

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка критериев запуска камер сгорания ГТД. / Саркисов А.А., Рудаков О.А., Саливон Н.Д., Сигалов Ю.В., Митрофанов В.А. // Вестн. СГАУ. Сер. Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Вып. 2; Самар. гос. аэрокосм. ун-т, Самара, 1999г.-С.177-183.
2. Саркисов А.А., Рудаков О.А., Саливон Н.Д., Сигалов Ю.В., Митрофанов В.А. Теория и расчет образования вредных выбросов в камерах сгорания ГТД.// Промышленная теплотехника, 1999, № 5.
3. Конструкция, теория и расчет камер сгорания газотурбинных двигателей / Рудаков О.А., Саркисов А.А., Саливон Н.Д., Сигалов Ю.В.// Учебное пособие. под ред. д.т.н. проф.Саркисова А.А. СПб: С.-Петербургский гос.техн.ун-т, 1993. –170 с.
4. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей / Волынский М.С., Белый С.А., Беспалов И.В. и др.; Под ред. Раушенбаха Б.В. и др. -М.: Машиностроение, 1964
5. Ахиазарова С.Л., Кафаров В.В. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии -М.: Высшая школа, 1978. –319 с.
6. Длин А.М. Факторный анализ в производстве. -М.: Статистика, 1975. -328 с.

УДК 621.43.056

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ НА КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЯХ РУРГАЗА

Сударев А.В., Виноградов Е.Д., Захаров Ю.И.

Научно-производственное предприятие «ЭСТ», г. С.-Петербург

1. ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ

Улучшение экологических характеристик стало в последние годы одним из основных направлений развития и совершенствования газотурбинных двигателей, наиболее широко использующихся в качестве привода нагнетателей природного газа на магистральных газопроводах. Задача экологической модернизации камер сгорания газовых турбин, находящихся в эксплуатации, принципиально отличается от задачи создания новых малотоксичных ГТУ.

Во-первых, для того, чтобы экологическая модернизация была экономически оправдана, затраты на ее проведение должны быть невелики. Практически это означает, что нельзя вносить изменения в:

- конструкцию прочного корпуса,
- систему подвода и распределения топлива,
- систему автоматического регулирования,
- систему управления и контроля.

Во-вторых, при модернизации не должны ухудшаться эксплуатационные свойства агрегата, т.е. основные характеристики модернизированной камеры сгорания:

- полнота сгорания топлива,
- гидравлическое сопротивление,
- неравномерность температурного поля газов за камерой,
- максимальная температура металла горячих элементов,
- надежность зажигания топливо-воздушной смеси при пуске,
- границы “бедного” и “богатого” срывов факела, должны быть близки к характеристикам штатной камеры сгорания.

В-третьих, при проведении модернизации время простоя агрегата должно быть минимальным, для чего необходимо:

- простота конструкции,
- технологическое обеспечение,
- проведение модернизации непосредственно на месте эксплуатации агрегата.

В настоящем докладе рассматриваются технические решения по экологической модернизации камер сгорания газоперекачивающих агрегатов KWU VR-438 (“Сименс”, 10 МВт), MS-3002 (“Дженерал Электрик”, 10 МВт). Несмотря на существенные различия конструкций камер сгорания этих машин в основу технических решений по их модернизации положен общий метод - метод локального дозированного вдува воздуха в высокотемпературные зоны огневого пространства камеры сгорания, ранее реализованный при реконструкции около 350 ГПА в России (ГТК-10, «Невский завод» 10 МВт), около 140 агрегатов на компрессорных станциях Чехии и Словакии (ГТ-750-6 «Невский завод», 6 МВт) [1,2].

2. МОДЕРНИЗАЦИЯ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ KWU VR-438

Камера сгорания агрегата KWU VR-438, установленная на компрессорной станции «Эмсбюрен» (Рургаз), состоит из двух симметричных относительно оси машины секций, расположенных в отдельных вертикальных корпусах по обе стороны турбоагрегата. Общий вид секции камеры сгорания KWU VR-438 представлен на рис. 1.

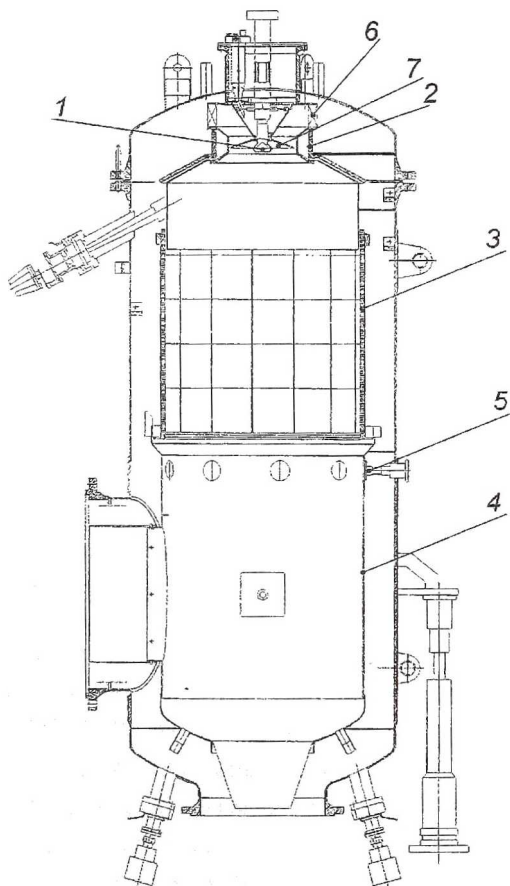


Рис. 1. Общий вид секции камеры сгорания KWU VR-438

Внутри прочного корпуса расположены жаровая труба и горелочное устройство (1). Жаровая труба состоит из трех секций: верхняя секция - фронтное устройство (2), средняя высокотемпературная секция (3) и

нижняя секция - смеситель (4). Внутренняя поверхность средней высокотемпературной секции жаровой трубы облицована керамическими плитками.

Секция смесителя имеет 9 отверстий для подвода воздуха в зону смешения. Три из них снабжены специальными клапанами (5), позволяющими изменять проходное сечение смесителя не разбирая камеру сгорания. Перемещение клапанов производится снаружи с помощью резьбового шпинделя. Воздушные клапаны позволяют производить настройку смесителя с целью получения наиболее равномерного температурного поля перед турбиной. Такая настройка проводится, как правило, в период плановых ремонтов.

Довольно оригинальную конструкцию имеет горелочное устройство, в котором для стабилизации факела используется как закрутка воздушного потока с помощью радиального лопаточного завихрителя (6), так и плохообтекаемое тело - перфорированный конический стабилизатор относительно большого диаметра (7).

Следует отметить следующие особенности рабочего процесса камеры сгорания VR-438:

сложная схема подвода воздуха в горелочном устройстве, затрудняющая точное определение расхода воздуха на горелку расчетным путем;

- относительно большой диаметр конического стабилизатора в сочетании с обтекающей его слабо закрученной струей воздуха генерируют протяженную зону обратных токов большого объема;

небольшая в сравнении с диаметром конического стабилизатора ширина кольцевой закрученной струи воздуха, по нашему мнению, не может поддерживать процессы турбулентного обмена в зоне обратных токов на достаточно высоком уровне интенсивности;

следствием этого является длинный и "вялый" факел, продолжительное пребывание продуктов сгорания в зоне высоких температур, повышенная эмиссия оксидов азота;

недостаточная интенсивность процессов турбулентного перемешивания в зоне горения, вероятно, является и причиной достаточно высокой эмиссии окиси углерода: вследствие большой продолжительности процесса смешения топлива с воздухом реакция горения не успевает полностью завершиться в высокотемпературной секции жаровой трубы и продукты неполного сгорания "замораживаются" струями холодного воздуха в смесителе.

Исходя из анализа рабочего процесса штатной камеры сгорания VR-438 было разработано техническое решение по ее экологической модернизации, которое включало следующее (см. рис.2):

- замену конического перфорированного стабилизатора аксиальным лопаточным завихрителем воздуха (1);
- установке на конусе фронтального устройства 4 воздухонаправляющих патрубков (2);
- уменьшением проходного сечения смесителя (3);
- замену газораздающего насадка горелки (4).

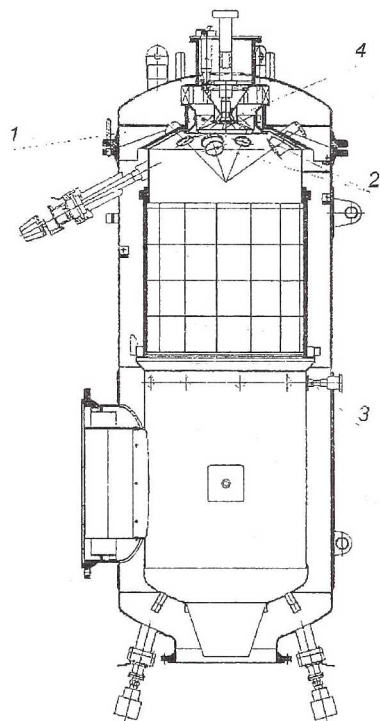


Рис. 2. Модернизированная камера сгорания KWU VR-438

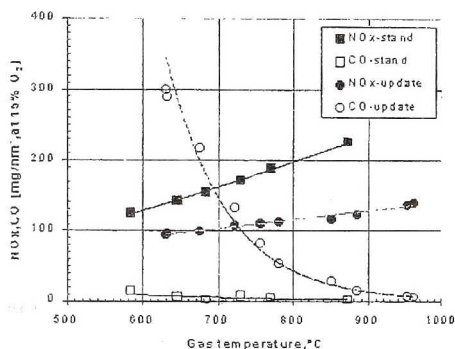


Рис. 3. Результаты испытаний штатной и модернизированной камеры сгорания KWU VR-438

На рис. 3 представлены результаты испытаний штатной и модернизированной камер сгорания VR-438 на компрессорной станции, в таблице 1 приведены основные характеристики штатной камеры сгорания.

Из представленных результатов, в частности, следует, что путем минимальных изменений конструкции штатной камеры сгорания, ис-

пользуя метод локального дозированного вдува воздуха, эмиссия вредных веществ на номинальной нагрузке агрегата уменьшена:

оксидов азота в 2,5 раза,

оксида углерода в 8,1 раза.

Остальные эксплуатационные характеристики модернизированной камеры сгорания не хуже, чем у штатной камеры.

Таблица 1. Технические характеристики камеры сгорания KWU VR-438.

Характеристика	Численное значение
Температура воздуха на входе в камеру сгорания, °К (°С)	541 (268)
Температура продуктов сгорания перед ТВД, °К (°С)	1053 (780)
Давление воздуха на входе в камеру сгорания, МПа	0.76
Расход воздуха через камеру сгорания, кг/сек.	35.84
Общий коэффициент избытка воздуха	4.77
Приведенная концентрация NO _x (при 15% O ₂), мг/нм ³	340
Приведенная концентрация СО (при 15% O ₂), мг/нм ³	218

3. МОДЕРНИЗАЦИЯ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ MS 3002

Газотурбинная установка MS3002 производства General Electric, называемая также Frame-3, благодаря своей удачной конструкции отличается высокой надежностью, хорошими эксплуатационными качествами и получила широкое распространение во всем мире. Сегодня в эксплуатации находится около 1000 машин этой серии.

Вместе с тем экологические характеристики этих машин, прежде всего эмиссия оксидов азота, не отвечают современным требованиям. Принимая во внимание то, что ресурс Frame-3 значительно превышает 100000 часов, для агрегатов с достаточно большим остаточным сроком службы возникает необходимость снижения эмиссии NO_x до уровня современных экологических норм.

Предлагаемые фирмой General Electric малотоксичные системы сжигания топлива типа DLN, в основе которых лежит способ сжигания предварительно подготовленной бедной топливовоздушной смеси, отли-

чаются сложной системой регулирования и имеют высокую цену (около 1 млн. долларов США на один агрегат). Для агрегатов, длительное время находящихся в эксплуатации и частично выработавших свой ресурс, применение столь дорогих систем экономически не оправдано. Для этих целей должны быть специально разработаны более простые и более дешевые технические решения.

Камера сгорания агрегата MS3002 состоит из трубчатых секций, расположенных в отдельных параллельных друг другу корпусах по 3 с каждой стороны машины перпендикулярно ее оси.

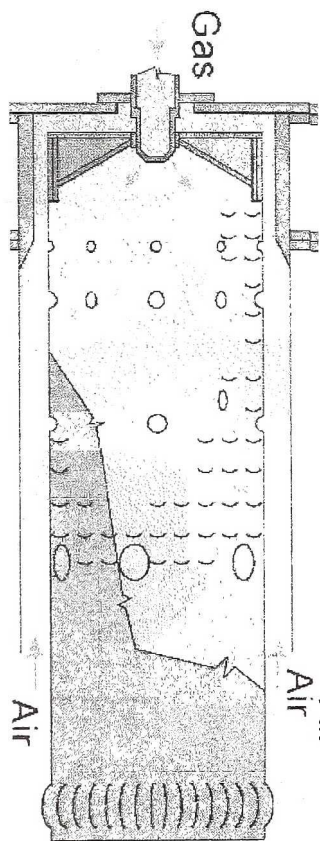


Рис. 4. Штатная камера сгорания агрегата MS3002

Воздух для горения подводится по кольцевому каналу, образованному пламенной трубой и корпусом, по противоточной схеме. Конструкция пламенной трубы типична для камер сгорания со ступенчатым подводом воздуха в зону горения (см. рис.4). Гильза пламенной трубы имеет 5 рядов отверстий (2 ряда для подачи первичного воздуха, 2 ряда дожигающих отверстий и 1 ряд отверстий смесителя), расположенных на различных расстояниях от фронтного устройства. Фронтное устройство представляет собой конус с развитой перфорацией в виде leuvers для охлаждения. Аналогичная система охлаждения применена на гильзе пламенной трубы на участке от фронтного устройства до смесительных отверстий.

Газовая горелка крепится на крышке корпуса и имеет расположенный по оси фронтного устройства газораздающий насадок струйного типа.

Рабочий процесс в камерах сгорания со ступенчатым подводом воз-

духа достаточно хорошо изучен и обладает рядом характерных особенностей.

Интенсивность процесса горения и длина выгорания топлива в камерах сгорания данного типа в большой степени определяются диаметром и расположением отверстий для подвода первичного воздуха и дожигающих отверстий в пламенной трубе.

Для рассматриваемой камеры сгорания характерны низкие скорости потока и малые, близкие к единице коэффициенты избытка воздуха в головной части, большой объем зоны обратных токов, что приводит к продолжительному пребыванию продуктов сгорания в зоне высоких температур и является причиной повышенной эмиссии оксидов азота.

Основные характеристики камеры сгорания агрегата MS 3002 приведены в таблице 2.

Таблица 2. Технические характеристики камеры сгорания MS 3002

Характеристика	Численное значение
Температура воздуха на входе в камеру сгорания $K, (^{\circ}C)$	543 (270)
Температура газов на выходе из камеры сгорания, $K(^{\circ}C)$	1216 (943)
Давление в камере сгорания, МПа	0,72
Расход воздуха через камеру сгорания, кг/сек	51
Общий коэффициент избытка воздуха	3,60
Приведенная концентрация NO_x (при 15% O_2), $мг/м^3$	232
Приведенная концентрация CO (при 15% O_2), $мг/м^3$	58

Метод локального дозированного вдува воздуха был принят за основу и при проектировании вариантов опытных моделей малотоксичной камеры сгорания MS-3002. Оптимальный по результатам экспериментальной отработки вариант изображен на рис. 5.

Отличительными особенностями вновь разработанной камеры сгорания (рис. 5) являются: увеличенный расход воздуха, подводимого в первичную зону, его точная дозировка и строгая ориентация струй воздуха для подачи его в локальные высокотемпературные зоны. Это было

достигнуто с помощью установки специальной системы воздухонаправляющих патрубков, приваренных к жаровой трубе (рис. 6). Помимо этого были внесены изменения в систему разделения воздуха, подаваемого в различные зоны жаровой трубы, и изменен угол выхода газа из горелки.

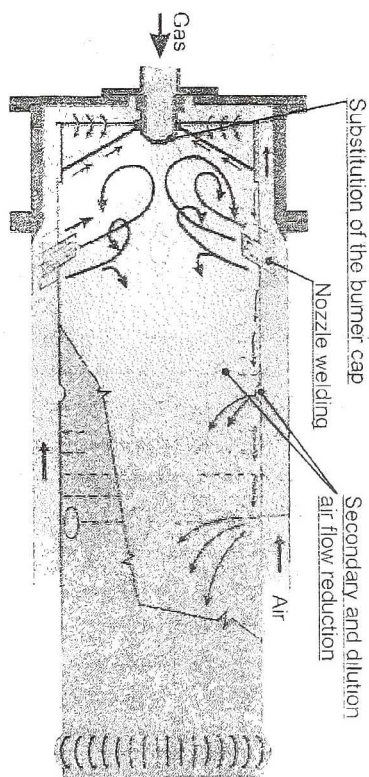


Рис. 5. Камера сгорания – перечень реконструируемых элементов

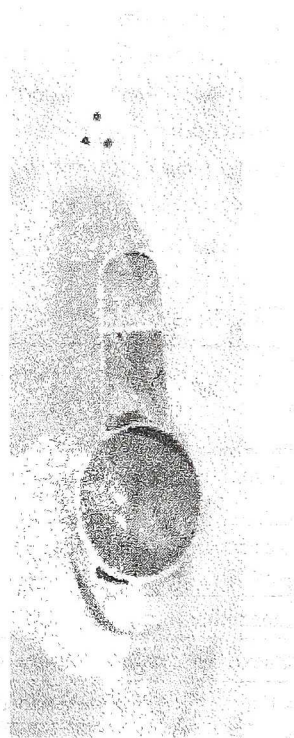


Рис. 6. Деталь патрубка

Указанные изменения в конструкции жаровой трубы приводят к формированию высокотурбулентного торообразного вихря в первичной зоне, что способствует следующему:

- более быстрому смешению топлива с воздухом,
- снижению средней температуры пламени,

- увеличению скорости потока в зоне рециркуляции, и как следствие этого, к уменьшению времени пребывания продуктов сгорания в высокотемпературных зонах,
- интенсификации процесса сгорания топлива.

Комплексные испытания камеры сгорания в составе агрегата на компрессорной станции «Резенхоф» («Рургаз»), в частности, показали:

- 100% надежность зажигания и функционирования пламеперебросных патрубков во время пуска;

высокую устойчивость факела и надежное функционирование детекторов пламени во всем диапазоне рабочих режимов;

высокую полноту сгорания топлива, которая так как и у оригинальной камеры сгорания превышала значение 99,9%;

отсутствие пульсаций давления рабочего тела;

значительное снижение потерь давления в камере сгорания, что ведет к снижению расхода топлива (рис.7).

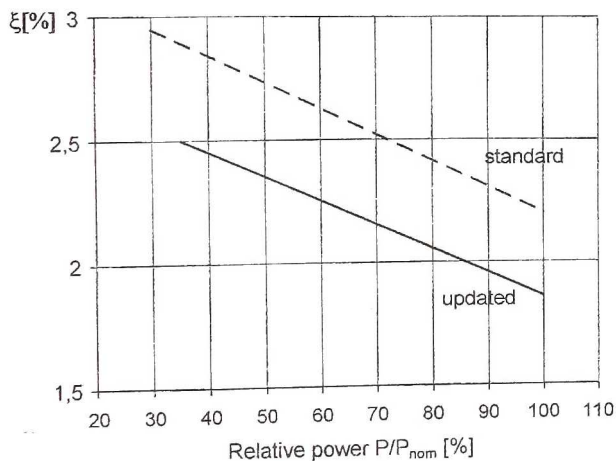


Рис. 7. Относительная потеря давления ξ камеры сгорания

Особое внимание уделялось температурному полю продуктов сгорания и температуре металла жаровой трубы. На рис.8 и 9 представлены фотографии внутренней поверхности жаровой трубы после испытания,

выполненного с помощью термокраски, чувствительной к уровню температуры.

Максимальные температуры металла жаровой трубы (800°C) малотоксичной камеры сгорания не превышали температур, измеренных на штатной камере.



Рис. 8. Внутренняя поверхность жаровой трубы

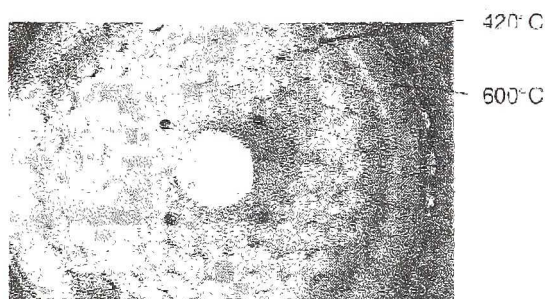


Рис. 9 Внутренняя поверхность фронта жаровой трубы

Сравнение эмиссии штатной камеры сгорания с эмиссией малотоксичной модернизированной камеры представлено на рис. 10.

Проведенные испытания показали, что эмиссия оксидов азота у модернизированной камеры сгорания в 1,6 раза ниже, чем у штатной и не превышает 140 мг/нм^3 (в пересчете на 15% концентрацию O_2) во всем диапазоне рабочих режимов агрегата. При этом эмиссия CO на номинальной нагрузке ГПА близка к 0, а в диапазоне нагрузок 55-100% номинальной мощности турбоагрегата эмиссия CO ниже уровня 100 мг/нм^3 .

Анализ результатов комплексных испытаний малотоксичной камеры сгорания показал, что ее основные эксплуатационные характеристики не уступают характеристикам штатной камеры или превосходят их.

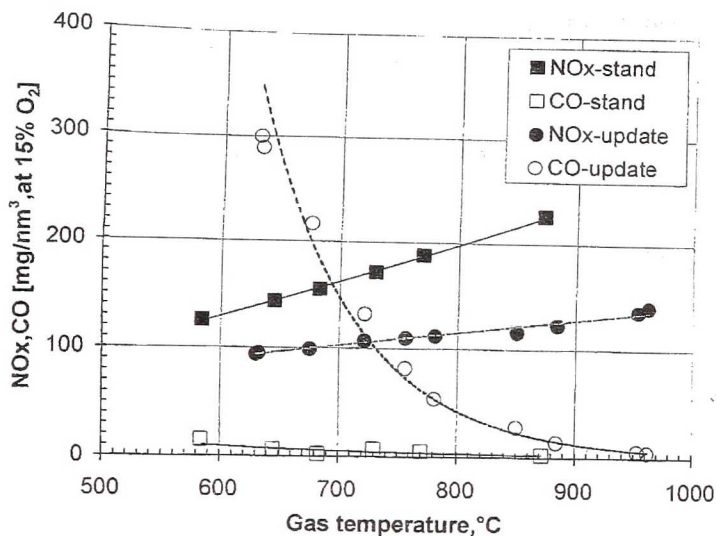


Рис. 10. Концентрация NO_x и CO в продуктах сгорания

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе имеющегося опыта экологической модернизации камер сгорания можно сделать, в частности, следующие выводы:

- локальный дозированный вдув воздуха эффективный метод снижения эмиссии вредных веществ, позволяющий уменьшить уровень эмиссии до значений, удовлетворяющих современным экологическим нормам большинства экономически развитых стран;
- метод локального дозированного вдува достаточно универсален и применим для камер сгорания существенно различающихся по конструкции;
- использование этого метода при экологической модернизации камер сгорания не требует внесения изменений в конструкции прочного корпуса камеры сгорания, топливной системы и системы автоматического регулирования агрегата;
- благодаря простоте и технологичности рассмотренных конструкций модернизированных камер сгорания, они выгодно

отличаются от технических решений других фирм очень низкой стоимостью, высокой надежностью, коротким временем простоя агрегата при его модернизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Soudarev A.V., Zakharov Y.I., Vinogradov E.D., Vesely S., Polushny G. Gas Turbine units for pipeline compressor stations: environmental update problems, ASME - Paper 94-GT-497.
2. Soudarev A.V., Vinogradov E.D., Zakharov Yu.I. Experimental refinement of technologies for environmental update of gas turbine units applied to electrogenerator driving, ASME - Paper 96-TA-45.
3. Soudarev A.V., Vinogradov E.D., Zakharov Y.I., Ott K.F. Environmental Update of Gas Turbine Plant in Gas Industry of Russia. VDI-Gesellschaft Energietechnik Entwicklungslinien der Energie-und Kraftwerkstechnik, Tagung Siegen, 10 September, 1996.
4. Soudarev A.V., Vinogradov E.D., Zakharov Y.I. Improvement of Environmental Record of the Stationary Gas Turbines Run in Russia Through Combustors Update, ASME - Paper 97-GT-366.

УДК 621.1:53.08 (075.8)

К ВОПРОСУ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНТРОЛЯ СОСТАВА ДЫМОВЫХ И ГАЗОВЫХ СРЕД

Цыганов А.М., Мальцева Л.В., Михайков В.И.

Самарский государственный аэрокосмический университет,
*Государственный комитет по охране окружающей среды
Самарской области*

В настоящее время все более актуальным становится вопрос контроля за состоянием окружающей воздушной среды, а также за составом продуктов сгорания тепловых двигателей и энергетических установок различного назначения. Причин для этого несколько. Непрерывно возрастает количество автотранспорта, особенно в крупных городах; растёт мощность теплоэнергетических установок. Ухудшается качество используемого углеводородного топлива, наблюдается обратный перевод топливосжигающих устройств например с природного газа на мазут.