газотурбинных двигателях, необходимо учитывать основные физические и химические механизмы, действующие в процессе их образования. На эти механизмы основное влияние оказывают температура газа в камере сгорания, концентрация химических компонентов и время пребывания в зоне горения. Кроме того, химическая кинетика процессов образования оксида азота достаточно чувствительна к температуре, - с повышением температуры скорость образования оксида азота возрастает. Указанные параметры в свою очередь зависят от рабочих условий, особенностей поля течения в камере сгорания и т.д.

Наиболее простой физической моделью камеры сгорания является представление ее в виде реактора или группы реакторов полного перемешивания (гомогенных реакторов), которые представляют собой область, где топливо и воздух образуют гомогенную смесь, то есть в любой точке реактора идентичны температура, давление, химический состав. Характеристики камеры сгорания определяются из химической кинетики.

Впервые концепция реактора полного перемешивания была применена для моделирования камер сгорания Лонгвеллом и Вейсом [44] и затем использована при определении эмиссии выхлопных газов ГТД [45].

В работе [46] предложен метод расчета NO_x в явном виде с использованием трех реакторов с полностью перемешанными реагентами. Основным источником оксидов азота является второй реактор, в котором образование NO идет по механизму Зельдовича. Получено уравнение

$$EINO_x = A\tau_{эфф}\sqrt{P_g}\exp(-c\Delta T_g + \frac{D}{T_g}(\varphi - \varphi_a^{\max})^2) \quad (1.32)$$

где

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

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

A, C, D - коэффициенты.

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

$$\frac{1}{T_a} = \frac{1}{T_a^{\max}} \left[1 - \frac{a}{T_a^{\max}} \Delta T_s + \frac{b}{T_s} ((\varphi - \varphi_a^{\max})^2) \right] \quad (1.33)$$

T_a^{\max} - максимальная адиабатная температура;

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

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

В работе [47] предложено уравнение, полученное на основе исследований конструкций камер сгорания регенеративных автомобильных ГТД с диффузионным процессом горения в предположении, что оксиды азота образуются при T_r соответствующей коэффициенту избытка воздуха $\alpha=1,1$, концентрации молекулярных и атомарных веществ соответствуют их равновесным значениям, образование NO идет на основании кинетического механизма Зельдовича:

$$\text{NO} = 3,84 \cdot 10^{14} \exp(-65000/T_2) \sqrt{\frac{P_s}{T_2}} \tau \left(\frac{1,1}{\alpha_\Sigma} \right)^{1,7} \quad (1.34)$$

где

$$\tau = \frac{\rho_s V_{\text{жс}}}{G_s} - \text{время пребывания.}$$

В работе [48] для гомогенных камер сгорания получено уравнение, основанное на следующих допущениях: температура в камере сгорания за время окисления τ постоянна и равна равновесной, концентрации молекулярных и атомарных веществ входящих в кинетические уравнения, соответствуют их равновесным значениям, образование NO идет по механизму, предложенному Зельдовичем. Уравнение имеет вид:

$$C_{\text{NO}} = C_{\text{NO}}^p \frac{[1 - \exp(-2B\tau)]}{[1 + \exp(-2B\tau)]} = C_{\text{NO}}^p \text{th}(B\tau) \quad (1.35)$$

$$B = 10^8 \exp(-37743,6/T) (C_o C_{N_2} / C_{\text{NO}}^p)$$

Время пребывания τ оценивается по формуле

$$\tau = \frac{\rho_s V_{\text{жс}}}{G_{\text{вжс}}}$$

Если дан параметр форсирования

$$\Omega = \frac{G_{\text{вж}}}{V_{\text{жс}} P_{\text{г}}^{1,8} \exp(T_{\text{г}} / 300)} \quad (1.36)$$

то время пребывания запишется в виде

$$\tau = [V_{\text{жс}} P_{\text{г}}^{1,8} \Omega \exp(T_{\text{г}} / 300)]^{-1} \quad (1.37)$$

Одной из первых работ, учитывающих, несовершенство процесса смешения топлива с воздухом и продуктами сгорания является работа [49, 50]. В ней предложена модель процесса горения в камере с учетом одновременного протекания химического реагирования и смешения. Камера моделируется серией реакторов, из которых отдельные с неполным смешением. Но модель, предложенная в [50] излишне сложна и не апробирована в эксперименте.

Реактор с неполным микросмешением [50] представляет собой статистическую модель смешения в первичной зоне, в объеме реактора содержатся отдельные объемы газа, малые по сравнению с реактором, но большие относительно молекулярного масштаба.

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

В работе [51] предложена модель для определения выхода NO_x с учетом параметра смесеобразования. Окончательно уравнение имеет вид

$$\text{NO}_{\Theta} = 37 \cdot 10^{11} \sqrt{O_{2\Theta}} N_{2\Theta} \exp(-127000 / RT_{\Theta}) \sqrt{\frac{P_{\text{г}}}{T_{\Theta}}} \tau, \quad (1.38)$$

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

В ряде работ сделана попытка определить влияние конструкции горелочного устройства на смесеобразование в камере сгорания и выход оксидов азота.

В работе [52] для определения концентрации оксидов азота вводится коэффициент k_f отражающий влияние равномерности раздачи топлива по сечению камеры сгорания и который меняется в зависимости от конструкции и способа подачи топлива от 0,3 до 1,05. Получена опытная зависимость

$$k_f = \psi(f_l) \quad (1.39)$$

где

$$f_l = \frac{\sum_{i=1}^n F_i B_i}{F_{\text{пл}} B_z} \quad (1.40)$$

F_i - площадь охвата струями топливного газа;

B_i - расход газа за данную площадь;
 $F_{пл}$ - площадь фронтного устройства;
 B_2 - общий расход газа.

Концентрация оксидов азота в [53] определяется по уравнению:

$$C_{NO} = [37 \cdot 10^{11} \sqrt{C_{O_2} C_{N_2}} \exp(-65000/T_\phi) \frac{1}{T_\phi}]_{\alpha=1,1} \times \tau_{np} \left(\frac{1,34}{\alpha_l} - 0,34 \right) \left(\frac{1,6P_k - 0,23}{0,6P_k + 0,77} \right) k_f \quad (1.41)$$

где температура T_ϕ определяется при $\alpha_r=1,1$, а влияние давления оценивается экспериментальной зависимостью

$$C_{NO} = \left(\frac{1,6P_k - 0,23}{0,6P_k + 0,77} \right), \quad (1.42)$$

которая хорошо согласуется с $P^{0,5}$ в интервале от 0,1 МПа до 0,6 МПа [27].

Перечисленные выше модели и методики описывающие выбросы оксидов азота обладают рядом недостатков. Основным недостатком, пожалуй, является неучет реальных процессов протекающих в топливосжигающих устройствах, а именно сложность течения в первичной зоне, наличие возвратных течений, неравномерность температур в зоне горения, как по сечению, так и по длине камеры сгорания.

Сложность процессов излучения и конвекции в зоне горения камер сгорания, неравномерность полей температур, скорости и состава газа, как по длине, так и по сечению сильно осложняют определение $T_{эф}$.

Если сюда отнести еще и тот факт, что скорость образования оксидов азота в данной точке зависит от предшествующих процессов, то есть сильно связана с полем течения, то становится ясно, что для определения эффективной температуры газа необходимо иметь достаточно много экспериментальных данных.

В условиях эксплуатации на скорость образования оксидов азота влияют также и технологические параметры, которые изменяются во времени и определяют техническое состояние камеры сгорания, воздушного компрессора и т.д.

1.4 Средства защиты окружающей среды (ОС) действующих газоперекачивающих станций и их экологическая оценка.

Транспортировка газа сопровождается выбросом в атмосферу порядка 20 наименований загрязняющих веществ, в том числе веществами, обладающими эффектом суммации - 4 группы. Около 99,96% объема выбросов составляют оксид углерода, оксид и диоксид азота и метан. Выбросы метана связаны с проведением технологических операций пуска-останова агрегатов и ремонтно-профилактическими работами и относятся к залповым, разовым воздействиям. Разработка технологических мероприятий

по снижению выбросов оксидов азота позволит значительно снизить экологическое воздействие компрессорных станций на атмосферу.

Камера сгорания - один из основных узлов газотурбинной установки (ГТУ), ее назначение - сжигание топлива и получение высоконагретого рабочего тела. Надежность пуска и работы КС, ее экономичность и долговечность определяют аналогичные показания ГТУ.

Из многочисленных требований, предъявляемых к камерам сгорания ГПА, общими для всех камер сгорания являются следующие:

1) Высокий коэффициент полноты сгорания топлива η_r в заданном диапазоне режимов работы и параметров топливовоздушной смеси. В современных камерах сгорания во всем диапазоне рабочих нагрузок обычно полнота сгорания 0,95 - 0,99, а на расчетном режиме 0,98 - 0,99.

2) Малые гидравлические потери полного давления в камере, которые учитывают три вида потерь: на трение; турбулентные (на удар в диффузоре, на смешение потоков, от местных сопротивлений, например во фронтном устройстве, обусловленные местными циркуляционными течениями и т.д.); потери давления в потоке при подводе теплоты. Для современных КС среднее значение потерь полного давления составляет 1-3% .

3) Высокая теплонапряженность рабочего объема, которая обеспечивает малые размеры КС и её материалоемкость. В современных камерах сгорания различных стационарных установок теплонапряженность находится на уровне 200 -600 кДж/(м³ ч Па).

4) Малая или заданная неравномерность поля температуры газа на выходе из КС. Это требование связано с обеспечением долговечности лопаток и других деталей проточной части газовой турбины и определяется коэффициентом неравномерности поля температур газа (в %) $\delta_{cp} = (T^*_{max} - T^*_{min})/T^*_{cp}$, где T^*_{max} и T^*_{min} - соответственно максимальная и минимальная температуры торможения отдельных струек газа в выходном сечении камеры сгорания, T_{cp} -средняя (расчетная) температура газа за камерой.

5) Быстрый надежный пуск и устойчивая работа КС на различных режимах. КС ГТД должна отвечать этим требованиям при пониженных температуре и давлении на обедненной смеси с суммарным коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 30-50$ (вместо обычного значения $\alpha = 6-10$).

6) Большая долговечность конструкции, удобство и безопасность эксплуатации камеры. При длительном сроке службы очень важно, чтобы обслуживание, монтаж и разборка ее элементов были просты и не требовали больших затрат времени.

7) Отсутствие нагара, дымления и токсичных веществ в продуктах сгорания. Нагар нарушает нормальный режим работы деталей камеры и проточной части турбины, регенератора. Дым и токсичные вещества (в том числе и канцерогенные) загрязняют окружающую среду.

Результаты исследований, а также полученный отечественными и зарубежными организациями опыт создания малотоксичных камер сгорания

дают возможность в настоящее время создавать конструкции камер и горелочных устройств, удовлетворяющие современным и перспективным требованиям отечественных стандартов природоохранных органов по предельно допустимым выбросам и концентрациям вредных веществ на рабочих и переменных режимах стационарных ГТУ при сохранении приемлемого уровня остальных характеристик камеры (таблица 1.2).

Большинство камер сгорания ГТУ, установленных в 70-х - 80-х годах, имеют традиционную схему сжигания топлива с одно или много горелочными регистровыми горелками. Для существующего парка ГТУ и ГПА с газотурбинным приводом необходим поиск путей снижения образования токсичных компонентов, прежде всего за счет мало затратных мероприятий (перераспределение потоков воздуха, модернизации фронтных устройств), не затрагивающих конструкции всей камеры сгорания и не требующие перестройки всей ГТУ.

Таблица 1.2 Уровень концентраций NO_x на рабочих режимах и CO на пусковых для камер сгорания различных типов при сжигании природного газа.

Тип камеры сгорания и конструктивные особенности	α_1	t _г °C за КС	NO_x , мг/м ³		CO, мг/м ³		
			Сухая	Впрыск влаги	Исходная	Последовательное включение горелок	Открытые отверстия смесителя
Традиционные камеры сгорания	1,3-1,5	750-900	350-600	100-200	100-300		
Высокофорсированные камеры сгорания с последовательным вводом воздуха в зону горения	1,4-1,8 $\alpha_{\phi}=0,2-0,6$	800-900	200-350	70-150	500-1500		
Многогорелочные фронтные устройства	2,0-2,5	850-1000	150-250	50-100	800-1000	300-500	
Микрофакельные фронтные устройства	(0,4–0,8) $\alpha_{КС}$	1100-1200	60-150	30-60	1100-1300	600-800	
Фронтные устройства с предварительным смешением топлива и воздуха.	$\alpha_{пр}=2,0-2,3$	1100-1200	30-60	10-20	500-700	100-300	200-300
Двухзонные камеры сгорания с гомогенным сжиганием	1,8–2,3	1100-1200	30-60		100-300		

Анализ выбросов токсичных компонентов на камерах сгорания ГТК-10-4 и ГТ-750-6 МГ САЦ показывает, что выбросы оксидов азота меняются в широком диапазоне от 300 до 500 мг/м³, по данным других исследований и ЗАО «ОРМА» выбросы оксидов азота газотурбинных установок ГТК-10-4 могут достигать 700-900 мг/м³ [55, 56].

Сегодня в Казахстане АО «ОРМА» проводит реконструкцию камер сгорания ГТК-10-4, реконструкция позволяет уменьшить неравномерность температурного поля перед турбиной и оптимизировать сопротивление камер сгорания, что приводит к повышению удельной мощности на многих модернизированных агрегатах (По данным предприятия «Севергазпром», прирост мощности после модернизации составил 0,5-1,5 МВт, КПД увеличился в среднем на 2 %), достичь существенного снижения выбросов оксидов азота до 130-150 мг/м³ при исходном уровне 700-900 мг/м³.

Значительного снижения выбросов оксидов азота в модернизированной камере удалось достичь за счет перераспределения потоков воздуха. В новой конструкции добавлены два дополнительных пояса отверстий. Первый – шесть сопел, расположенных по периметру зоны установки завихрителей. Второй – шесть сопел большего диаметра, расположенных на конической части жаровой трубы до смесителя. Часть периферийного завихрителя вторичного воздуха, закрыта специальными накладками. Проведенные изменения направлены на обеднение первичной зоны горения и на повышение качества смесеобразования в первичной зоне.

Модернизированные камеры сгорания устанавливаются при ремонтах и на компрессорных станциях САЦ, в том числе на компрессорных станциях «Макад» и «Кульсары».

Проведение ремонтов по системе «Рекон» с улучшением экологических характеристик камер сгорания позволит значительно снизить выбросы токсичных компонентов для существующих газоперекачивающих агрегатов (таблица 1.3). Ремонт ГТУ ГТК-10-4 по системе «Рекон» начат и в Казахстане.

Таблица 1.3 Результаты реконструкции действующих ГПА с газотурбинным приводом

Тип машины	Мощность МВт	Производитель	Эмиссия NO		Количество реконструированных агрегатов	Владельцы машин
			мг/м ³			
			До модернизации	После модернизации		
ГТК-10-4	10	«Невский завод»	780	150	более 330	«Газпром»

ГТ-750-6	6	“Невский завод”	840	100-150	Более 150	“Трансгаз”, Чехия “Словтрансгаз”, Словакия “Фербунденгаз”, Германия
----------	---	-----------------	-----	---------	-----------	---

Дальнейшее снижение токсичных компонентов в уходящих газах ГТУ можно добиться предварительным смесеобразованием и переходом режима горения в область бедных смесей.

1.5 Анализ схем и конструкций камер сгорания ГТУ с пониженным выходом вредных веществ.

Перед разработчиками современных ГТУ стоит проблема оптимального выбора параметров термодинамического цикла в сочетании с «жесткими» экологическими характеристиками, себестоимостью, высокой надежностью и эксплуатационной технологичностью. Большая роль в решении этих проблем отводится выбору схемы и отработке конструкции камеры сгорания. Задача создания КС значительно осложнена тем, что в настоящее время отсутствуют завершенная теория процесса малоэмиссионного горения и современная техническая база для окончательной доводки камер сгорания. К настоящему времени наметился ряд направлений создания малотоксичных камер сгорания.

1.5.1 Технологические способы снижения NO_x в отработавших газах газотурбинных установок

Подача в зону горения пара или воды. Впрыск в зону горения пара и воды является наиболее простым и широко апробированным способом снижения NO_x . Это следствие снижения максимальной температуры факела. При целенаправленной подаче влаги в зону высоких температур при относительных расходах влаги $G_{\text{вл}}/B_{\text{т}}=0,7, \dots, 1,2$ концентрация NO_x может быть снижена в 3-4 раза. Эффективность этого способа подтверждена промышленными и стендовыми испытаниями камер сгорания различных типов (регистраемые, высокофорсированные, многогорелочные устройства, горелки с предварительным смешением топлива) [57, 58, 59].

Однако впрыск влаги имеет ряд недостатков: потери обессоленной воды, небольшое снижение экономичности ГТУ, возможное увеличение (при впрыске воды) пульсаций давлений, усложняется зимняя эксплуатация, возможна интенсивная коррозия проточной части ГТД, усложняется автоматика [57]. Ввод воды или пара в количестве более 5-6% от массы подаваемого воздуха в горелки может оказать отрицательное влияние на полноту сгорания.

Рециркуляция продуктов сгорания. В общем случае рециркуляция может влиять на образование NO_x двумя основными воздействиями: снижением концентрации кислорода в реагирующей смеси и температурного уровня в реакционном объеме.

За счет «внешней» рециркуляции (возврат отработавших газов после камеры смешения в горелочный воздух) можно достичь снижения NO_x на 30-50% [57].

Оптимальное распределение воздуха. Для существенного снижения уровней выброса NO_x необходимы значительные изменения в конструкции КС, позволяющие эффективно сжигать обедненные ТВС. Максимум образования NO_x находится в диапазоне $\alpha = 1,0-1,1$, т.е. соответствует температуре газа $T_g > 2000$ К. При $T_g = 1600$ К ($\alpha > 1,6$) концентрация NO_x снижается в несколько раз. Обогащение ТВС ($\alpha < 1,0$) также приводит к уменьшению индекса выброса NO_x , но усиливает дымление. Это происходит вследствие снижения температуры газа и уменьшения концентрации кислорода. Обеднение смеси в первичной зоне горения снижает уровни эмиссии NO_x , но при работе на режимах пониженной мощности смесь оказывается чрезмерно обедненной, что приводит к существенному росту уровней выброса CO , CH , а также канцерогенных веществ.

При работе на бедных смесях малая токсичность в обычных камерах сгорания достигается лишь в узком диапазоне режимов. Расширение этого диапазона может быть достигнуто путем предварительного перемешивания топлива с воздухом [58, 59, 60] и применения новых типов стабилизаторов горения [57, 58]. При горении бедной предварительно подготовленной топливовоздушной смеси локальные температуры в зоне пламени соответствуют среднему составу смеси и температура газа будет относительно невысока и, следовательно, будет малой скорость образования NO_x .

Интенсификация смесеобразования в камере сгорания. Интенсификация смесеобразования в полости пламенной трубы сокращает характеристическое время смесеобразования. Кроме того, происходящая при этом гомогенизация смеси способствует также снижению локальных температур (увеличивающих τ_{NO}), а сокращение длины факела – уменьшению времени пребывания газов в зоне относительно высокого их уровня. Все это должно способствовать снижению эмиссии как NO_x , так и других вредных ингредиентов. Однако в разном конструктивном исполнении этот прием обеспечивает разную степень гомогенности первичной зоны и, следовательно, дает различный эффект.

Существенной интенсификации массообменных процессов, сокращению рециркуляционных течений и времени пребывания газов в зоне высоких температур способствует многогорелочное исполнение фронтального устройства камеры сгорания [60, 61].

Ступенчатое сжигание. Ступенчатое сжигание топлива значительно снижает концентрацию NO_x . В первичную зону горения подается воздуха меньше, чем необходимо теоретически ($\alpha_1 = 0,7 \div 0,95$), в результате чего

происходит снижение максимальной температуры в зоне факела, снижение содержания молекулярного и атомарного кислорода в ядре факела, уменьшение скорости реакции образования оксида азота. Заключительный этап процесса горения происходит при избытке кислорода, т.к. температура в этой зоне низка, то окислы азота практически не образуются. Указанный метод удлиняет зону горения и усложняет регулирование.

Каталитическое сжигание. Сжигание под воздействием катализатора [57] приводит к существенному снижению токсичности, но стоимость аппарата значительно возрастет. В этом процессе температура газа постепенно поднималась бы от температуры на входе, до температуры перед турбиной ($t_{г}=1100-1200^{\circ}\text{C}$). Таким образом, можно было бы избежать пика температуры в первичной зоне камеры сгорания. В условиях работы камер сгорания катализаторы должны выдерживать непрерывную и периодическую работу при высоких температурах без ухудшения каталитических и физических свойств. Материал катализатора должен обладать свойством сопротивления истиранию в условиях работы с высокими скоростями газа, быть недорогим и не дефицитным. Должны быть малы потери давления газа, проходящего через катализатор. Активность катализаторов должна быть достаточно высокой, чтобы возможно было каталитическое воспламенение при довольно низких температурах (при сжигании бедных гомогенных смесей).

1.5.2 Конструктивные способы снижения NO_x в отработавших газах газотурбинных установок

Не все технологические решения требуют перестройки камеры сгорания, поэтому в конструктивных решениях выделены тенденции нового направления как в использовании форсунок, фронтных устройств, так и новых схем камер сгорания. Значительные исследования ведутся сейчас по выявлению возможностей использования форсунок, позволяющих осуществить предварительную подготовку топливо-воздушной смеси и качественно улучшить распыливание топлива.

Что касается камер сгорания то, самыми перспективными явились бы камеры каталитические и гомогенные, которые обеспечили бы выход окислов азота ниже 5 млн^{-1} в широком диапазоне режимов двигателя. Создание таких камер для ГТД – сложная инженерная задача. Основная трудность в разработке каталитических камер сгорания объясняется отсутствием дешевого и эффективного катализатора. Трудности в создании гомогенной камеры связаны с предотвращением специфических опасностей при горении однородной смеси паров горючего с воздухом: самовоспламенение смеси в процессе ее подготовки, проскока пламени в зону подготовки, срыва малоустойчивого горения гомогенной смеси.

Камеры сгорания с изменяемой геометрией могут обеспечить низкую токсичность на всех режимах работы камеры сгорания, за счет оптимального

распределения α в зону горения, но требует очень сложной системы регулирования расхода воздуха и топлива [57]. Гибридная камера сгорания [62, 63] объединяет лучшие качества обычной и гомогенной камер и может обеспечить низкий уровень выбросов NO_x , измеренные в [64] при температуре на выходе $1200\text{ }^\circ\text{C}$ окончательные выбросы NO_x не превышали 40 млн^{-1} .

Каталитические камеры сгорания. Применение катализаторов в процессах горения позволяет либо увеличить скорость химических реакций при том же уровне температур, либо сохранить эту скорость на требуемом уровне при существенно сниженном температурном уровне процесса. В первом случае создаются условия для более полного выгорания горючих компонентов и, следовательно, для снижения эмиссии CO и C_xH_y , а во втором – для уменьшения образования окислов азота. Таким образом, применение катализатора создает принципиальную возможность снижения токсичности продуктов сгорания по всем компонентам.

Применяемые катализаторы горения можно разбить на три группы, к первой относится драгоценный металл – платина, которая имеет хорошие каталитические свойства при относительно низких температурах, но отличается высокой стоимостью. Ко второй группе относятся редкоземельные элементы: хром, окись кобальта. Они не так эффективны при низких температурах, но имеют хорошие характеристики при температурах, превышающих 644 K . К третьей группе относится окись цезия, которая имеет хорошие характеристики при высоких температурах (выше 1088 K). Известны также опыты по использованию окиси алюминия, карбида силикона и других композиций.

Испытания показали, что наряду с видом материала большую роль также играет конструктивное исполнение катализатора. Эффективно исполнение катализаторной зоны в виде специальных матриц или решеток. В литературе описаны результаты испытаний нескольких типов решеток с платиновым катализатором в условиях камеры сгорания автомобильного ГТД. Размеры каталитической зоны составляли: диаметр 102 мм при длине $76,2\text{ мм}$, что обеспечивало поверхность катализа порядка 1356480 мм^2 и температуру перед решеткой – 690 K . Выделение NO_x при этом составляло менее $0,5\text{ г/кг}$. Скорость газа на входе в решетку составляла 60 м/с , что обусловило потерю давления $4,2\%$. Испытания показали возможность успешного сжигания в такой камере жидкого топлива, природного газа и низкокалорийных газовых топлив.

В работе [57] представлена ГТУ мощностью 1570 кВт с каталитической камерой сгорания. Непрерывная работа в течение 3700 ч на номинальной нагрузке подтвердила надежность установки и низкий уровень вредных выбросов: Концентрация окислов азота не превышала $2,5\text{ ppm}$, а CO и несгоревшего углерода – 6 ppm (при $15\%\text{ O}_2$). Каталитическая камера сгорания XONON поставлена японской фирмой Kawasaki, где используется двухступенчатый блок катализатора диаметром 381 мм .

На ТЭС Pastoria мощностью 150 МВт в Калифорнии (США) с 2003 года работают две ПГУ с ГТУ 7FA, оснащенные каталитическими камерами сгорания [65]. Выбросы $\text{NO}_x < 2,5$ ppm, $\text{CO} < 6$ ppm при работе ГТУ на природном газе с базисной нагрузкой. Гарантированный срок службы катализатора 8 тыс. ч. Это первое использование каталитического сжигания в ГТУ с начальной температурой газов 1200-1300 °С, степенью повышения давления 15,5 и массовым расходом рабочего тела 432 кг/с.

Гомогенные камеры сгорания. В гомогенной камере смесеобразование осуществляется вне полости пламенной трубы, и в зону горения подается уже готовая гомогенная горючая смесь. Независимо от принятых конструкций испарителя-смесителя и стабилизатора общим для всех этих камер является то, что топливо предварительно перемешивается с воздухом (а не с продуктами сгорания) и в зону горения подается уже готовая горючая смесь.

Это не только исключает из процесса горения характеристические времена $\tau_{\text{исп}}$, $\tau_{\text{см1}}$, но и обуславливает еще одно дополнительное условие для снижения эмиссии NO_x : в пламенной трубе поступающая горючая смесь может быть только разбавлена (вторичным воздухом или продуктами сгорания из противотока), вследствие чего максимальные концентрации топлива в объеме пламенной трубы не могут превышать начальных, которые поддаются регулировке.

Однако в гомогенных камерах значительные трудности представляет обеспечение устойчивости процесса горения на переменных режимах. К недостаткам гомогенных камер следует также отнести опасность проскока пламени в смесительное устройство.

Из вышесказанного ясно, что значительное снижение концентрации оксидов азота может быть достигнуто только путем организации полного или частичного предварительного смешения топлива и воздуха при коэффициенте избытка воздуха гомогенной смеси $\alpha_{\text{пр}} = 1,9-2,2$ [57]. Процесс предварительного смешения топлива с воздухом может быть организован как перед горелочным устройством, так и в специальном объеме двухзонной камеры сгорания. Испытанные в ВТИ варианты таких конструкций камер сгорания показали что горелки с предварительным смешением ($B_{\text{диф}} = 5-7\%$), при переходе с чисто диффузионного сжигания дают снижение концентрации NO_x на режимах с $t_2 = 1100^\circ\text{C}$ в 4-5 раз.

Камеры сгорания с изменяемой геометрией. Камерами сгорания с изменяемой геометрией называют камеры, имеющие регулируемое распределение воздуха на первичный и вторичный. Регулировка может быть ступенчатой (2-3-позиционной) или плавной. В обоих случаях ее целью является поддержание на всех нагрузках ГТУ состава смеси в зоне горения в полосе низкой эмиссии. Необходимость и эффективность подобной регулировки тем значительней, чем выше степень гомогенности горючей смеси.

Как показали ряд исследований [66], наибольшее воздействие на эмиссию токсичных компонентов дает регулировка перекрытием вторичного тракта, т. е. воздуха, поступающего в смеситель при неизменности площади проходного сечения других трактов, так как при этом наряду с изменением α_1 происходит также соответствующее изменение скорости воздушных струй, их дальнобойности и турбулизирующего влияния на процессы смесеобразования и горения.

Таким образом, регулированием геометрии камеры можно значительно улучшить ее характеристики по полноте сгорания, токсичности и дымности выхлопа, а также повысить устойчивость ее работы. Однако это сопровождается существенным усложнением конструкции камеры и системы регулирования ГТУ.

Ступенчатые камеры сгорания. Данный прием предполагает организацию горения в двух последовательно расположенных зонах: первичной и вторичной (в общем случае их может быть и больше). В принципе эту ступенчатость горения можно реализовать как ступенчатым подводом воздуха, так и ступенчатым вводом топлива. В зависимости от этого возможны различные варианты распределения составов смеси по зонам: обогащенная смесь в первичной зоне («богато-бедная» схема камеры); обедненная смесь в первичной зоне («бедно-бедная» схема камеры); распределение топлива между зонами, оптимизированное для определенных режимов работы ГТУ.

В любом варианте для снижения эмиссии NO_x предполагается уход от стехиометрического состава смеси, при этом уменьшается температура факела, увеличивается время при котором наступает равновесие концентрации NO_x и, следовательно, снижается выход оксидов азота.

Большое внимание камерам со ступенчатой организацией горения, где каждая ступень оптимизирована на определенный режим, ранее уделялось авиационными фирмами при разработке камер сгорания перспективных ГТД. В СНТК имени Н.Д. Кузнецова на основе отработки двигателей НК-37 и НК-38СТ созданы камеры сгорания с двухзонной организацией горения. В основной зоне на режимах максимальной мощности сгорает 80-90% расхода топлива при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1,8$ с малым временем пребывания, что обеспечивает малое выделение NO_x при высокой полноте сгорания.

Двигатель НК-36СТ с двухзонной кольцевой камерой сгорания, имеющей карбюраторы неполного смешения (КНС), в декабре 1995 г. прошел межведомственные испытания в составе установки ГПА-Ц-25/76 Тольяттинской компрессорной станции. Камера серийно изготавливается АО «Металлист-Самара».

Для двигателей с низкой и средней степенью сжатия в компрессоре (до $\pi_k < 15$) рассматриваемую схему можно реализовать в двухзонной кольцевой камере сгорания с односторонним расположением карбюраторов

относительно жаровой трубы. Для высоконапряженных двигателей необходимо организовать симметричное расположение карбюраторов.

Результаты проведенных исследований [67,68] показали, что двухзонная схема организации горения с последовательным расположением дежурной и основной зон, карбюраторами полного смешения топлива с воздухом при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=2,0=2,2$ позволяет получить $C_{NO_x} < 50$ мг/м (при нормальных условиях) при конвертировании современных и перспективных авиадвигателей.

Основной проблемой при отработке этой схемы является проблема предотвращения самовоспламенения и проскока пламени в карбюраторы полного смешения при повышении режима более $\pi_k = 18$.

Проведенные исследования различных конструкций горелочных и фронтных устройств с предварительным смешением топлива позволили оптимизировать конструкцию малотоксичной камеры, а также предложить алгоритм нагружения ГТУ для достижения на пусковых и переменных режимах значения потерь с химическим недожогом $q_3 < 2,0\%$, а концентрации NO_x при $t_r=1100-1200$ °С и $P_{кc}=0,12-0,15$ МПа на уровне 10-20 мг/м³ (5-10 ppm).

Согласно проведенным оценкам концентрация NO_x на рабочем режиме ГТУ ($P_{кc}=1,2-1,4$ МПа, $t_r = 1100-1200$ °С, $t^*_в = 350-370$ °С) при сжигании природного газа будет не выше 50 мг/м³ (25 ppm).

Микрофакельное сжигание топлива. Анализ различных принципов сжигания газообразных и жидких топлив показал некоторые особенности микрофакельного сжигания (МФС), который может исключить недостатки факельного горения. Этот принцип уже апробирован и показал хорошие результаты и в камерах сгорания ГТД и обычных горелках. Микрофакельное горение является разновидностью зонного горения.

Можно отметить существенные преимущества камер с микрофакельными устройствами: низкие потери напора газа по трактам камеры, уменьшение габарита (размера) конструкции, пониженная неравномерность температурного поля газов на выходе из камеры [69,70], возможность хорошей работы на обедненной горючей смеси и практически без разделения воздуха на первичный и вторичный [57], низкие показатели выхода токсичных компонентов с продуктами сгорания, пониженная склонность к нагарообразованию, уменьшенные радиационные потери теплоты от факела к жаровой трубе [60], пониженный уровень шума за счет подавления вибрационного горения и другие.

Микрофакельное горение, как особый вид сжигания топлива в камерах сгорания, привлекло внимание исследователей относительно недавно, хотя в области газовых турбин (применительно, к схематическим проработкам проточных частей) оно уже известно с 1953 г. [71]. К настоящему времени наметился ряд направлений, по которым идет разработка и внедрение устройства микрофакельного сжигания топлива. Важным во всех схемах

является «размазывание» факела по фронту и по объему, т.е. равномерное распределение факела по сечению.

2. Анализ взаимосвязей концентраций вредных выбросов с рабочими параметрами газотурбинных установок

2.1 Влияние технологических параметров ГПА на вредные выбросы

Образование оксидов азота и углерода при сжигании газов предопределяется температурой горения и концентрациями молекул азота, углерода и кислорода в зоне горения. При мониторинге вредных выбросов на работающих ГПА указанные характеристики пламени не измеряются, поскольку это можно сделать лишь при стендовых испытаниях камер сгорания в специальных условиях [106, 107]. В связи с этим в промышленных условиях для прогноза объемов вредных выбросов используются некоторые рабочие параметры агрегатов, такие как мощность агрегата [120], температура газов за камерой сгорания [108], перед турбиной высокого давления [120, 103], давление воздуха за компрессором (P_4) и частота вращения компрессора. В системах транспорта газа принята методика прогнозирования вредных выбросов по температуре за турбиной низкого давления (T_2). О возможности использования температур, измеренных в различных точках агрегата (перед камерой сгорания, после компрессоров, между турбинами, после турбин), для прогноза вредных выбросов указывается и в работе [120].

Действительно, все эти параметры связаны с режимом горения газов в камере сгорания. Так с увеличением температуры горения будут увеличиваться и температуры отходящих газов (в различных частях агрегата они естественно окажутся разными), и частоты вращения как осевого компрессора, так и турбин высокого и низкого давления, а, следовательно, увеличится и развиваемая мощность агрегата. Однако не столь однозначны тенденции изменения вредных выбросов при изменении теплотехнических параметров агрегата. Так при увеличении скорости вращения осевого компрессора и давления за ОК произойдет и увеличение избытка воздуха в зоне горения. Таким образом, повышение температуры в зоне горения приводит с одной стороны к увеличению концентрации оксидов азота и углерода в отходящих газах (как это отмечалось в предыдущем параграфе), а с другой стороны, к увеличению избытка воздуха в зоне горения, что обуславливает снижение указанных концентраций. Последнее обстоятельство отмечено в работах [77, 94, 108] и показано на рис. 1.2 настоящей работы.

Какая из этих тенденций возобладает, зависит от особенностей химических реакций, приводящих к регенерации оксидов вплоть до

снижения их концентраций вместо повышения, которое должно было бы произойти при повышении температуры горения.

На рис. 2.1 - 2.4 приведены диаграммы взаимосвязей концентраций оксидов азота с некоторыми рабочими параметрами агрегатов для ГТК-10-4 со штатной камерой сгорания, построенных на основе замеров указанных характеристик, на компрессорной станции «Кульсары».

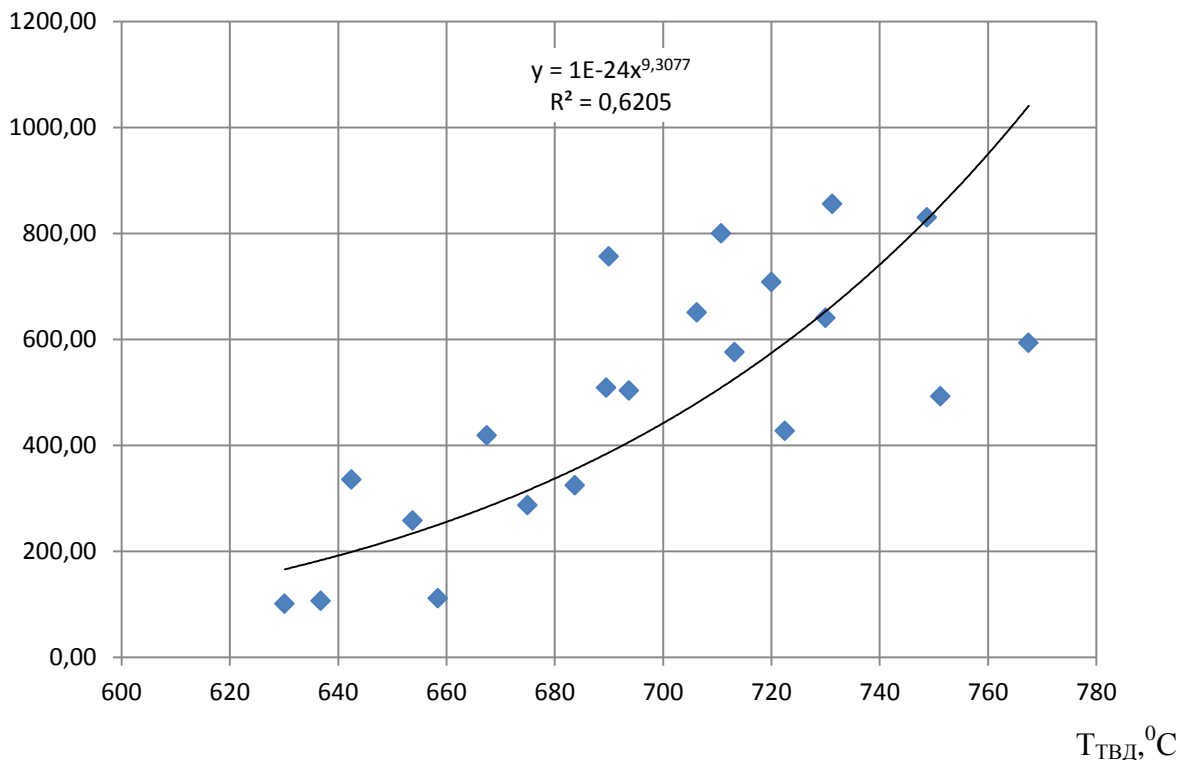


Рисунок 2.1 Связь температуры газов перед ТВД ГТК-10-4 с концентрацией оксидов азота для агрегатов КС «Кульсары» со штатной камерой сгорания

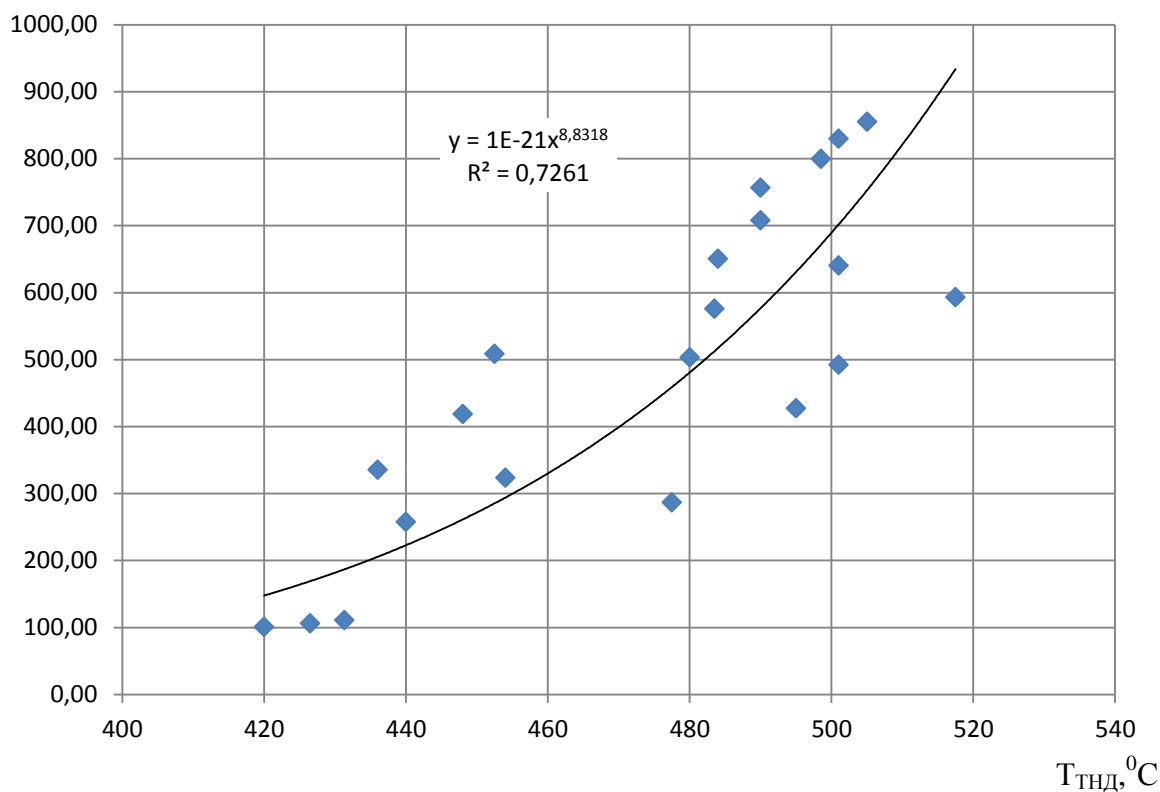


Рисунок 2.2 Связь температуры газов за ТНД ГТК-10-4 с концентрацией оксидов азота для агрегатов КС «Кульсары» со штатной камерой сгорания $C_{\text{NOx}}, \text{mg}/\text{m}^3$

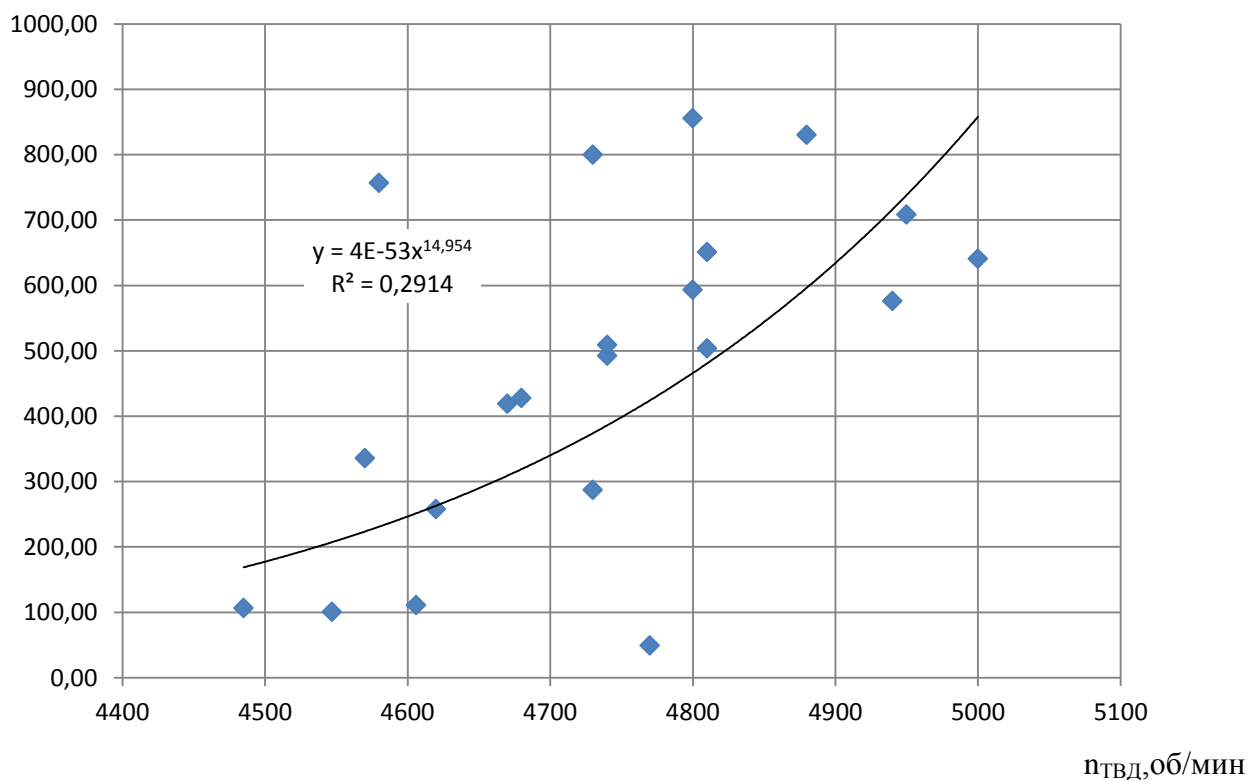


Рисунок 2.3 Связь числа оборотов ротора ТВД ГТК-10-4 с концентрацией оксидов азота для агрегатов КС «Кульсары» со штатной камерой сгорания

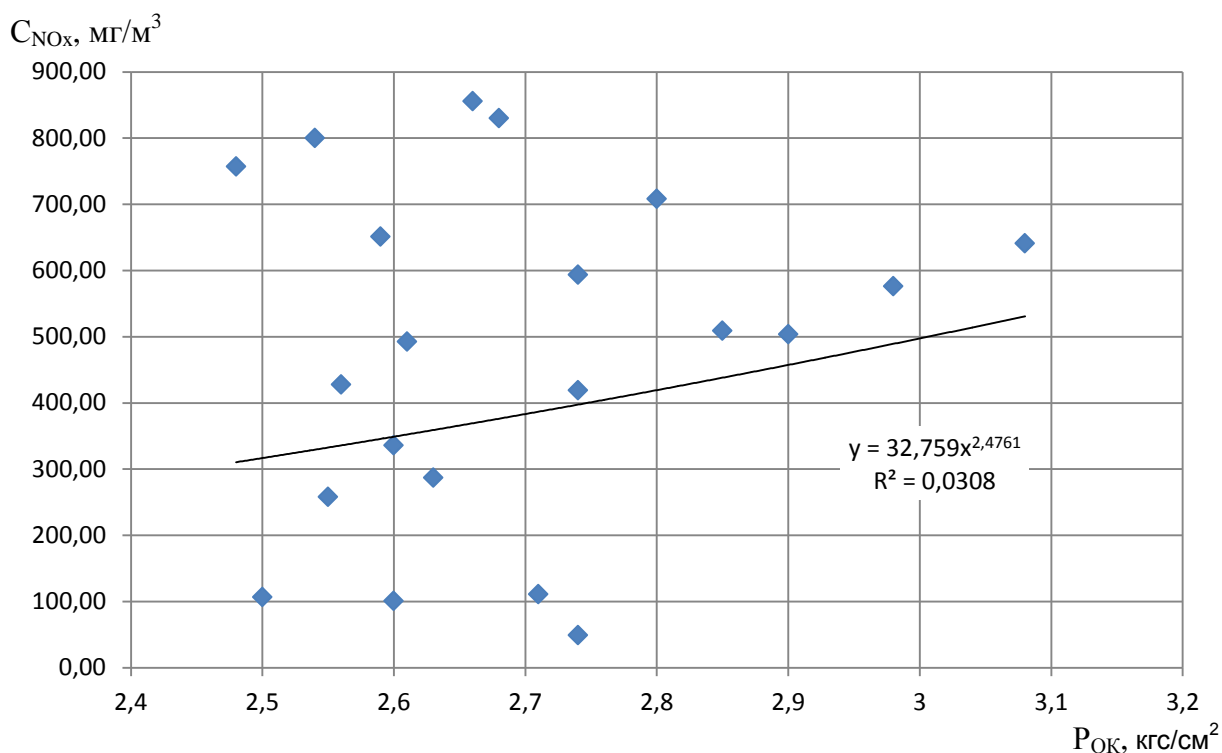


Рисунок 2.4 Связь давления за ОК ГТК-10-4 с концентрацией оксидов азота для агрегатов КС «Кульсары» со штатной камерой сгорания

На рис. 2.5 - 2.8 приведены диаграммы взаимосвязей концентраций оксидов азота с некоторыми рабочими параметрами агрегатов для ГТК-10-4 с модернизированной камерой сгорания, построенных на основе замеров указанных характеристик на компрессорной станции «Кульсары».

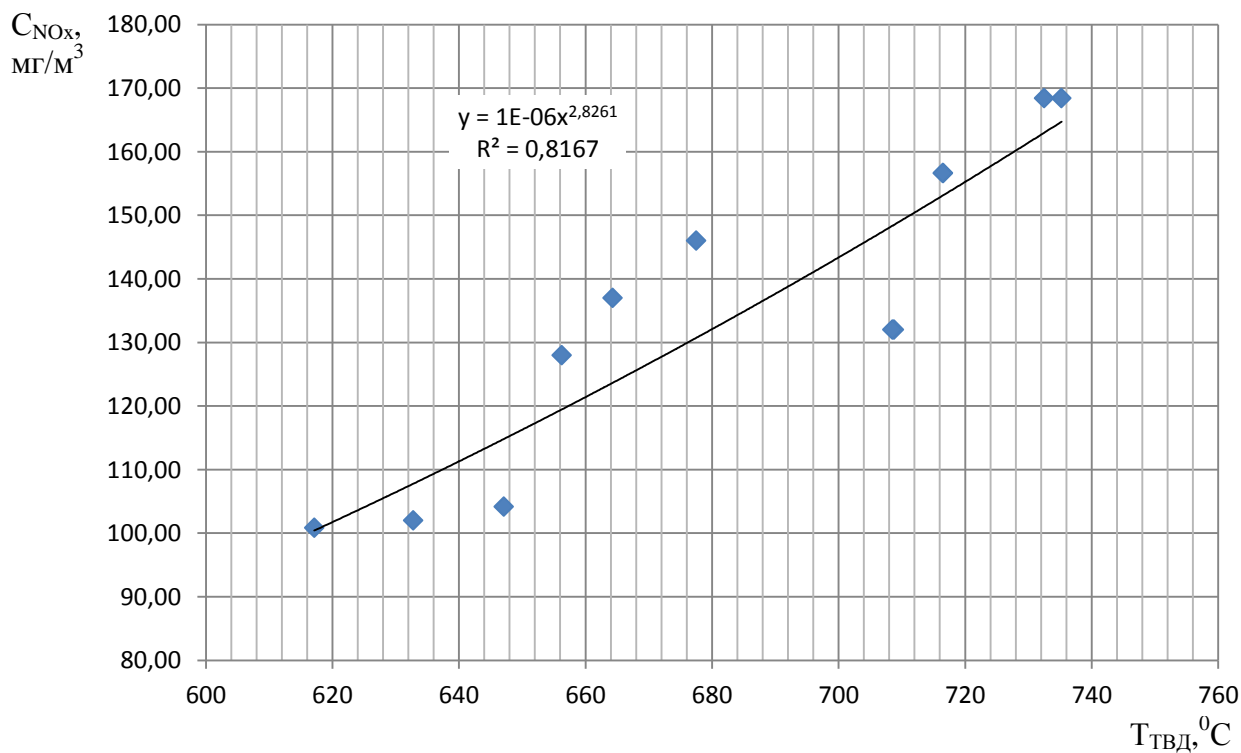


Рисунок 2.5 Связь температуры газов перед ТВД ГТК-10-4 с концентрацией оксидов азота для агрегатов КС «Кульсары» со модифицированной камерой сгорания

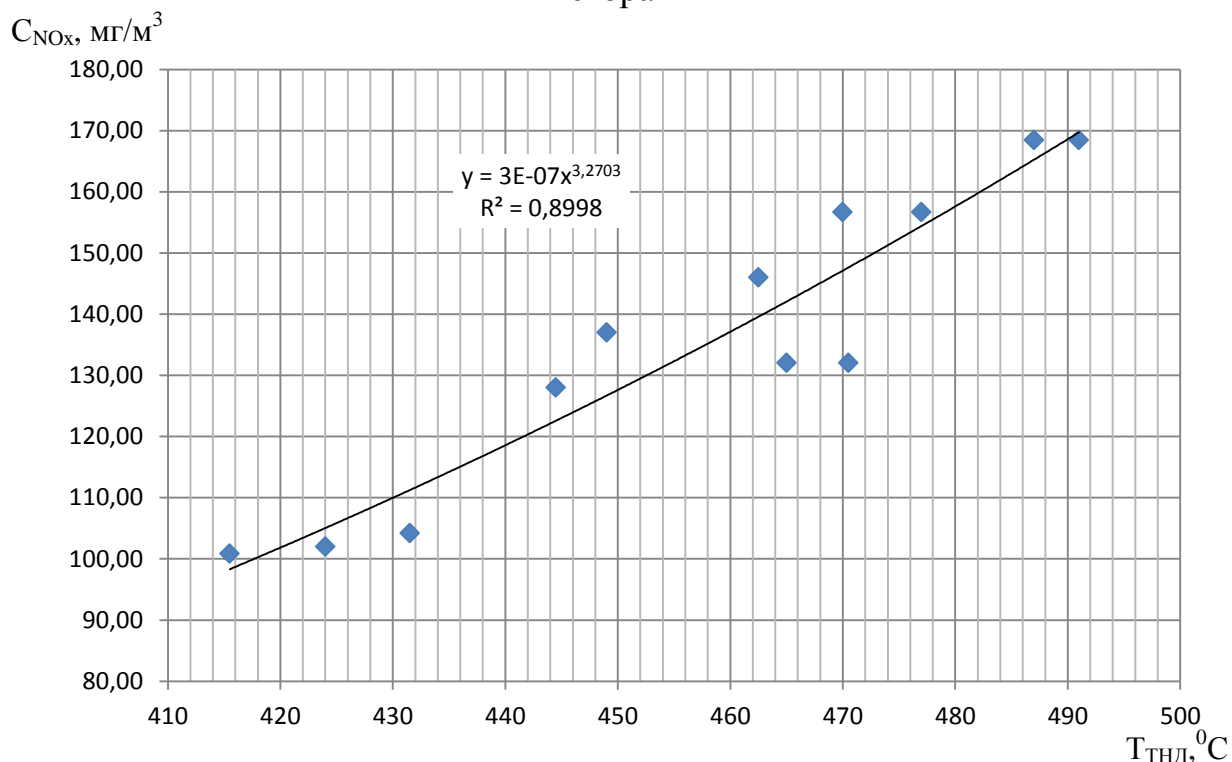


Рисунок 2.6 Связь температуры газов за ТВД ГТК-10-4 с концентрацией оксидов азота для агрегатов КС «Кульсары» со модифицированной камерой сгорания

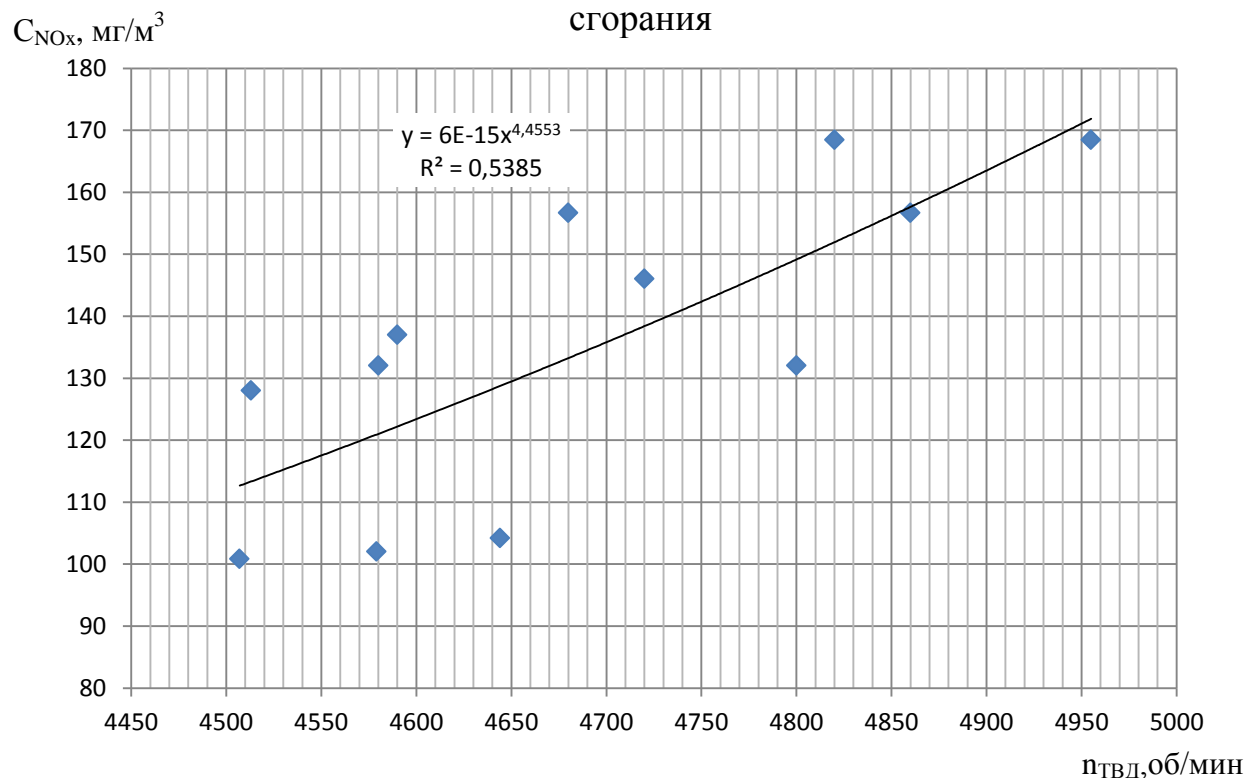


Рисунок 2.7 Связь числа оборотов ротора ТВД ГТК-10-4 с концентрацией оксидов азота для агрегатов КС «Кульсары» с модифицированной камерой сгорания

$C_{NOx}, \text{mg}/\text{m}^3$

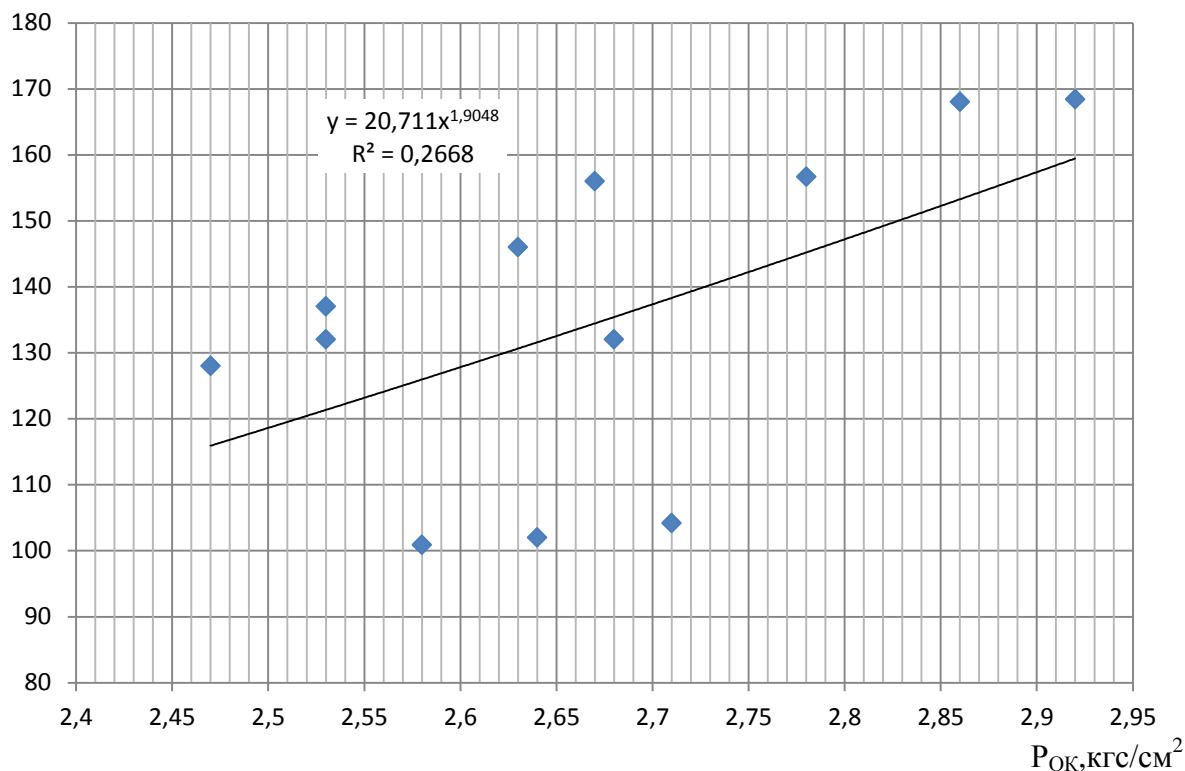


Рисунок 2.8 Связь давления за ОК ГТК-10-4 с концентрацией оксидов азота для агрегатов КС «Кульсары» с модифицированной камерой сгорания

Видно, что с увеличением рассматриваемых параметров агрегата (температура перед ТВД, температура за ТНД, давление за осевым компрессором, частоты вращения турбин высокого и низкого давления) концентрации оксидов азота увеличиваются для обоих типов камер сгорания.

Однако для таких параметров, как давление за осевым компрессором, частоты вращения турбин высокого и низкого давления корреляционная связь слабо выражена.

Представленные на рисунках корреляционные связи по температурам газов хорошо согласуются с общеизвестным фактом сильной зависимости образования оксидов азота от температуры горения. Чем выше температура горения, тем выше температура газов, тем выше выбросы оксидов азота.

Достаточно низкая корреляционная связь по давлению за ОК может быть объяснена недостаточно точной системой измерения этой величины, а также техническим состоянием осевого компрессора.

На рис. 2.9 - 2.12 приведены диаграммы взаимосвязей концентраций оксида углерода с некоторыми рабочими параметрами агрегатов для ГТК-10-4 со штатной камерой сгорания, построенных на основе замеров указанных характеристик на компрессорной станции «Кульсары».

$C_{CO}, \text{мг/м}^3$

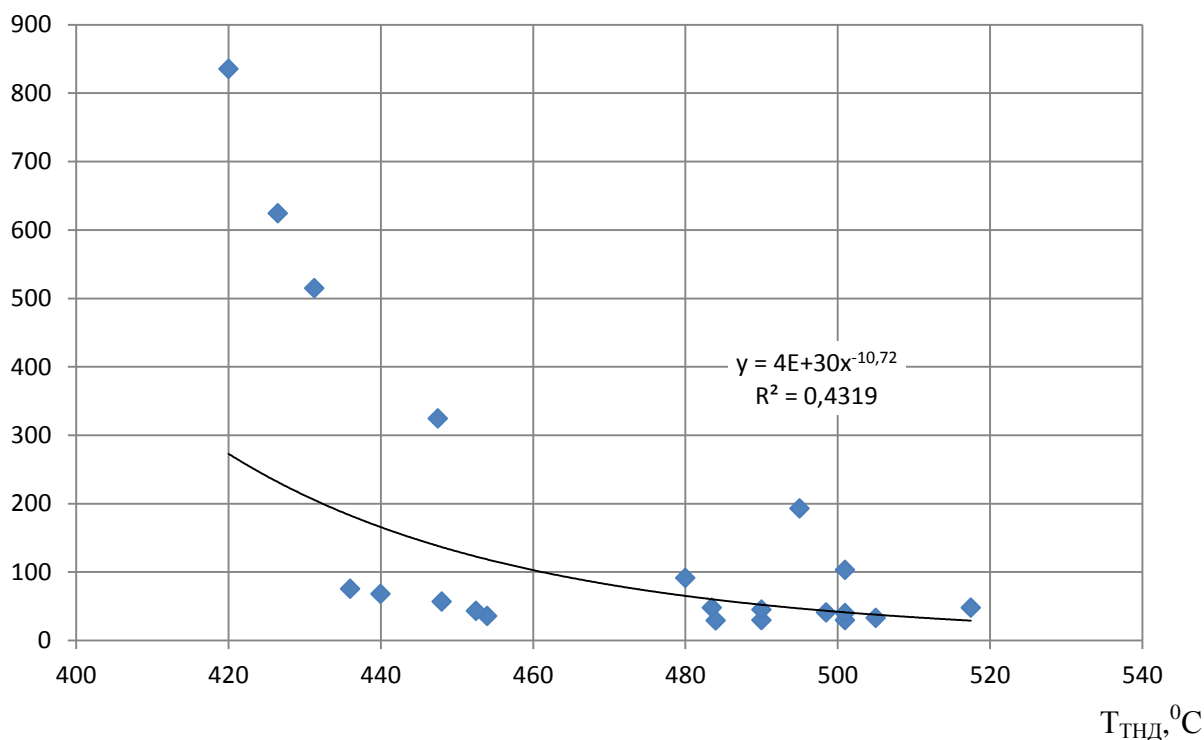


Рисунок 2.9 Связь температуры газов за ТНД ГТК-10-4 с концентрацией оксида углерода для агрегатов КС «Кульсары» со штатной камерой сгорания

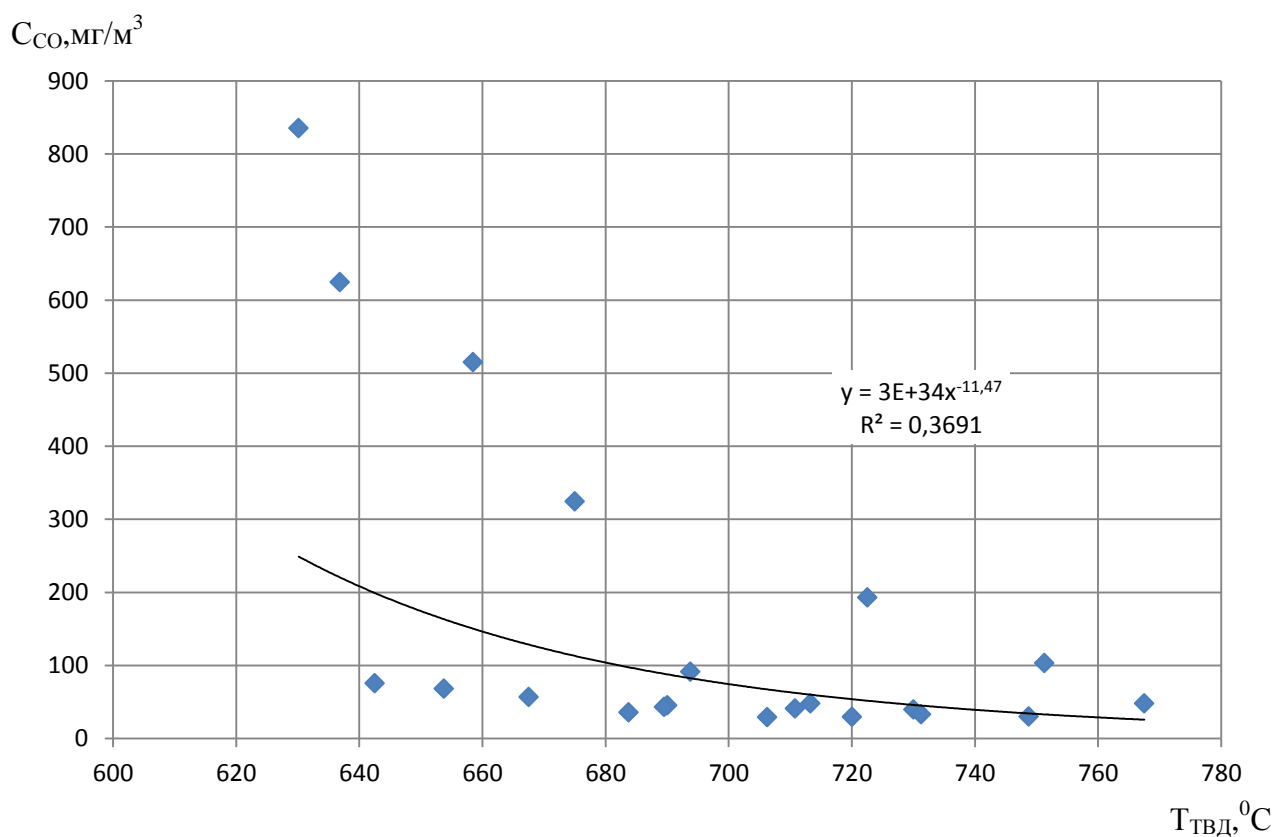


Рисунок 2.10 Связь температуры газов перед ТВД ГТК-10-4 с концентрацией оксида углерода для агрегатов КС «Кульсары» со штатной камерой сгорания

C_{CO}, мг/м³

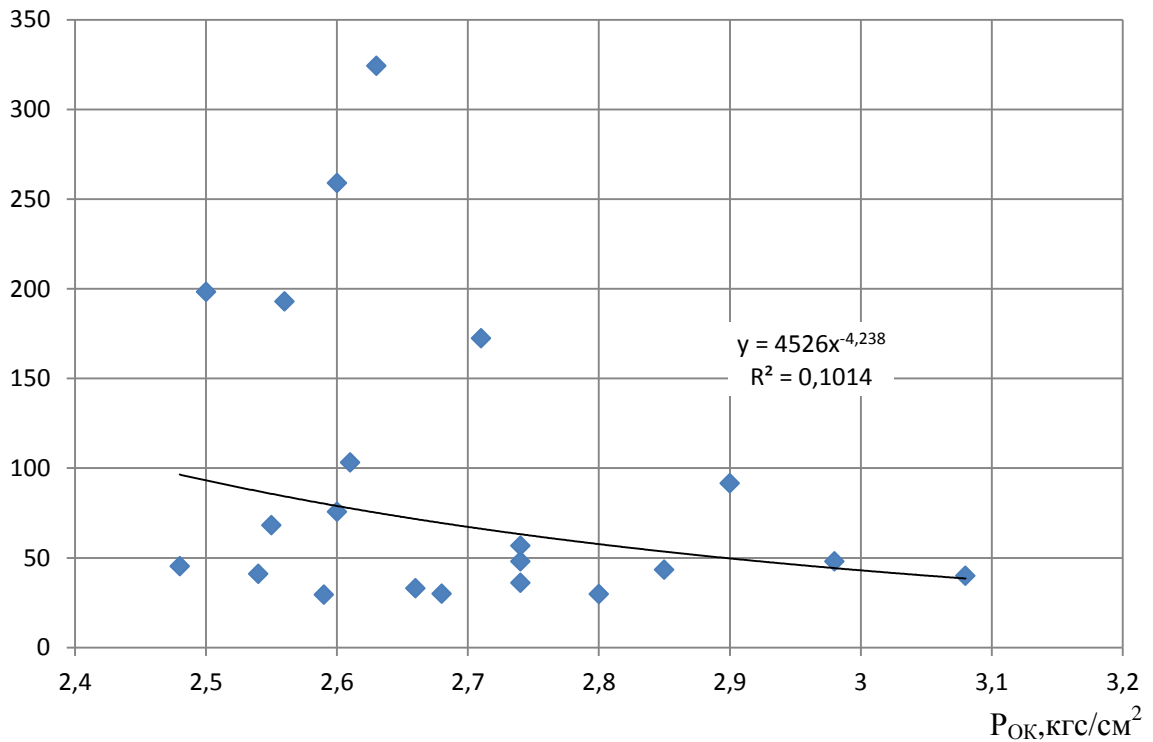


Рисунок 2.11 Связь давления за ОК ГТК-10-4 с концентрацией оксида углерода для агрегатов КС «Кульсары» со штатной камерой сгорания $C_{CO}, \text{mg/m}^3$

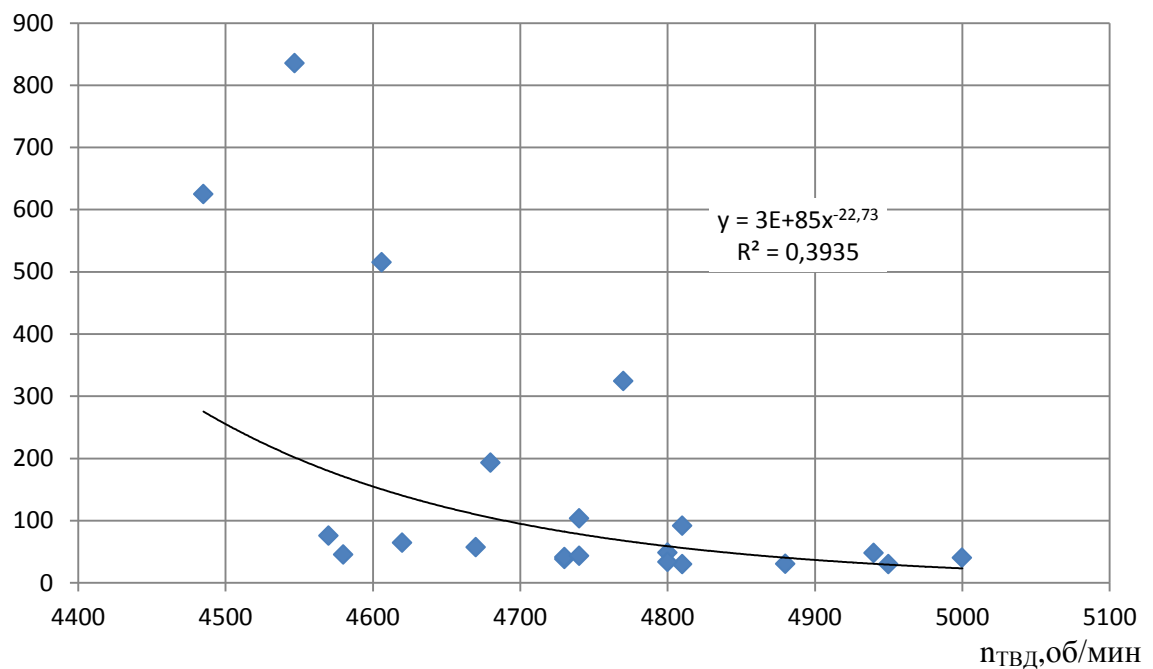


Рисунок 2.12 Связь числа оборотов ротора ТВД ГТК-10-4 с концентрацией оксида углерода для агрегатов КС «Кульсары» со штатной камерой сгорания

На рис. 2.13 - 2.16 приведены диаграммы взаимосвязей концентраций оксида углерода с некоторыми рабочими параметрами агрегатов для ГТК-10-4 с модернизированной камерой сгорания, построенных на основе замеров указанных характеристик на компрессорной станции «Кульсары».

$C_{CO}, \text{mg/m}^3$

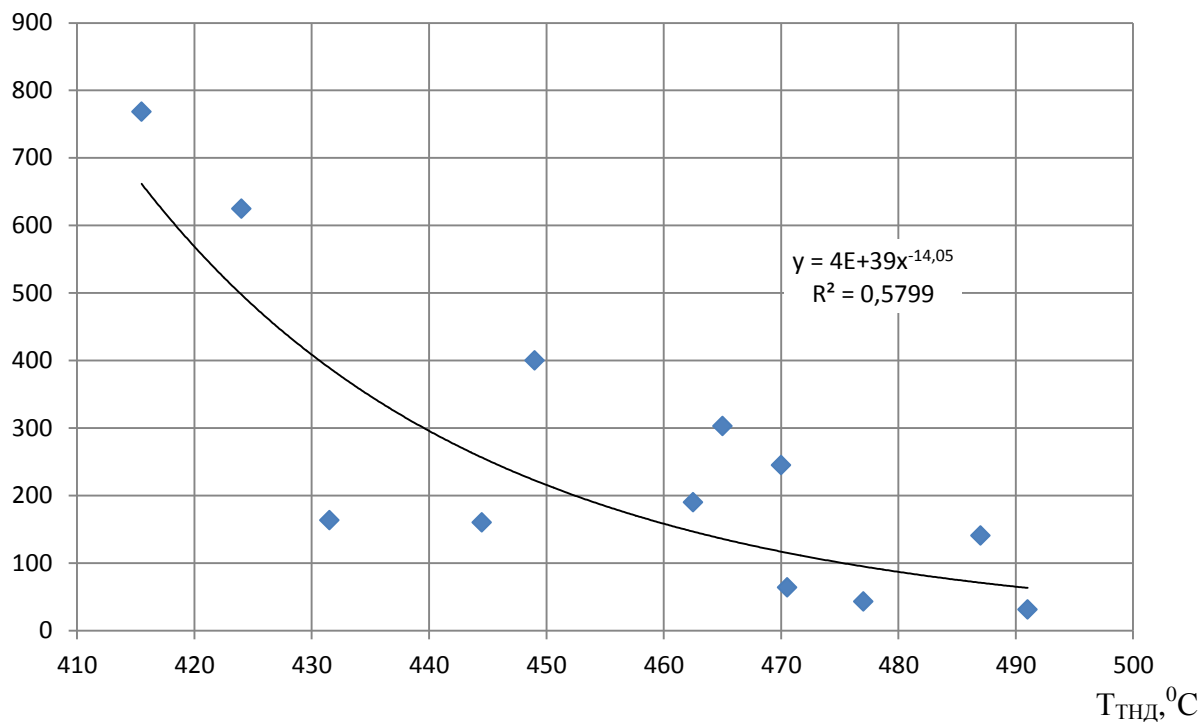


Рисунок 2.13 Связь температуры газов за ТНД ГТК-10-4 с концентрацией оксида углерода для агрегатов КС «Кульсары» с модернизированной камерой сгорания

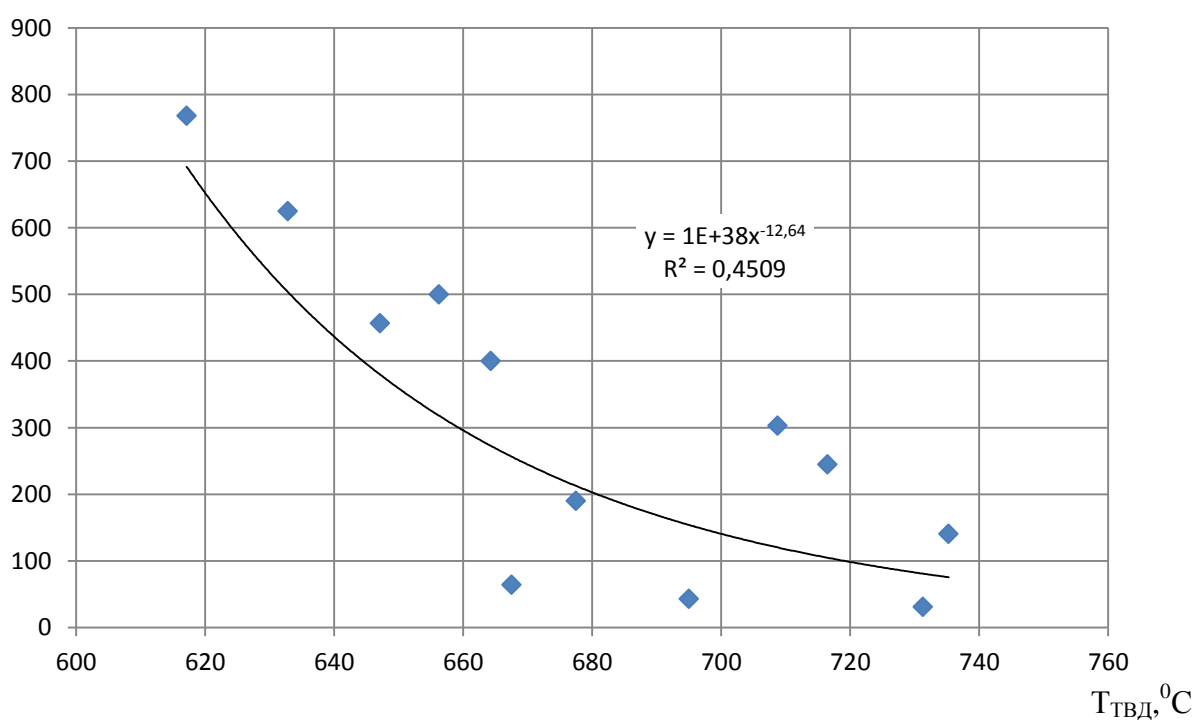


Рисунок 2.14 Связь температуры газов перед ТВД ГТК-10-4 с концентрацией оксида углерода для агрегатов КС «Кульсары» с модернизированной камерой сгорания

$C_{CO}, \text{mg}/\text{m}^3$

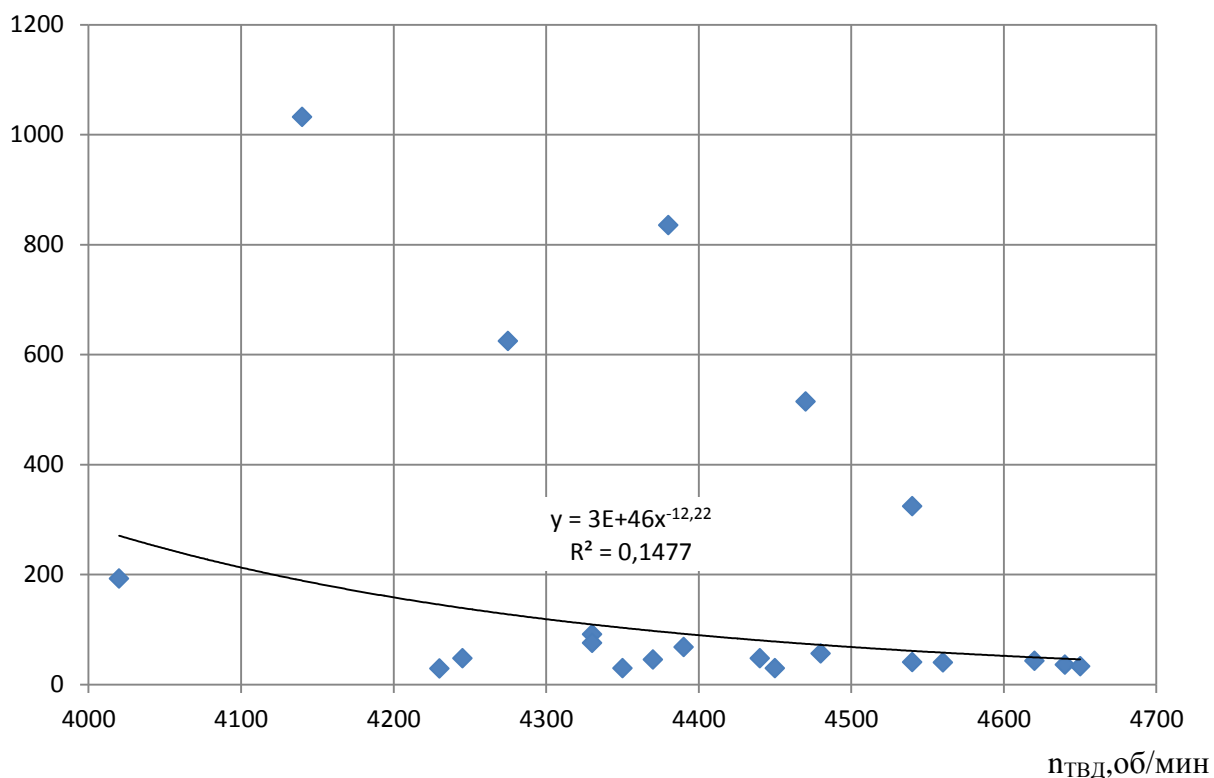


Рисунок 2.15 Связь оборотов ротора ТВД ГТК-10-4 с концентрацией оксида углерода для агрегатов КС «Кульсары» с модернизированной камерой сгорания

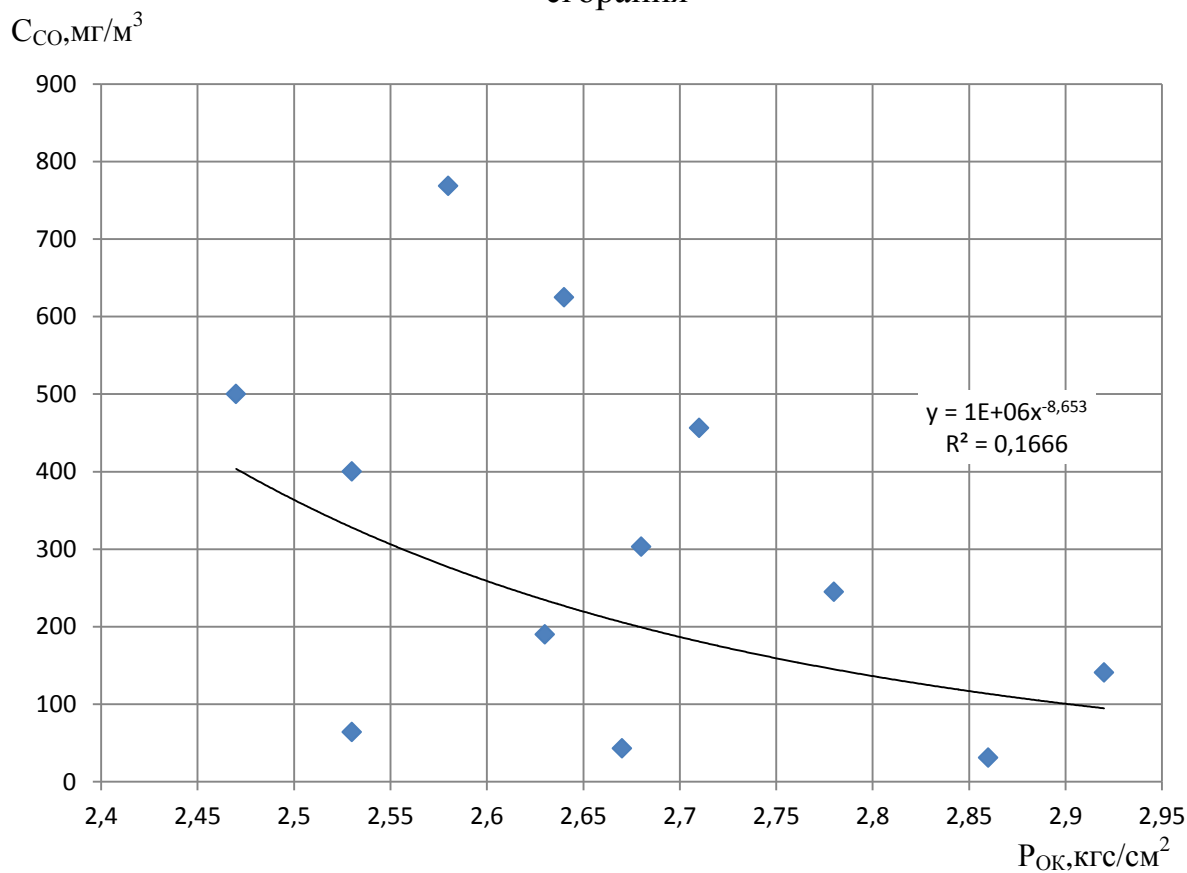


Рисунок 2.15 Связь давления за ОК ГТК-10-4 с концентрацией оксида углерода для агрегатов КС «Кульсары» с модернизированной камерой сгорания

Для концентраций оксида углерода как видно из рисунков, наоборот, при увеличении значений указанных параметров происходит уменьшение его концентрации. Уменьшение концентрации оксида углерода в выхлопных газах при увеличении температуры горения объясняется тем, что с увеличением ее увеличивается и частота вращения осевого компрессора, а значит и возрастает избыток воздуха в зоне горения, который приводит к резкому снижению концентраций оксида углерода вследствие увеличения полноты сгорания топлива.

Немалую роль оказывает увеличение частоты вращения осевого компрессора и на объем формирования оксидов азота. Однако в отличие от оксидов азота уровень корреляции выбросов ни по одному параметру не превышает 0,6. Таким образом, корреляционная зависимость не является простой, необходимо использовать более сложный вид зависимости.

Как отмечалось в главе 1, теоретические исследования Я.Б.Зельдовича показали, что концентрации оксидов азота экспоненциально зависят от температуры горения, т. е. с увеличением температуры происходит очень резкое их увеличение.

Из рисунков хорошо видно, что корреляционные зависимости по оксидам азота хорошо описываются степенной зависимостью (с коэффициентами корреляции близкими к 0,9). В работах [120, 103] также используются степенные зависимости для прогнозирования C_{NOx} по температуре за камерой сгорания, а в работе [108] эта взаимосвязь описывается линейной функцией. Другими словами, темпы роста концентраций оксидов азота в выхлопных газах при увеличении температуры горения тоже (как и концентрации оксида углерода) отличаются от равновесных концентраций за счет влияния на них избытка воздуха, к увеличению которого приводит увеличение давления осевого компрессора, предопределяющееся увеличением частоты его вращения при повышении температуры горения.

Такое сложное, многофакторное влияние рабочих параметров агрегатов на концентрации оксидов азота и углерода осложняется еще и тем, что агрегаты различаются по своему техническому состоянию и по наработке.

В методике [103] приведены номинальные величины теплотехнических параметров для новых чистых машин. С ростом наработки агрегатов величина входных отверстий для воздуха и сжигаемого газа уменьшается, что приводит к изменению температурного поля в зоне горения и к изменению условий образования оксидов азота и углерода. В связи с этим при прогнозировании вредных выбросов необходимо учитывать не только теплотехнические характеристики агрегатов, но и их состояние по наработке.

Таким образом ясно, что рабочие параметры оказывают значительное влияние на формирование вредных выбросов, но ни один из них не является определяющим. В связи с этим, как это видно из представленных данных, зависимости концентраций оксидов азота и углерода от рабочих параметров ГПА носят не функциональный, а статистический характер и должны описываться не одномерными, а более сложными многомерными уравнениями регрессии.

2.2 Ранжирование рабочих параметров газотурбинных газоперекачивающих агрегатов по степени влияния на вредные выбросы

Можно выделить два типа параметров, влияющих на выбросы оксидов азота и углерода. К первому типу относятся внешние параметры: это температура и давление атмосферного воздуха, поступающего в установку. Ко второму типу относятся внутренние параметры работы газотурбинной установки: температуры газов за ТНД и перед ТВД, давление за осевым компрессором, частота вращения турбины высокого давления (ТВД), общее время наработки установки с начала эксплуатации, время работы после капитального ремонта или коэффициент технического состояния ГТУ.

2.2.1 Анализ влияния внешних условий работы газотурбинных установок на выбросы оксидов азота и углерода

Исследование влияния температуры воздуха на мощность выбросов осложняется отсутствием полных данных о температуре воздуха на входе осевого компрессора. Таким образом, зависимость мощности выбросов от температуры атмосферного воздуха, по видимому, может в ряде случаев искажаться, поскольку наличие или отсутствие охлаждения подаваемого воздуха может существенно влиять на выбросы.

Получение точных зависимостей для влияния температуры или атмосферного давления на выбросы оксидов, к сожалению, практически невозможно, ввиду того, что нет возможности выделить достаточное количество данных для узкого диапазона изменения других измеряемых параметров (времени наработки, частоты вращения ТВД, и др.), так, чтобы отменить влияние этих параметров на температурную зависимость или зависимость от атмосферного давления.

Надо сказать, что измерения концентраций оксидов азота и углерода в зимнее и летнее время на ГТК-10-4 показали, что выбросы как оксидов азота, так и оксидов углерода в среднем практически не зависят от температуры воздуха. Тоже относится и к атмосферному давлению.

Таким образом, парные связи внешних условий с концентрациями оксидов азота и углерода являются очень слабыми.

Полученные низкие коэффициенты парной корреляции концентраций NO_x и CO от T_3 и P_3 никак не означают, что внешние условия никак не влияют на вредные выбросы ГТУ. Полученный факт лишь означает, что они (T_3 и P_3) не являются определяющими при формировании состава вредных выбросов на фоне изменяющихся режимов работы.

Из математической статистики известно, что информативность отдельных признаков в регрессионных уравнениях меняется в зависимости от того, какие другие признаки рассматриваются совместно с ним. В частности, индивидуальная информативность какого-либо признака может быть низкой, статистически незначимой, а при рассмотрении его вместе с другими она (информативность) может возрасти и стать статистически значимой. Именно такая ситуация отмечается для связей температуры воздуха и атмосферного давления с концентрациями оксидов азота и углерода.

При рассмотрении T_3 и P_3 совместно с теплотехническими характеристиками ГТУ можно выявить статистически значимое влияние внешних условий на концентрации NO_x и CO .

2.2.2 Анализ влияния рабочих параметров ГТК-10-4 на выбросы оксидов азота и углерода

Как видно из представленных данных наиболее тесная связь концентраций NO_x и CO отмечается для такой характеристики работы ГТК-10-4, как температура газов перед ТВД, давление за осевым компрессором (P_4).

Так для ГТУ с модифицированной камерой сгорания, связь температуры и C_{NO_x} имеет нелинейный вид и характеризуется довольно высоким коэффициентом корреляции. Видно, что среди всех парных связей C_{NO_x} с рабочими параметрами ГТК-10-4 наиболее тесной является связь с температурой перед ТВД, что подтверждается и коэффициентами парной корреляции. Однако, этот параметр измеряется не на всех компрессорных станциях, поэтому в прогнозных моделях можно также использовать температуру газов за ТНД, которая имеет также высокое значение коэффициента парной корреляции.

Следующим (после температуры газов перед ТВД или за ТНД) по индивидуальной информативности при прогнозе концентраций NO_x для ГТК-10-4 является давление за осевым компрессором (P_4).

Четвертое место по индивидуальной информативности при прогнозе концентраций NO_x занимает частота вращения турбины высокого давления ($n_{\text{ТВД}}$), однако уровень парной корреляции для этого параметра достаточно низкий и в дальнейшем он не рассматривается.

При рассмотрении парных связей рабочих параметров ГТК-10-4 с концентрацией оксидов углерода видно, что так же как и для NO_x индивидуально наиболее информативным при прогнозе выбросов CO является температура перед ТВД и давление за осевым компрессором, с той лишь разницей, что связь носит другую направленность и менее очевидна. При анализе всех компрессорных станций теснота связи C_{CO} с P_4 может оказаться еще больше, чем при рассмотрении одной компрессорной станции.

Данные испытаний ГТУ, на базе которых проведен анализ, представленный во второй главе, приведены в Приложении 1.

3. Методика прогнозирования вредных выбросов по технологическим параметрам газотурбинной установки

Одной из задач мониторинга вредных выбросов газотурбинных газоперекачивающих агрегатов является прогноз концентрации оксидов азота (C_{NO_x}) и оксида углерода (C_{CO}) в выхлопных газах при изменяющихся теплотехнических характеристиках на разных режимах работы.

Для целей прогнозирования C_{NO_x} предлагается использовать зависимость C_{NO_x} , мг/м^3 от температуры за камерой сгорания (перед турбиной высокого давления) T_1 К. Данная зависимость в виде степенной функции C_{NO_x} от T_1 . На основе этого базового соотношения строятся экологические характеристики газотурбинных агрегатов - это комплекс зависимостей, связывающих экологические и теплотехнические параметры на переменных режимах работы агрегатов и выраженные как функции мощности и температуры воздуха на входе в турбину. Также известно, что вместо указанной зависимости C_{NO_x} от T_1 в расчетах могут использоваться и другие зависимости, если таковые известны для конкретного агрегата, а концентрация оксида углерода C_{CO} принимается постоянной (номинальной) в реальном диапазоне (загрузка агрегата 60-110%) режимов работы агрегатов.

На практике в качестве экологических характеристик используются линейные зависимости C_{NO_x} и C_{CO} от температуры за турбиной низкого давления (T_2). При этом уравнения данных зависимостей определяются по одноразовым замерам концентраций оксидов азота. Эта методика характеризуется большими погрешностями, которые предопределяются как погрешностями приборов, так и тем обстоятельством, что при прогнозе номинальных значений C_{NO_x} и C_{CO} не учитываются другие важные теплотехнические характеристики режимов работы агрегатов.

3.1 Прогнозирование выбросов оксидов азота для газотурбинных агрегатов ГТК-10-4

Ниже предлагается методика моделирования зависимости концентраций оксидов азота в выхлопных газах ГПА от его теплотехнических характеристик, которая основана на совместном учете как температуры за

перед турбиной высокого давления (T_1), так и давления за осевым компрессором (P_4).

Теоретической предпосылкой этой методики является уравнение

$$[C_{NO}] = 4,6 \sqrt{C_{N_2} C_{O_2} \exp(-21500/(RT))} \quad (3.1)$$

связи равновесного количества NO с концентрациями исходных веществ и температурой горения Я.Б.Зельдовича.

Поскольку штатные замеры на газоперекачивающих агрегатах не предполагают измерений CO_2 , C_{N_2} и T в зоне реакции, то напрямую это уравнение для определения выбросов оксидов азота на компрессорных станциях не может быть использовано. Однако, его можно принять за основу для создания модели, идентификация параметров которой будет возможна по штатным замерам путем проведения некоторых изменений в уравнении (1.1). А именно, вместо температуры горения T можно использовать одну из измеряемых температур T_1 или T_2 , поскольку все температуры T , T_1, T_2 для ГПА тесно связаны.

В настоящей работе предлагается использовать T_1 , которая измеряется чаще других температур. Естественно, в этом случае коэффициент при T_1 не будет равен универсальной газовой постоянной R и его придется идентифицировать на основе эмпирических данных. Вместо концентраций CO_2 , C_{N_2} можно подставить параметр, который связан с количеством воздуха в зоне горения. Это количество определяется расходом воздуха в газоздушном тракте ГТУ. В свою очередь, расход воздуха связан с рядом внешних и внутренних параметров работы ГТУ: температурой и давлением атмосферного воздуха, давлением за осевым компрессором (P_4).

Но определяющим фактором является P_4 . Известно, что зависимость указанного расхода от давления P_4 выражается степенной зависимостью, следовательно, можно предположить, что и взаимосвязь между C_{NOx} и P_4 так же будет носить степенной характер. Изучаемая взаимосвязь является существенно нелинейной и может быть описана степенной функцией вида $C_{NOx} = dP_4^b$.

Таким образом, после указанных изменений уравнение для определения оксидов азота примет вид:

$$C_{NO} = dP_4^b \exp(-c/T_2) \quad (3.2)$$

Параметры b , c , и d в этом уравнении могут быть идентифицированы на основе замеров C_{NOx} , P_4 и T_2 на различных режимах работы ГТУ.

Это уравнение представляет обобщенную модель взаимосвязи C_{NOx} с T_1 и P_4 и может использоваться для оценки концентраций оксидов азота для агрегатов ГТК-10-4 на которых не проводились измерения объемов вредных выбросов. При наличии же таких измерений эта модель может быть

адаптирована к особенностям конкретного агрегата путем уточнения коэффициентов уравнения с использованием данных о концентрациях NOx в выхлопных газах этого ГПА.

Отметим, что уточнять при этом необходимо только коэффициент d . Действительно, в уравнении (3.1) показатель экспоненты $(-21500/(RT))$ один и тот же для любого процесса горения. Так же не изменяется в (3.1) и показатель степени $(1/2)$ у концентраций Co_2 , CN_2 . В связи с этим в уравнении неизменным для всех ГТК-10-4 будут значения коэффициентов b и c .

Как показывает опыт эксплуатации ГТУ, его вредные выбросы будут расти за счет уменьшения проходных сечений камеры сгорания вследствие образования отложений и изменения температурного поля в зоне горения. В связи с этим предлагается параметр d в уравнении считать не константой, а функцией от коэффициента технического состояния ГПА.

В результате статистической обработки экспериментальных данных было получено уравнение коэффициенты которого равны $b = 5,03$, $c = 1100$, а коэффициент d определяется по формуле с учетом коэффициента технического состояния

$$D = 2,5/K_N^{1,7}$$

где K_N – коэффициент технического состояния.

На рисунке 3.1 представлены результаты сравнения фактических выбросов с расчетными значениями.

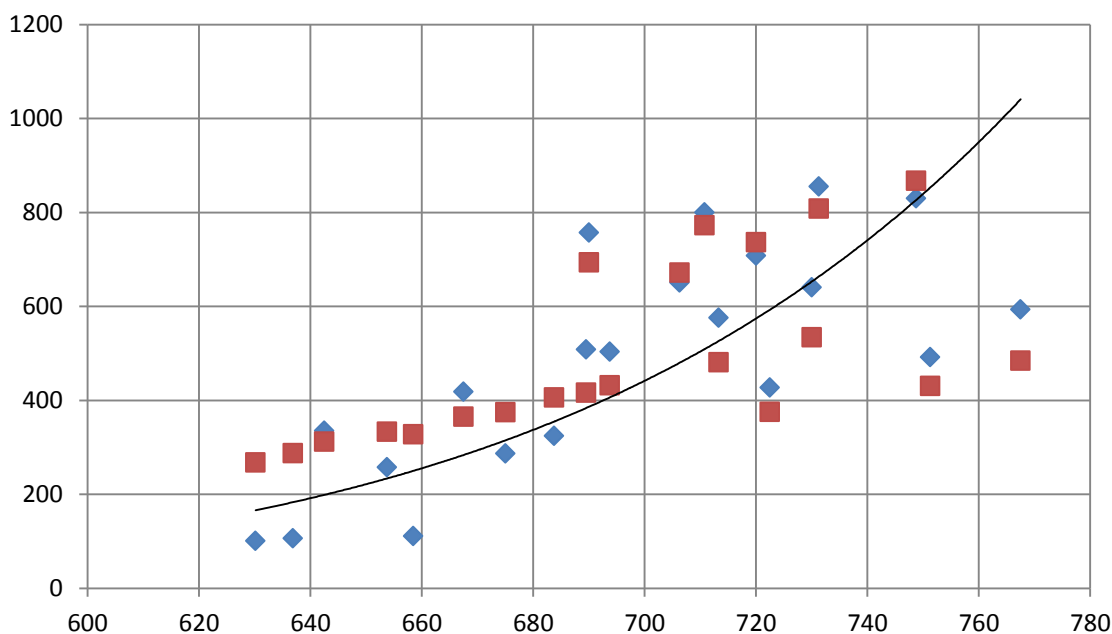


Рисунок 3.1 Сравнение расчетных данных с фактическими выбросами оксидов азота

Как видно из рисунка прогнозные значения имеют достаточно хорошую сходимость с экспериментальными данными.

3.2 Прогнозирование выбросов оксида углерода для агрегатов ГТК-10-4

Известно, что определяющим фактором концентрации оксида углерода является не температура горения, а полнота сгорания топлива. В свою очередь, полнота сгорания зависит от коэффициента избытка воздуха в зоне горения. Коэффициент избытка воздуха может быть оценен с использованием косвенного параметра – давления за осевым компрессором (P_4).

Ниже предлагается методика моделирования зависимости концентраций оксида углерода в выхлопных газах ГПА от давления за осевым компрессором (P_4). Как было показано выше, зависимость содержания оксида углерода в продуктах сгорания от коэффициента избытка воздуха имеет степенной характер. В связи с этим уравнение регрессии C_{CO} от давления за ОК строится в виде:

$$C_{CO} = dP_4^b \quad (3.3)$$

Параметры b и d в этом уравнении могут быть идентифицированы на основе замеров C_{CO} и P_4 на различных режимах работы ГТУ.

Это уравнение представляет обобщенную модель взаимосвязи C_{CO} с P_4 и может быть использоваться для оценки концентраций оксида углерода для агрегатов ГТК-10-4 на которых не проводились измерения объемов вредных выбросов. При наличии же таких измерений эта модель, может быть адаптирована к особенностям конкретного агрегата путем уточнения коэффициентов уравнения с использованием данных о концентрациях CO в выхлопных газах этого ГПА. Уточнять при этом необходимо только коэффициент d .

Опыт эксплуатации ГТУ показывает, что его вредные выбросы будут расти в течение межремонтного периода. Это происходит за счет уменьшения проходных сечений камеры сгорания из-за их закоксовывания и образования в них отложений. В связи с этим соображениями, параметр d предлагается считать не константой, а функцией коэффициента технического состояния. Однако проведенные исследования показывают значительное влияние T_1 на концентрацию CO, поэтому в уравнение целесообразно ввести связь по T_1 . Тогда уравнение для определения CO можно составить по аналогии с уравнением для определения оксидов азота или в зависимости только от температуры перед газовой турбиной.

Заключение

Максимальному воздействию при работе объектов магистрального газопровода в штатном режиме подвергается воздушный бассейн, другие компоненты окружающей среды – почвы, растительность, поверхностные и подземные воды, животный мир – испытывают значительно меньшие воздействия.

Большое количество ГПА имеют техническое состояние, не отвечающее требованиям нормативных документов, да и наработка многих агрегатов близка к предельной наработке.

На многих ГТУ такое неблагоприятное сочетание конструктивных и эксплуатационных дефектов может приводить к снижению их располагаемой мощности до 50 %

В настоящее время компрессорные станции МГ САЦ работают ниже проектной мощности, однако в некоторых случаях на границе санитарно-защитных зон наблюдаются превышение нормативных концентраций загрязняющих веществ, обусловленные воздействиями ГПА.

В работе показано, что технологические параметры газоперекачивающих агрегатов могут использоваться для прогнозирования вредных выбросов компрессорных станций магистральных газопроводов. Режим работы ГПА влияет на величину выбросов оксидов азота и оксида углерода, подбирая оптимальный режим работы можно снизить суммарные выбросы вредных веществ. В качестве основного технологического параметра для определения выбросов оксидов азота использовалась температура газов перед ТВД и давление за осевым компрессором .

Установлено, что при прогнозе концентраций NO_x и CO в отходящих газах ГТК-10-4 наибольшей индивидуальной информативностью обладают такие рабочие параметры, как температура продуктов сгорания за турбиной низкого давления, температура газов перед ТВД, давление за осевым компрессором.

Получено уравнение для прогноза выбросов оксидов азота по технологическим параметрам с учетом коэффициента технического состояния ГПА.

Зная коэффициент технического состояния ГТУ и режимы работы газопровода можно оптимизировать загрузку ГПА, для максимально возможного снижения эмиссии вредных веществ в атмосферу.

Понятно, что для снижения выбросов оксидов азота необходимо уменьшать мощность ГПА, а для снижения выбросов оксида углерода - наоборот, увеличивать. Так как наибольший вред наносят оксиды азота и плата за их выброс существенно больше, чем за выбросы оксида углерода. Поэтому снижение эмиссии оксидов азота является более важной задачей.

Список литературы

1. Манушин Э.А. Газотурбинные двигатели колесных и гусеничных машин М., 1984. - 132 с. (Итоги науки и техники / ВИНТИ Серия Турбостроение; т.3)
2. Котлер В.Р. Газотурбинные установки и проблема вредных выбросов в атмосферу. – Теплоэнергетика, 1999, №10, с. 34-37.
3. Basler B. Power Plant emission reduction potentials achievements and future reduction potentials. Report of Alstom Power, Baden, Switzerland. November 2001.
4. Basler, Marx. Limay Bataan Plant//ASME, Paper GT. 2001. №21.
5. Mukherjee D. Use of unconventional Fuels in Gas Turbines //Power Gen Asia, Sept. 22-24 2000.
6. Jablonski Rita. Preussen Elektra GmbH. Fuel cells in future power supply schemes // VGB Kraftwerkstechnik. 2000. № 4.
7. Разработка и исследование малотоксичных камер сгорания транспортных ГТД /Копылов Б. Е., Лебедев В. П., Пчелкин Ю.М., Фрейман Ю. И. //Промышленная теплотехника.- 1980, 2, N 6, с. 83-90.
8. Канило П.М., Христич В. А. Энергетические и экологические характеристики ГТД при использовании углеводородных топлив и водорода. - Киев: Наукова думка, 1987. - 256 с.
9. Новые программы Министерства энергетики США по газовым турбинам. DOE shifting from design studies to technology oriented programs / Stambler Irwin // Gas Turbine World. - 2002. - 32, № 2. - С. 17-23.
10. Тумановский А.Г., Тульский В.Ф. Влияние впрыска воды на образование окислов азота за камерой сгорания с последовательным вводом воздуха в зону горения // Теплоэнергетика. 1982. № 6. С. 34-36.
11. Совершенствование ГТУ для электростанций/Г.Г.Ольховский, А.Г.Тумановский, А.И.Механиков и др. //Теплоэнергетика. 1991. № 6. С. 66-73.
12. Пфефферме В. К. Каталитическая камера сгорания: подход к проблеме горения без образования загрязняющих веществ// Ракетная техника к космонавтика.- 1979, К 2, с. 195-201.
13. Конструкция каталитической камеры сгорания для газовой турбины высокой мощности /Тачтон, Шема, Селламер//Энергетические машины и установки.- 1983, 105, N 4, с. 64-76.
14. Результаты экспериментального исследования катализаторов для камер сгорания газовых турбин /Декорсо, Мамфорд, Карруба, Хек//Энергетические машины и установки - 1977, т 99, N 2, с. 81-90.
15. Jcheihung P.E., Piaia T.A., Pillsbiery P.W. Fuel scall katalyticburner fon cambustion turbines besbed. – Modern Power Sustem, 1983, 3, №3.
16. Копылов В.Е Дубовой В.Г. Исследование камер сгорания АГТД - В сб.: Транспортные газотурбинные двигатели –М.: МАМИ, 1980, с. 97-93.
17. Фрейман Ю.М. К разработке малотоксичной гомогенной камеры сгорания регенеративного транспортного ГТД - В сб.: Транспортные

- газотурбинные двигатели - М.: МАМИ, 1980, с.121-139,
18. Кныш Ю.А. Методы снижения токсичности выхлопа воздушно-реактивных двигателей: Учебное пособие.- Куйбышев: 1979.- 79 с.
 19. Христин В.А., Тумановский А.Г. Газотурбинные двигатели и защита окружающей среды. - Киев: Техника, 1983.- 144 с.
 20. Перспективы создания высокотемпературных малотоксичных камер сгорания стационарных ГТУ / Тумановский А. Г., Гутник М. Н., Артеменко А. А. // Теплоэнергетика. - 2000. - № 10. - С. 23-26.
 21. Сударев А.В., Маев В.В. Камеры сгорания газотурбинных установок. Интенсификация горения. Л.: Недра, 1990.
 22. Марковский С., Ломан Р., Рейли Р. Вихревая камера сгорания для газовой турбины. - Энергетические машины и установки, 1976, № 1, с.130-137.
 23. Лефевр. Рабочие процессы в камерах сгорания ГТД – М.: Мир, 1986. - 530 с.
 24. A high-temperature catalytic combustor with starting burner / Yoshida Y., Oyakawa K., Aizawa Y., Kaya H. // Trans. ASME. J. Eng. Gas Turbines and Power. - 2001. - 123, № 3. - С. 543-549.
 25. Бухгейм Р. Факторы, влияющие на выбросы из камеры сгорания автомобильных газовых турбин. Энергетические машины и установки, 1979, № I, с.203-212.
 26. Catalytic combustion for F-technology // Gas Turbine World. - 2000. - 30, № 2. - С. 46
 27. Малотоксичные горелочные устройства газотурбинных установок / Тухбатуллин Ф. Г., Кашапов Р. С. (Москва, пл. Тверская застава, 3). - М.: Недра, 1997. - 155 с.
 28. Кисляков В.В. Исследование возможностей снижения содержания окислов азота в газах за камерой сгорания газотурбинного двигателя с "воздушной" форсункой - стабилизатором. Дис. канд. техн. наук. -М. 1980, -137 с.
 29. Field demonstration of a 1.5 MW industrial gas turbine with a low emissions catalytic combustion system / Yee D. Y., Lundberg K., Weakley C. K. // Trans. ASME. J. Eng. Gas Turbines and Power. - 2001. - 123, № 3. - С. 550-556.
 30. Нидцвески Р.В., Джонс Р.Е. Измерение концентрации загрязняющих веществ, выделяемых завихрительной камерой сгорания. - Ракетная техника и космонавтика, 1974, №6, с.134-141.
 31. Кондак М.А., Крыжановский В.Н., Кондак Н.М. Камеры сгорания с перфорированными устройствами для ГТД большой мощности. - Вестник КПИ. Серия теплоэнергетики, 1968, №5, с.3-9.
 32. Копылов В.Е., Дубовой В.Г. Исследование гибридной камеры сгорания неизменяемой геометрии - В сб.: Транспортные газотурбинные двигатели - М.: МАМИ, 1980, с.104-120.
 33. Франк-Каменецкий Д.А., Минский Е.М. Микродиффузионное турбулентное горение - ДАН СССР, 1945, т I, с.353-354.
 34. Кныш Ю.А., Лукачев С.В. О применении вихревых акустических форсунок в авиационных ГТД. - Тр./КуАИ, 1974, вып.67, с.211-213.

35. Уайт Д., Робертс П., Комптон В. Регулируемая камера сгорания автомобильного ГТД с низким уровнем выбросов. - Энергетические машины и установки, 1973, №3, с. 59-68.
36. Сжигание жидкого топлива во встречно-закрученных струях кольцевой камеры сгорания ГТУ / Тумановский А.Г., Сударев А.В., Маев В.А. и др.// Теплоэнергетика. - 1986, N 3, с.37-42.
37. Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. - М.: Машиностроение, 1984 . - 280 с.
38. Христин В.А. Струйно-стабилизаторный способ смесеобразования и горения как один из методов повышения экономичности и снижения токсичности газотурбинных двигателей.- Проблемы машиностроения, 1983, N 20, с. 63-66.
39. Гавриш С.А. Исследование рабочего процесса струйных газогорелочных устройств. Дисс. канд. техн. наук, Киев, КПИ, 1974,136 с.
40. Пчелкин Ю.М. Элементы моделирования камер сгорания промежуточного подогрева газов// Изв. вузов Энергетика. - 1973, N 5, с.92-96.
41. Пчелкин Ю.М., Лебедев В.П., Достяров А.М. Снижение образования окислов азота в камере сгорания при микрофакельном сжигании топлива.// Изв. вузов Машиностроение.- 1982, N 11.
42. Шестаков Н.С. Исследование и разработка метода расчета выгорания тяжелых жидких топлив в камерах сгорания ГТУ. Дисс. канд. техн. наук, ЦКТИ, 1976.
43. Талантов А.Б. Горение в потоке - М.: Машиностроение,1978.- 160 с.
44. Сударев А.Л., Антоновский В.И. Камеры сгорания газотурбинных установок: Теплообмен- Л.: Машиностроение,1985.- 272 с.
45. Испытание кольцевой камеры сгорания авиационного двигателя НК-8 на природном газе/ Тумановский А.Г., Ковалев В.Н., Скуритин В.Г. и др.// Теплоэнергетика.- 1979, N 8, с.60-64.
46. Достяров А.М. Результаты исследования камеры сгорания ГТД с двухъярусной горелкой//Поиск.- Серия естественных наук, 1995, № 5.- С.85-94.
47. Каховский К.В., Мингалеев Ф.М., Нестеров Е.Д. Влияние конструкции стабилизатора на характеристику устойчивости горения жидкого распыленного топлива// Труды КАИ.- 1970, 124, с. 98-110.
48. Джонс Р.Е. Перспективные способы уменьшения выбросов авиационных двигателей // Конструирование и технология машиностроения сер. В.- 1974, N 4 , с. 265-272.
49. Экспериментальное исследование фронтного устройства камеры сгорания ГТЭ-115 с предварительным образованием гомогенной топливо-воздушной смеси / А.Г.Тумановский, К.Ю.Соколов, М.Н. Гутник и др. //Теплоэнергетика. 1993. № 7. С. 42-48.
50. Тумановский А.Г., Гутник М.Н., Соколов К.Ю. Снижение выбросов оксида углерода и углеводородов на пусковых и переменных режимах энергетических ГТУ при сжигании жидких к газообразных топлив // Электрические станции. 1991. № С.2-6.

51. Любчик Г.Н. Струйный метод сжигания газа и его экспериментальное исследование. Дисс. канд. тех. наук- Киев, КПИ, 1965.
52. Любчик Г.Н., Гавриш С.А., Христин В.А. Результаты испытания струйного горелочного устройства// Газовая промышленность.- 1973, N I, с.37-41.
53. Гавриш С.А., Диденко В.И., Любчик Г.Н., Христин В.А. О токсичности выхлопа газотурбинных двигателей// Энергомашиностроение.- 1977, N 12, с. 21-23.
54. Христин В.А. Газовая горелка с широким диапазоном регулирования производительности - В кн.: Теория и практика сжигания газа, 1964, Вып.2, с. 328-341.
55. Тумановский А.Г., Гутник М.Н., Соколов К.Ю. Малотоксичные камеры сгорания для энергетических ГТУ//Теплоэнергетика. 1997. №3. с.48-52.
56. Rig Test of TWO-Zone Combustor of Stationary GT Unit / A.G.Tumanovsky, K.Y.Sokolov, M.N.Gutnik // Paper ASME 93-GT-183. P. 6.
57. Ткачук Ю.Ф., Любчик Г.Н., Христин В.А. Сжигание жидкого и газообразного топлива в струйных топливосжигающих устройствах - В кн.: Теория и практика сжигания газа, 1975, Вып.6, с.5-9.
58. Достяров А.М. Исследование возможностей снижения образования окислов азота в камере сгорания газотурбинного двигателя при микрофакельном сжигании топлива. Дисс.канд.техн.наук- Москва, 1982, 124 с.
59. Христин В.А., Башкатов Ю.Н. Влияние дежурной горелки на устойчивость и полноту горения основного факела - В кн.: Теория и практика сжигания газа 1964, Вып.2, с.510-516.
60. Ваев В.К., Бутовский Л.С., Любчик Г.Н., Христин В.А. Комбинированное газогорелочное устройство и некоторые особенности его рабочего процесса - В кн.: Теория и практика сжигания газа, Вып.4, 1968, с.198-207.
61. Христин В.А.. О путях снижения эмиссии NO_x при сжигании топлив высоким и переменным избытком воздуха - В кн.: Образование окислов азота в процессах горения и пути снижения их выброса в атмосферу - Киев, 1979, с. 7-14.
62. Христин В.А. Любчик Г.Н., Литошенко В.Н., Пиндрус А.З. Применение струйно-стабилизаторных горелок в газотурбинной камере сгорания ГТУ-9 КТЗ// Энергетика и электрификация.- 1968, N 8, с.1-17.
63. Результаты испытаний и доводки на природном газе камер сгорания ГТУ-9 КТЗ/ Христин В.А., Любчик Г.Н., Литошенко В.Н., Пиндрус А.З., Меняйло А.Ф.// Теплоэнергетика. - 1969. N 3, с.52-57.
64. Христин В.А., Литошенко В.Н. Исследование размеров зоны обратных токов за системой уголковых стабилизаторов пламени/ /Вестник КПИ, сер. Теплоэнергетика.- 1968, вып.5, с.10-15.
65. Литошенко В.Н. Экспериментальное исследование рабочего процесса встроенной кольцевой прямоточной газотурбинной камеры сгорания промежуточного подогрева газов, работающей на газообразном

топливе. Дисс. канд. техн. наук - Киев, КПИ, 1969.

66. Христин В.А., Любчик Г. Н., Бутовский Л. С. О расходных характеристиках рециркуляционной зоны за угольным стабилизатором// Вестник КПИ, сер. Теплоэнергетика. - 1971, вып. 8, с. 27-30.

67. Численное моделирование образования токсичных веществ в камерах сгорания ГТД / п . М . Канило, В.И. Колосов, К.В. Костенко и др. - Харьков: ИП-МАШ, 1979.-43 с.

68. Шатиль А . А . Сжигание природного газа в камерах сгорания газотурбинных установок. - Л.:Недра, 1972. - 232 с.

69. Штейнберг А.С. Некоторые закономерности образования токсичных веществ в камерах сгорания автомобильных газотурбинных двигателей // Труды НАМИ. Вып. 152. - М.:НАМИ, 1975. - с. 25-39.

70. Щуркин Е.Н., Ридер К.Ф., Глейзер И.Ш. подавление окислов азота в продуктах сгорания газа// Газовая промышленность. - 1979. - №4. - с.56-57.

71. Щуровский В.А., Сеницын Ю.Н. Экологические характеристики газотурбинных агрегатов на переменных режимах // Газовая промышленность. - 1991. - № 11. - с. 36-38.