


 ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2009109266/06, 13.03.2009

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
13.03.2009

Приоритет(ы):

(30) Конвенционный приоритет:  
15.05.2008 US 12/153,231

(43) Дата публикации заявки: 20.09.2010 Бюл. № 26

(45) Опубликовано: 27.12.2013 Бюл. № 36

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: ЛАВРОВ В.Н. и др. Разработка системы низкоэмиссионного горения топлива в газотурбинных установках. - Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени Академика С.П. Королева, №2 (13), 2007. US 4624940 A, 25.10.1986. GB 2140873 A, 05.12.1984. RU 2188960 C1, 20.09.2002. US 4202169 A, 13.05.1980.

Адрес для переписки:

 129090, Москва, ул.Б.Спасская, 25, стр.3,  
 ООО "Юридическая фирма Городисский и  
 Партнеры", пат.пов. А.В.Мишу, рег.№ 364

(72) Автор(ы):

 АНАНД Ашок Кумар (US),  
 УЭСТ Джеймс Энтони (US),  
 КРЕМЕР Гилберт Отто (US),  
 КАРИН Хусан Уй (US),  
 ДРЕЙПЕР Сэм Дэвид (US),  
 БЕРРИ Джонатан Дуайт (US)

(73) Патентообладатель(и):

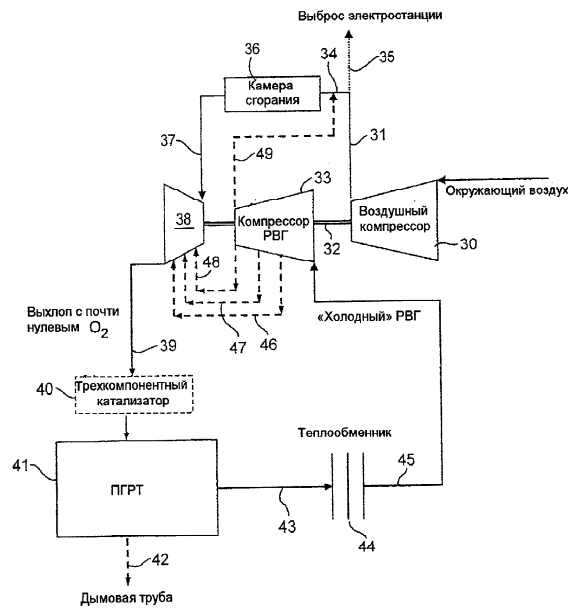
ДЖЕНЕРАЛ ЭЛЕКТРИК КОМПАНИ (US)

(54) СПОСОБ ОБРАБОТКИ КОМПОНЕНТОВ NO<sub>x</sub> И СИСТЕМА ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

(57) Реферат:

Система выработки электроэнергии для газотурбинного двигателя содержит первый компрессор, камеру (6) сгорания, расположенную ниже по потоку от первого компрессора, турбину, трехкомпонентный каталитический реактор, парогенератор рекуперации тепла, второй компрессор и электрогенератор. Турбина расположена ниже по потоку от камеры сгорания, имеет выпуск, соединенный с выпуском камеры сгорания, и выпуск для частично отработанного выхлопного газа, содержащего 4% или менее

кислорода. Трехкомпонентный каталитический реактор расположен ниже по потоку от турбины, имеет выпуск для приема и контактирования частично отработанного выхлопного газа. Трехкомпонентный каталитический реактор выполнен с возможностью удаления, по существу, всех NO<sub>x</sub> компонентов, присутствующих в частично отработанном выхлопном газе. Изобретение направлено на повышение экономичности и эффективности обработки выхлопных газов. 2 н. и 6 з.п. ф-лы, 7 ил.



Фиг.3



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

**(12) ABSTRACT OF INVENTION**(21)(22) Application: **2009109266/06, 13.03.2009**(24) Effective date for property rights:  
**13.03.2009**

Priority:

(30) Convention priority:  
**15.05.2008 US 12/153,231**(43) Application published: **20.09.2010 Bull. 26**(45) Date of publication: **27.12.2013 Bull. 36**

Mail address:

**129090, Moskva, ul.B.Spasskaja, 25, str.3, OOO  
"Juridicheskaja firma Gorodisskij i Partnery",  
pat.pov. A.V.Mitsu, reg.№ 364**

(72) Inventor(s):

**ANAND Ashok Kumar (US),  
UEhST Dzhejms Ehntoni (US),  
KREMER Gilbert Otto (US),  
KARIN Khusan Uj (US),  
DREJPER Sehm Dehvid (US),  
BERRI Dzhonatan Duajt (US)**

(73) Proprietor(s):

**DZhENERAL EhLEKTRIK KOMPANI (US)**

**(54) METHOD OF PROCESSING NO<sub>x</sub> COMPONENTS AND ELECTRIC POWER GENERATION SYSTEM**

(57) Abstract:

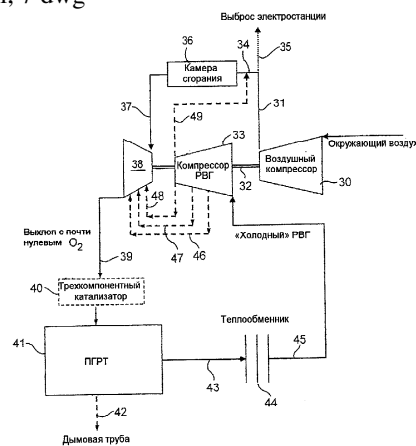
FIELD: engines and pumps.

SUBSTANCE: electric power generation system for gas turbine engine comprises first compressor, combustion chamber 6 arranged downstream of said first compressor, turbine, three-component catalytic reactor, heat recovery steam generator, second compressor and electric generator. Turbine is arranged downstream of combustion chamber has inlet communicated with combustion chamber outlet and outlet for discharge of partially used exhaust gas containing four percent of less of oxygen. Said three-component catalytic reactor is set downstream of turbine and inlet for intake and interaction of said partially used exhaust gas. Said three-component catalytic reactor can remove, in fact, all

NO<sub>x</sub> components from partially used exhaust gas.

EFFECT: higher efficiency of processing.

8 cl, 7 dwg



Область техники, к которой относится изобретение

Настоящее изобретение касается снижения и/или сокращения газовых выделений из электростанций, в частности, оксидов азота, присутствующих в выхлопных потоках электростанций, которые зависят от рабочей газовой среды для выработки электрической энергии. Более конкретно, настоящее изобретение касается газотурбинной системы выработки энергии комбинированного цикла, использующей рабочую газовую среду, которая сжимается, сгорает и расширяется, приводя в действие газотурбинный двигатель, причем, по меньшей мере, часть выхлопа из газовой турбины возвращается в камеру сгорания в виде потока рециркуляции выхлопного газа («РВГ»). Настоящее изобретение также касается способа обработки выхлопного газа с использованием трехкомпонентного катализатора для эффективного удаления выбранных загрязнителей (в частности,  $\text{NO}_x$ ) без вредного влияния количества диоксида углерода, монооксида углерода и других компонентов выхлопного потока, которые также могут отделяться и обрабатываться. Настоящее изобретение было сделано при поддержке правительства по контракту № DE-FC26-05NT42643, выданному министерством энергетики. Правительство имеет определенные права на данное изобретение.

#### Уровень техники

При нормальной работе газотурбинная электростанция комбинированного цикла генерирует значительные количества оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) и  $\text{CO}_2$  в качестве части процесса горения. В последние годы сокращение выделений, в частности  $\text{NO}_x$ , приобрело повышенное внимание со стороны общественных и федеральных надзорных органов, таких как агентство защиты окружающей среды США. Таким образом, значительные ресурсы были направлены на снижение и/или устранение таких нежелательных выделений. При горении углеводородного топлива, в частности жидкостей, оксиды азота, возникающие из воздуха, подаваемого в камеру сгорания, а также азотных соединений в самом топливе (таких как пиридин), образуют примеси, количество которых необходимо уменьшать или сокращать перед выпуском в атмосферу.

Газотурбинные двигатели обычно работают по так называемому «открытому циклу Брайтона», в котором воздух втягивается в компрессор, чтобы увеличить давление газа, и затем сгорает с углеводородным топливом, обычно природным газом, производя высокотемпературную рабочую текучую среду, причем основными продуктами сгорания являются диоксид углерода, вода (пар), свободный кислород и азот наряду с нежелательными продуктами, такими как монооксид углерода, оксиды азота и несгоревшие углеводороды. Сгорание обычно происходит в относительно «бедных» условиях, т.е. больше, чем стехиометрическое количество кислорода нужно для полного сгорания компонентов углеводородного топлива, чтобы поддерживать температуру сгорания ниже определенных практических границ (которая, если слишком высока, будет вредно влиять на стоимость и долговечность материалов конструкции).

Высокотемпературная рабочая текучая среда высокого давления из камеры сгорания подается в газотурбинный двигатель, где данная рабочая среда расширяется, и температура газа падает. В большинстве применений газовая турбина приводит в действие компрессор, а также генератор, который вырабатывает электрическую энергию. В простом открытом цикле Брайтона рабочая текучая среда покидает турбину при относительно высокой температуре и, таким образом, может быть использована для генерации пара в парогенераторе рекуперации тепла («ПГРТ»)

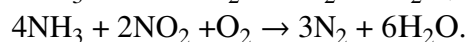
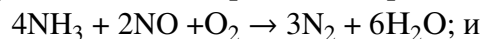
перед выхлопом или обработкой в нижних по потоку операциях, таких как снижение  $\text{NO}_x$  с помощью селективного каталитического восстановления («СКВ»).

Пар, полученный с помощью парогенератора рекуперации тепла, может быть использован как часть электростанции комбинированного цикла, чтобы приводить в действие паровую турбину, такую которая находится в большинстве паротурбинных электростанциях с замкнутым циклом Ренкина, тем самым увеличивая эффективность выработки энергии всей электростанции.

Одним существенным недостатком газотурбинных систем с открытым циклом Брайтона и комбинированным циклом является то, что выхлопной газ содержит различные оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ) и значительное количество диоксида углерода и монооксида углерода ( $\text{CO}$ ), все из которых сейчас находятся под пристальным взглядом общества из-за возможного вредного влияния на окружающую среду. Таким образом, разнообразные усилия были сделаны в прошлом, чтобы снизить количество  $\text{NO}_x$ , образуемого газотурбинными системами, перед тем, как  $\text{NO}_x$  должен отделяться и обрабатываться. Например, номинальный уровень  $\text{NO}_x$  может быть снижен посредством использования выхлопного газа из предварительной камеры сгорания (которая содержит меньше кислорода и свободного азота) в качестве первичного источника кислорода, доступного для сгорания. Смотри, например, патенты США № 3,792,581, 4,009,89 и 4,147,141. В патенте США № 3,969,892, выданном Stettler, аналогично описана газотурбинная система, в которой часть выхлопного газа из горелки возвращается через теплообменник и затем обратно в камеру сгорания с обеспечением снижения оксида азота в выхлопе. В патенте США № 3949548, выданном Lockwood, описана система рециркуляции выхлопного газа, в которой часть выхлопного газа охлаждается и рециркулирует через компрессор, снова с небольшим снижением оксида азота.

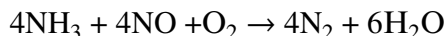
Несмотря на эти достижения в снижении количества компонентов  $\text{NO}_x$ , присутствующих в выхлопных потоках газовой турбины, сохраняется необходимость в более эффективном и экономичном способе и устройстве для обработки выделений оксидов азота,  $\text{CO}_2$  и других примесей, даже предполагая, что их уровни в выхлопе турбины могут быть немного снижены с помощью обычного средства. Предыдущие способы удаления  $\text{NO}_x$  в газотурбинных системах обычно включают в себя один или более из следующих способов: СКВ, селективное некаталитическое восстановление, каталитическое разложение или поглощение.

СКВ способы основаны на селективном восстановлении аммиака, используя  $\text{NO}_x$ , причем основные реакции выражаются в виде:



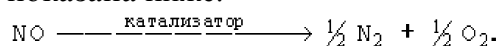
При СКВ оксиды азота, образовавшиеся во время горения, могут снижаться до приемлемых ЕРА уровней. Однако такие способы имеют известные недостатки, включая возможное образование других азотсодержащих соединений, которые требуют дополнительной обработки перед выпуском в атмосферу. Выхлопной поток может «очищаться» с использованием способов, которые превращают  $\text{NO}_x$  в свободный азот, или которые физически отделяют  $\text{NO}_x$  от выхлопного газа. Однако такие операции имеют тенденцию к снижению общей эффективности газовой турбины и не позволяют в начальной стадии удалять существенные количества  $\text{NO}_x$  из выхлопного потока. Многие СКВ системы также требуют нагрева для поддержания регулируемой температуры восстановления и потенциально могут выделять сульфат аммония.

Способы селективного некаталитического восстановления предшествующего уровня техники функционируют без какого-либо катализатора, превращая  $\text{NO}_x$  по реакции с аммиаком в азот и воду следующим образом:



К сожалению, некаталитические системы имеют тенденцию к ограничению вследствие узкого диапазона температуры реакции и того факта, что температуры способа могут изменяться с изменением нагрузки газотурбинного двигателя. Кроме того, данный способ восстанавливает только от 60 до 80 процентов  $\text{NO}_x$ , требуя

Системы каталитического разложения кроме того, что они являются дорогими и сложными, также имеют тенденцию удалять только приблизительно 70 процентов  $\text{NO}_x$  в зависимости от эффективности катализатора. Типичная реакция разложения показана ниже:



Большинство способов поглощения удаляет  $\text{SO}_x$  и  $\text{NO}_x$ , используя активированный уголь. Данный способ является сложным, имеет потенциал удаления  $\text{NO}_x$  только приблизительно от 40 до 60 процентов и требует обращения с горячими твердыми веществами.

Таким образом, существующие способы удаления  $\text{NO}_x$  в выхлопных потоках газотурбинных двигателей имеют хорошо известные недостатки в стоимости и эффективности.

Другой основной проблемой в разработке и эксплуатации газотурбинных электростанций является изолирование и эффективное удаление диоксида углерода и монооксида углерода. Как отмечается выше, большие количества  $\text{CO}_2$  обычно получаются в системах комбинированного цикла в качестве одного из основных продуктов сгорания природного газа с воздухом. Извлечение  $\text{CO}_2$  требует, чтобы сначала его отделили от азота и других газообразных компонентов рабочей текучей среды (например, с помощью химической реакции и/или физического поглощения). Хотя технологии изоляции  $\text{CO}_2$  хорошо известны, значительное количество энергии используется при отделении  $\text{CO}_2$  от других составляющих, таких как  $\text{NO}_x$ , и, следовательно, эффективность системы выработки электроэнергии снижается, когда требуется такое отделение  $\text{CO}_2$ .  $\text{CO}_2$  может захватываться посредством непосредственного контакта между выхлопным газом и поглотителем, таким как моноэтаноламин (МЭА). Однако МЭА способ отделения может приводить к существенным проблемам для общей эффективности электростанции. Системы аминного отделения предшествующего уровня техники неизменно имеют высокие эксплуатационные и капитальные затраты в зависимости от присутствия других соединений в выхлопном потоке и концентрации  $\text{CO}_2$  в объеме дымового газа.

В последние годы рециркуляция выхлопного газа (РВГ) стала полезной технологией для увеличения концентрации  $\text{CO}_2$  в выхлопном газе от газотурбинных двигателей, облегчая изоляцию  $\text{CO}_2$ , присутствующего в дымовом газе. С другой стороны, применение РВГ требует тщательного баланса условий способа, чтобы избежать увеличения других выделений, которые являются запрещенными для окружающей среды (включая  $\text{NO}_x$ ), которые могут образовываться в низко-кислородной среде вследствие неполного сгорания. Уровни РВГ гораздо ниже 40% обычно рекомендуются вследствие низких уровней кислорода, присутствующего в камере сгорания. В противном случае нежелательный СО может получаться вследствие

неполного окисления в  $\text{CO}_2$  в богатых пламенах. Аналогично, по меньшей мере, некоторая диссоциация  $\text{CO}_2$  в  $\text{CO}$  или  $\text{NO}_2$  в  $\text{NO}$  может происходить в стехиометрических и «обедненных» топливных композициях в зависимости от конкретных имеющихся условий сгорания и РВГ.

#### Краткое описание изобретения

Было обнаружено, что некоторое количество существенных преимуществ может быть достигнуто, используя РВГ в описанных ниже условиях способа. В частности, снижение количества  $\text{NO}_x$  в выхлопном газе может быть достигнуто при высоких уровнях РВГ при увеличении, в то же время, концентрации  $\text{CO}_2$  и значительном снижении количества кислорода, остающегося в потоке выхлопного газа, т.е. до уровней 4% или ниже. Еще более существенно, при описанных ниже условиях РВГ, было обнаружено, что поток выхлопного газа может обрабатываться гораздо более экономичным и эффективным образом, а именно используя сухой трехкомпонентный катализатор для удаления  $\text{NO}_x$ .

Недавние исследования General Electric показывают, что при тщательно регулируемых условиях способа теперь возможно снижение  $\text{NO}_x$  до 50% с использованием высоких уровней РВГ. Например, уровни РВГ до 35% и 40% могут быть использованы без существенного увеличения количества нежелательных выхлопных составляющих (таких как  $\text{CO}$  или  $\text{NO}$ ). Также было обнаружено, что камеры сгорания газовой турбины могут работать при высоких топливных эффективностях и еще снижать количество  $\text{NO}_x$ , используя высокий процент РВГ, в то же время поддерживая приемлемый (даже увеличенный) уровень  $\text{CO}_2$ , опять без какого-либо существенного увеличения образования  $\text{CO}$  или  $\text{NO}$ .

С равной важностью использование РВГ в регулируемых условиях способа, описанных здесь, снижает количество свободного кислорода, остающегося в выхлопном газе, до 4% по объему или меньше. То есть типичный способ, используя РВГ, дает необычно низкие пороговые количества кислорода, остающегося в выхлопном газе (даже достигающие 0%), при снижении, в то же время, концентрации  $\text{NO}_x$  и увеличении уровня  $\text{CO}_2$ . Впервые низкое количество кислорода, присутствующего в рециркуляции, позволило использовать сухой трехкомпонентный катализатор для удаления  $\text{NO}_x$  в конечном потоке выхлопного газа, покидающем электростанцию.

#### Краткое описание чертежей

Фиг.1 представляет собой блок-схему, показывающую схему обычной электростанции, использующей РВГ, включая типичные основные узлы оборудования, необходимые для осуществления способа РВГ;

Фиг.2 представляет собой графическое представление в виде семейства кривых, описывающих концентрацию кислорода в выхлопе турбины для разных температур пламени в камере сгорания, причем количество кислорода в выхлопном газе сравнивается при разных процентных уровнях РВГ (20, 40 и 50%), где 0% означает выхлоп турбины обычной системы без какого-либо РВГ;

Фиг.3 представляет собой блок-схему способа, показывающую основные этапы и оборудование, используемые для осуществления РВГ и трехкомпонентной каталитической обработки согласно настоящему изобретению, включая типичные этапы для достижения требуемого низкого уровня кислорода в выхлопном газе и удаления компонентов  $\text{NO}_x$ ;

Фиг.4 представляет собой блок-схему способа для альтернативного варианта осуществления настоящего изобретения, показанного на фиг.2, который включает в

себя определенные модификации впускной подачи в камеру сгорания;

Фиг.5А представляет собой схематичное изображение признаков альтернативного варианта осуществления настоящего изобретения, использующего поток «горячего» РВГ выхлопного газа, который включает в себя часть высокотемпературных газов сгорания, рециркулирующих через камеру сгорания газа, для улучшения общей эффективности системы в отношении количеств  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{NO}_x$ , обрабатываемых в конечном счете;

Фиг.5В графически изображает температуру воздуха, входящего в камеру сгорания,  $T_{3,0}$ , относительно длины пути камеры сгорания вместе с температурой выпуска компрессора, «ТВК», которая показана для сравнения с температурой газов сгорания вдоль пути камеры сгорания.

Фиг.6 представляет собой графическое представление количества кислорода, остающегося в выхлопном газе как результат использования различного процента РВГ согласно настоящему изобретению при регулируемых условиях способа; и

Фиг.7 представляет собой графическое представление, сравнивающее ожидаемые относительные количества  $\text{CO}_2$  и  $\text{NO}_x$ , полученные с использованием различного процента РВГ при различных температурах пламени камеры сгорания.

Подробное описание изобретения

Приведенный в качестве примера вариант осуществления системы выработки электроэнергии согласно настоящему изобретению включает в себя следующие основные элементы: газовый компрессор, который увеличивает давление окружающего воздуха, подаваемого в систему; камеру сгорания, выполненную с возможностью обеспечения сгорания смеси топлива (такого как углеводород или синтетический газ) и сжатого окружающего воздуха с образованием высокотемпературного потока выхлопного газа; обычный газотурбинный двигатель, расположенный ниже по потоку от камеры сгорания с лопатками турбины, выполненными с возможностью перемещения силой расширяющегося высокотемпературного выхлопного газа; поток с высоким процентом РВГ, подаваемый в камеру сгорания; трехкомпонентный каталитический реактор, расположенный ниже по потоку от газотурбинного двигателя, который контактирует с потоком выхлопного газа, имеющим менее чем 4% кислорода по объему, и удаляет значительное количество компонентов  $\text{NO}_x$  (обычно приблизительно 70%); парогенератор рекуперации тепла (ПГРТ); холодильник (теплообменник) для уменьшения температуры части выхлопного газа, покидающего ПГРТ с образованием охлажденного РВГ потока; компрессор РВГ, который увеличивает давление охлажденного РВГ; и электрогенератор, соединенный с газотурбинным двигателем для выработки электричества. Трехкомпонентный катализатор может находиться в любом положении ниже по потоку от камеры сгорания, где содержание кислорода остается ниже приблизительно 4% и температура газа обеспечивает приемлемый уровень каталитической эффективности и долговечности.

В вышеописанной системе выработки электроэнергии было обнаружено, что использование высоких уровней РВГ (свыше 35 % по объему) при более высоких, чем обычные температуры пламени камеры сгорания увеличивает номинальное количество  $\text{CO}_2$  в выхлопном потоке, покидающем электростанцию. Аналогично, использование 40% РВГ при более высоких, чем нормальные температурах пламени приведет к 10%  $\text{CO}_2$  в выхлопном газе.

Использование высокого процента РВГ, таким образом, имеет ряд существенных преимуществ. Выделения  $\text{NO}_x$  могут быть снижены, тогда как количество  $\text{CO}_2$

увеличивается (существенно уменьшая трудность и стоимость изоляции и отделения  $\text{CO}_2$  с использованием обычного средства). Кроме того, количество кислорода может быть снижено до менее чем 4%, делая возможной обработку выхлопного потока с помощью способа, ранее не известного в области газовых турбин, а именно посредством контактирования выхлопного потока с сухим трехкомпонентным катализатором для снижения и/или удаления  $\text{NO}_x$ .

В дополнительном варианте осуществления настоящего изобретения было обнаружено, что потенциальные нежелательные продукты неполного сгорания, такие как  $\text{NO}$  и  $\text{CO}$ , могут дополнительно снижаться в объеме посредством рециркуляции части газов сгорания обратно в саму камеру сгорания. Вариант осуществления с «горячим» РВГ имеет тенденцию снижать количество  $\text{CO}$  и несгоревших углеводородов, присутствующих в выхлопном газе, покидающем камеру сгорания, кроме того вызывая легкое дополнительное снижение количества остаточного кислорода в газе, полностью обработанном трехкомпонентным катализатором.

Фиг.1 представляет собой блок-схему, показывающую оборудование обычной электростанции, использующей РВГ (но без трехкомпонентного катализатора), включая обычный вариант осуществления, обычно применяемый для осуществления способа РВГ. Как показывает фиг.1, топливо 12 и поток 11 сжатого воздуха из компрессора 5 объединяются и сгорают в камере 6 сгорания, образуя высокотемпературный поток выхлопного газа, который служит в качестве первичной рабочей текучей среды для приведения в действие турбины 7. Выхлопной газ, покидающий турбину 7 (все еще при относительно высокой температуре), проходит через парогенератор 9 рекуперации тепла (ПГРТ) и узел 10 охлаждения выхлопного газа, и затем обратно в компрессор 1 РВГ в виде потока 16 рециркуляции выхлопного газа, содержащего несгоревшее углеводородное топливо,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}$ , свободный кислород и азот, а также другие незначительные примеси.

Компрессор 1 РВГ увеличивает давление потока 16 рециркуляции выхлопного газа и затем разделяет сжатый РВГ на две фракции в виде выпуска из разных ступеней компрессора, а именно поток 17 (приблизительно 60% по объему), который подается в компрессор 2 перед возвратом в камеру 6 сгорания. Вторая часть потока сжатого газа из компрессора 2 служит в качестве части рабочей текучей среды для турбины 7 (смотри линию 19). Сжатый поток 18 из компрессора 1 РВГ (приблизительно 40% по объему) проходит в сепараторы 3 диоксида углерода, причем показано, что отделенный  $\text{CO}_2$  покидает систему для дополнительной обработки по 14. Не- $\text{CO}_2$  компоненты в потоке 15 из сепараторов 3 служат в качестве дополнительной рабочей текучей среды для приведения в действие турбины 4, которая функционально соединена с компрессором 5 и электрогенератором 8 для выработки электричества. Выхлопной газ из турбины 4 (теперь относительно свободный от  $\text{CO}_2$ ) выпускается из системы по линии 13, номинально в дымовую трубу или расположенную ниже по потоку систему регулирования загрязнения окружающей среды.

Фиг.2 представляет собой графическое представление концентрации кислорода в выхлопе турбины при разных температурах пламени в камере сгорания (иногда известных как «зажигающая температура газовой турбины»), где количество кислорода в выхлопном газе сравнивается при разных процентных уровнях РВГ (20, 40 и 50%), где 0% относится к выхлопному газу обычной системы без какого-либо РВГ. Как показывает фиг.2, применение РВГ в вышеописанных типичных вариантах осуществления имеет тенденцию значительно снижать уровень свободного кислорода в выхлопном газе, увеличивая количество диоксида углерода и без увеличения

количества CO или NO<sub>x</sub>. Таким образом, содержание кислорода в выхлопном газе при более высоких уровнях РВГ может быть снижено до 4% или меньше (предпочтительно близко к 0%), делая возможным удаление компонентов NO<sub>x</sub> с использованием сухого

5 Таким образом, фиг.2 иллюстрирует ожидаемую разницу между количеством остаточного кислорода, остающегося в потоке выхлопного газа при различных процентах РВГ, т.е. показывает, что уровень кислорода значительно падает при более высоких процентах РВГ. Хотя каждая из систем, указанных на фиг.2, имеет тенденцию  
10 снижать кислород в выхлопном газе при более высоких температурах пламени камеры сгорания, применение РВГ согласно настоящему изобретению постоянно достигает гораздо меньшего уровня кислорода по сравнению с выхлопом обычной турбины без РВГ.

15 Фиг.3 представляет собой блок-схему способа, показывающую основные этапы способа и оборудование, используемое для осуществления РВГ и трехкомпонентной каталитической обработки, включая оборудование и этапы для достижения требуемого низкого уровня кислорода в выхлопном газе. Модуль трехкомпонентного катализатора может содержать катализатор окисления перед трехкомпонентным  
20 катализатором для снижения содержания кислорода до требуемого уровня и катализатор окисления после трехкомпонентного катализатора для снижения продуктов парциального окисления углеводородов до требуемой концентрации. Фиг.3 показывает, что окружающий воздух входит в компрессор 30 и проходит при существенно более высоком давлении (и слегка увеличенной температуре) в камеру 36  
25 сгорания по линии 34 подачи. Как указано выше в отношении фиг.1, камера 36 сгорания объединяет углеводородный топливный компонент с воздухом, образуя высокотемпературный поток 37 выхлопного газа, который служит в качестве основной рабочей текучей среды для турбины 38. Турбина 38 в свою очередь приводит  
30 в действие компрессор 33 РВГ и компрессор 30, как показано. «Холодный» РВГ входит в компрессор РВГ по линии 45 при существенно более высоком давлении в виде сжатого потока рециркуляции. Тем временем, выхлопные газы из турбины 38 (которые имеют меньше чем 4% присутствующего кислорода по объему) проходят  
35 через трехкомпонентный каталитический реактор 40 по линии 39, что удаляет компоненты NO<sub>x</sub>.

При определенных рабочих условиях, зависящих от температуры в разных точках внутри газовой турбины, может быть необходимо расположить трехкомпонентный катализатор внутри самой турбины, а не использовать отдельный каталитический  
40 реактор ниже по потоку. Кроме того, различные катализаторы могут применяться для удаления NO<sub>x</sub> при разных положениях ниже по потоку от камеры сгорания (включая даже ПГРТ) в зависимости от точного рабочего режима, в котором данные катализаторы функционируют с приемлемыми уровнями. То есть, трехкомпонентные катализаторы согласно настоящему изобретению могут располагаться в разных  
45 местах способа при условии, что данное расположение находится ниже по потоку от камеры сгорания, уровень кислорода остается достаточно низким, позволяя катализаторам эффективно удалять примеси NO<sub>x</sub>, и условия способа не оказывают вредного влияния на общую производительность катализатора.

50 Фиг.3 показывает, что обработанный горячий поток 39 выхлопного газа проходит через парогенератор 41 рекуперации тепла (ПГРТ). Значительная фракция рециркуляции в 43 затем охлаждается, используя теплообменник 44, и охлажденный поток 45 РВГ возвращается в компрессор 33 РВГ, как указано выше. Фиг.3 также

показывает, что может быть выгодно использовать определенные части потока РВГ, чтобы способствовать движению и обеспечивать вспомогательные потоки в турбину 38 (тем самым улучшая общую эффективность электростанции для достижения требуемого содержания выхлопного кислорода), как показано с помощью

Фиг.4 представляет собой блок-схему способа для варианта осуществления изобретения, альтернативного показанному на фиг.3 (используя те же ссылочные позиции для общих элементов), с модификациями впускного питания в камеру сгорания. Фиг.4 показывает, что выпуск компрессора РВГ в 49 может проходить через обогащенный или обедненный каталитический реактор перед впуском в камеру сгорания. Каталитический реактор удаляет определенные компоненты рециркуляции (иные чем  $\text{NO}_x$ ), чтобы улучшить смесь сгорания и придать устойчивость горения пламени, обогащенному  $\text{CO}_2$ . «Обогащенный» каталитический реактор будет содержать, например, реформер, который превращает углеводородное топливо в более богатую водородом и  $\text{CO}$  смесь, увеличивая рабочую гибкость камеры сгорания. Фиг.4 также показывает, что подача жидкого топлива в камеру сгорания может предварительно испаряться в неокислительном окружении, улучшая сгорание, при необходимости. Подача сжатого окружающего воздуха в камеру сгорания также может расщепляться, как показано, причем часть 73 претерпевает предварительную каталитическую обработку перед подачей в камеру сгорания.

Соответствующие фиг.5А и 5В показывают признаки альтернативного варианта осуществления настоящего изобретения, использующего «горячий» РВГ поток выхлопного газа, содержащий часть высокотемпературных газов сгорания, которые рециркулируют через саму газовую камеру сгорания, улучшая общую эффективность системы в отношении количества  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  и других нежелательных выхлопных компонентов, которые в конечном итоге необходимо обрабатывать и/или удалять.

Фиг.5А схематично показывает, что часть «горячего» РВГ, т.е. до охлаждения и подачи в компрессор РВГ, может объединяться внутри камеры сгорания со сжатым воздухом, сгорать отдельно и направляться прямо в газотурбинный двигатель. Углеводородное топливо (показано как 51 и 52) объединяется с воздухом основного выпуска компрессора (ВК), как показано, и может иметь направляющую 53, причем часть рециркулирует через отверстия 54 и 55 (на самом деле, «втягивается» через отверстия под действием меньшего статического давления, полученного с помощью конфигурации Вентури «изнутри наружу») и объединяется с частью воздуха основного выпуска компрессора. Большая фракция «горячей» рециркуляции затем подается непосредственно в турбину.

Фиг.5В графически изображает температуру впуска воздуха в камеру сгорания,  $T_{\text{впуск}}$ , относительно длины пути камеры сгорания, т.е. «длины от торцевой крышки», причем  $T_{\text{впуск}}$  берется в кольцевом внешнем пространстве камеры сгорания. Температура у выпуска компрессора, «ТВК», показана для сравнения с температурой газов сгорания вдоль пути камеры сгорания. Величина ТВК будет увеличиваться после смешения с газами сгорания. В частности, было обнаружено, что увеличение температуры впуска воздуха в камеру сгорания при снижении длины пути камеры сгорания имеет тенденцию уменьшать уровни  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$  в выхлопном газе.

Фиг.6 показывает графическое представление количества кислорода, остающегося в выхлопном газе, в результате использования меняющихся процентов РВГ согласно настоящему изобретению в контролируемых условиях способа. Как показывает фиг.6, когда используют уровни РВГ выше приблизительно 45% по объему, уровень

кислорода в конечном выхлопном газе падает до менее 4%, позволяя использовать трехкомпонентный катализатор для удаления компонентов  $\text{NO}_x$  в полученном выхлопном потоке. Фиг.6 также показывает, как содержание кислорода выхлопного газа существенно падает в сравнимых условиях впускной удельной влажности от  
 5 высокого, приблизительно 12%, до приблизительно 1% по мере увеличения процента РВГ.

Фиг.7 дает графическое представление, сравнивающее ожидаемые относительные количества  $\text{CO}_2$  и  $\text{NO}_x$ , получаемые с использованием разных процентов РВГ, при  
 10 разных температурах пламени выпуска камеры сгорания. Эта фигура, таким образом, показывает типичное влияние РВГ на выделения  $\text{NO}_x$  камеры сгорания с предварительным смешением для диапазона выпускных температур пламени. Фиг.7 подчеркивает, что использование высокого процента РВГ действительно имеет  
 15 тенденцию увеличивать количество  $\text{CO}_2$ , присутствующего в выхлопном газе, для обработки, делая более легким и более экономичным отделение и удаление  $\text{CO}_2$  с использованием обычного средства. Фиг.7 также показывает, что количество  $\text{NO}_x$  будет немного уменьшаться, когда температура пламени камеры сгорания становится  
 20 ниже. Таким образом, в одном аспекте настоящего изобретения более высокие эффективности способа могут быть получены из температур пламени камеры сгорания и уровней РВГ, которые не имеют тенденции увеличивать количество получаемого  $\text{NO}_x$ . Фиг.7, следовательно, представляет собой пример, показывающий зависимость  $\text{NO}_x$  от температуры пламени и доли РВГ для типичной газотурбинной  
 25 системы сгорания. Фактические, конкретные для способа, величины будут зависеть от конкретного применяемого цикла газовой турбины, типа топлива и возможно еще конструкции камеры сгорания.

Сухие трехкомпонентные катализаторы конверсии, применимые для осуществления настоящего изобретения, т.е. снижения и/или устранения оставшегося  $\text{NO}_x$  в  
 30 выхлопном газе, хорошо известны в автомобильной промышленности, но ранее не использовались (или еще не предлагались согласно знанию заявителей) в области газовых турбин, главным образом потому, что данные катализаторы просто не эффективны для удаления компонентов  $\text{NO}_x$ , когда содержание кислорода превышает  
 35 приблизительно 4% по объему. Вообще говоря, трехкомпонентные катализаторы могут стимулировать реакции окисления углеводородов и монооксида углерода ( $\text{УВ}$  и  $\text{СО}$ ), а также реакцию восстановления  $\text{NO}_x$ .

Известные трехкомпонентные катализаторы, применимые в настоящем изобретении, обычно содержат один или более металлов платиновой группы,  
 40 диспергированных на подложку (основу) с хорошо развитой поверхностью из устойчивых оксидов, таких как  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , вместе с оксидами  $\text{Zr}$  и  $\text{Ce}$ , и один или более оксидов щелочноземельных металлов  $\text{Ba}$ ,  $\text{Ca}$  и  $\text{Sr}$ . Подложка катализатора может наноситься на носитель, такой как керамический блок или спирально скрученная  
 45 металлическая фольга из  $\text{Fe-Cr-Al}$  или устойчивых к коррозии материалов на основе железа, или другими способами, известными специалистам в данной области техники.

В дополнение к металлам платиновой группы, трехкомпонентные катализаторы, которые содержат один или более оксидов d-элементов, имеют тенденцию увеличивать эффективность катализаторов платиновой группы путем поддержания доступности  
 50 кислорода посредством обратимого накопления кислорода во время цикла и путем подавления образования токсичных газов, таких как  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{NH}_3$ . Другие композиции трехкомпонентных катализаторов, известные специалистам в данной области техники, но ранее не применявшиеся для обработки выхлопных газов из газотурбинных

двигателей (например, более современное поколение катализаторов на основе платины, разработанных для применения в автомобильной промышленности), могут быть использованы для обработки выхлопных газов, образующихся при использовании описанного здесь способа, при условии, что такие катализаторы могут удалять приблизительно до 4% NO<sub>x</sub> по объему.

Хотя настоящее изобретение описано в связи с тем, что сейчас рассматривается как наиболее практичный и предпочтительный вариант осуществления, следует понимать, что оно не ограничивается описанным вариантом осуществления, а, напротив, охватывает различные модификации и эквивалентные расположения, включенные в сущность и объем формулы изобретения.

### Формула изобретения

1. Система выработки электроэнергии для газотурбинного двигателя, содержащая: первый компрессор, имеющий впуск для окружающего воздуха, средство для увеличения давления окружающего воздуха и выпуск для сжатого окружающего воздуха;

камеру (6) сгорания, расположенную ниже по потоку от первого компрессора, имеющую впуски для окружающего воздуха, сжатых выхлопных газов и топлива (12) и выполненную с возможностью обеспечения сгорания смеси топлива (12), сжатых выхлопных газов и сжатого окружающего воздуха для образования высокотемпературного выхлопного газа через выпуск камеры (6) сгорания;

турбину, расположенную ниже по потоку от камеры (6) сгорания, имеющую впуск, соединенный с выпуском камеры (6) сгорания, лопатки турбины, выполненные с возможностью перемещения силой высокотемпературного выхлопного газа через выпуск камеры сгорания, и выпуск для частично отработанного выхлопного газа, содержащего 4% или менее кислорода;

трехкомпонентный каталитический реактор (40), расположенный ниже по потоку от турбины, имеющий впуск для приема и контактирования частично отработанного выхлопного газа, причем трехкомпонентный каталитический реактор (40) выполнен с возможностью удаления, по существу, всех NO<sub>x</sub> компонентов, присутствующих в частично отработанном выхлопном газе;

парогенератор рекуперации тепла;

второй компрессор для увеличения давления потока рециркуляции выхлопного газа и подачи указанного потока рециркуляции выхлопного газа в камеру сгорания турбины; и

электрогенератор (8), соединенный с газотурбинным двигателем, для выработки электричества.

2. Система по п.1, дополнительно содержащая средство охлаждения для уменьшения температуры выхлопного газа с образованием потока рециркуляции (16) охлажденного выхлопного газа (РВГ), возвращающегося в камеру (6) сгорания.

3. Система по п.2, дополнительно содержащая компрессор (1) РВГ, расположенный ниже по потоку от ПГРТ (9), имеющий впуск для охлажденного потока (45) РВГ и выпуск, соединенный с камерой (6) сгорания, причем компрессор выполнен с возможностью увеличения давления охлажденного потока (45) РВГ.

4. Система по п.2, дополнительно содержащая теплообменник (44), расположенный ниже по потоку от ПГРТ (9), выполненный с возможностью уменьшения температуры выбранной части выхлопного газа для образования охлажденного потока (45) РВГ и обеспечения удаления воды (пара), присутствующей в РВГ, до подачи обратно в

камеру (6) сгорания.

5. Система по п.2, в которой объем РВГ поддерживается выше приблизительно 35% по объему.

6. Система по п.1, дополнительно содержащая средство для рециркуляции части высокотемпературных выхлопных газов, образованных камерой (6) сгорания, внутри камеры (6) сгорания, для увеличения скорости окисления после смешивания части газов со сжатым воздухом из воздушного компрессора.

7. Система по п.1, в которой трехкомпонентный каталитический реактор (40) использует катализатор, содержащий один или более металлов платиновой группы, диспергированных на подложку, имеющую поверхность из устойчивых оксидов.

8. Способ обработки компонентов  $\text{NO}_x$ , присутствующих в выхлопных газах газотурбинного двигателя, с использованием трехкомпонентного катализатора посредством первоначального снижения количества кислорода, присутствующего в выхлопных газах, до обработки трехкомпонентным катализатором, при этом способ включает этапы, на которых:

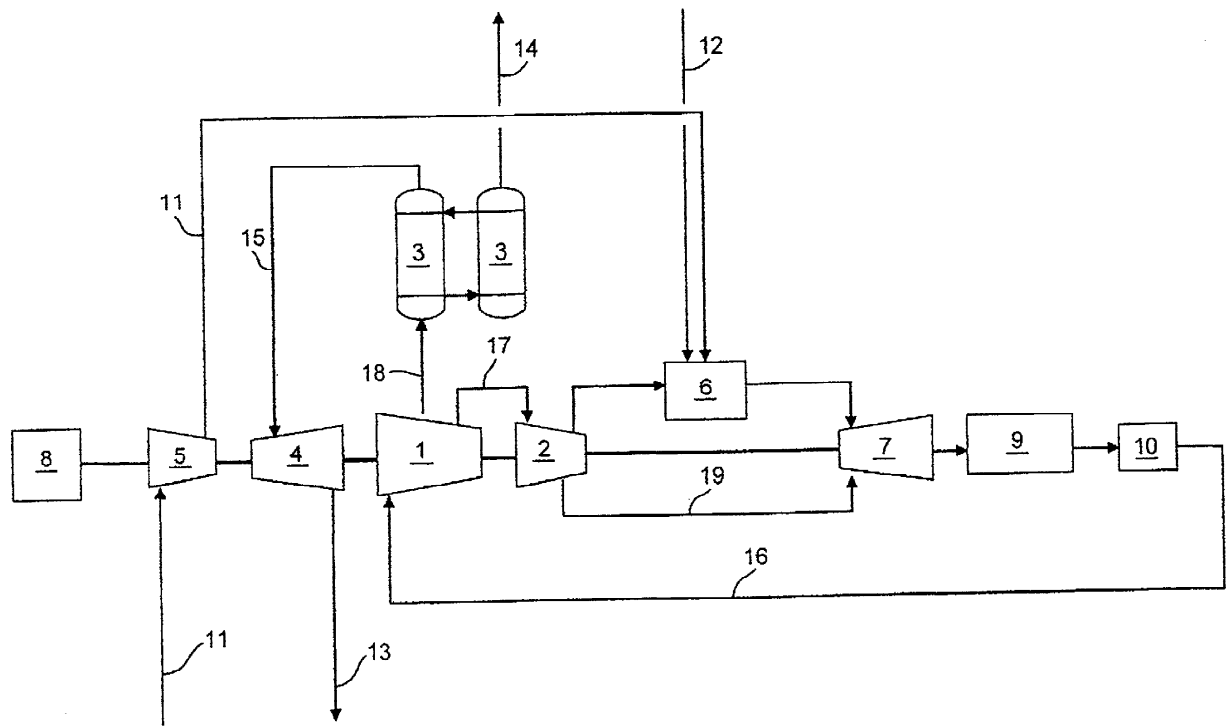
увеличивают давление окружающего воздуха, подаваемого в газовый компрессор;

подают сжатый окружающий воздух, сжатые выхлопные газы и топливо (12) в камеру (6) сгорания газа;

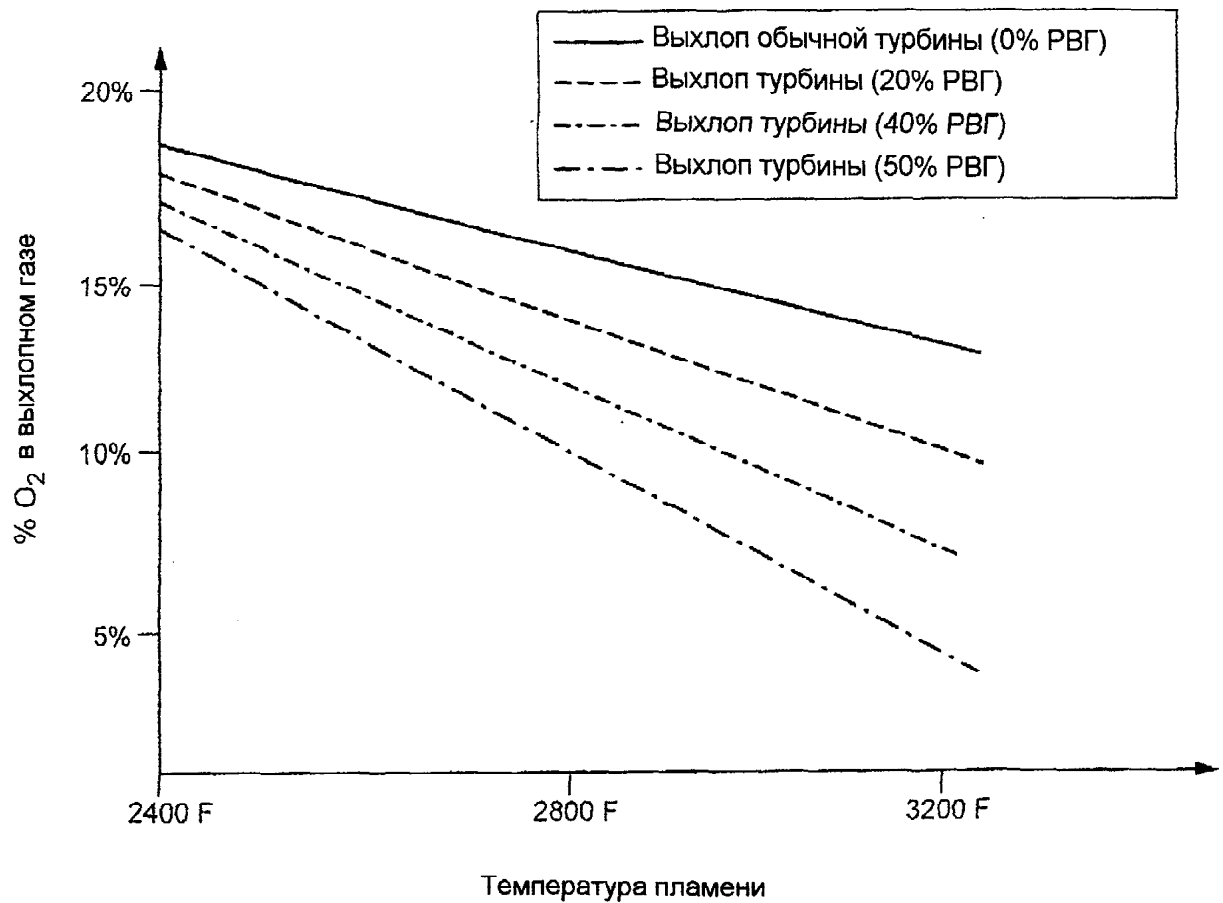
сжигают сжатый окружающий воздух, сжатые выхлопные газы и топливо (12) с образованием высокотемпературного потока (37) выхлопного газа, имеющего меньше чем приблизительно 4% кислорода по объему;

подают высокотемпературный выхлопной газ в газотурбинный двигатель, расположенный ниже по потоку от камеры (6) сгорания газа, причем газотурбинный двигатель соединен с электрогенератором (8) для выработки электричества; и

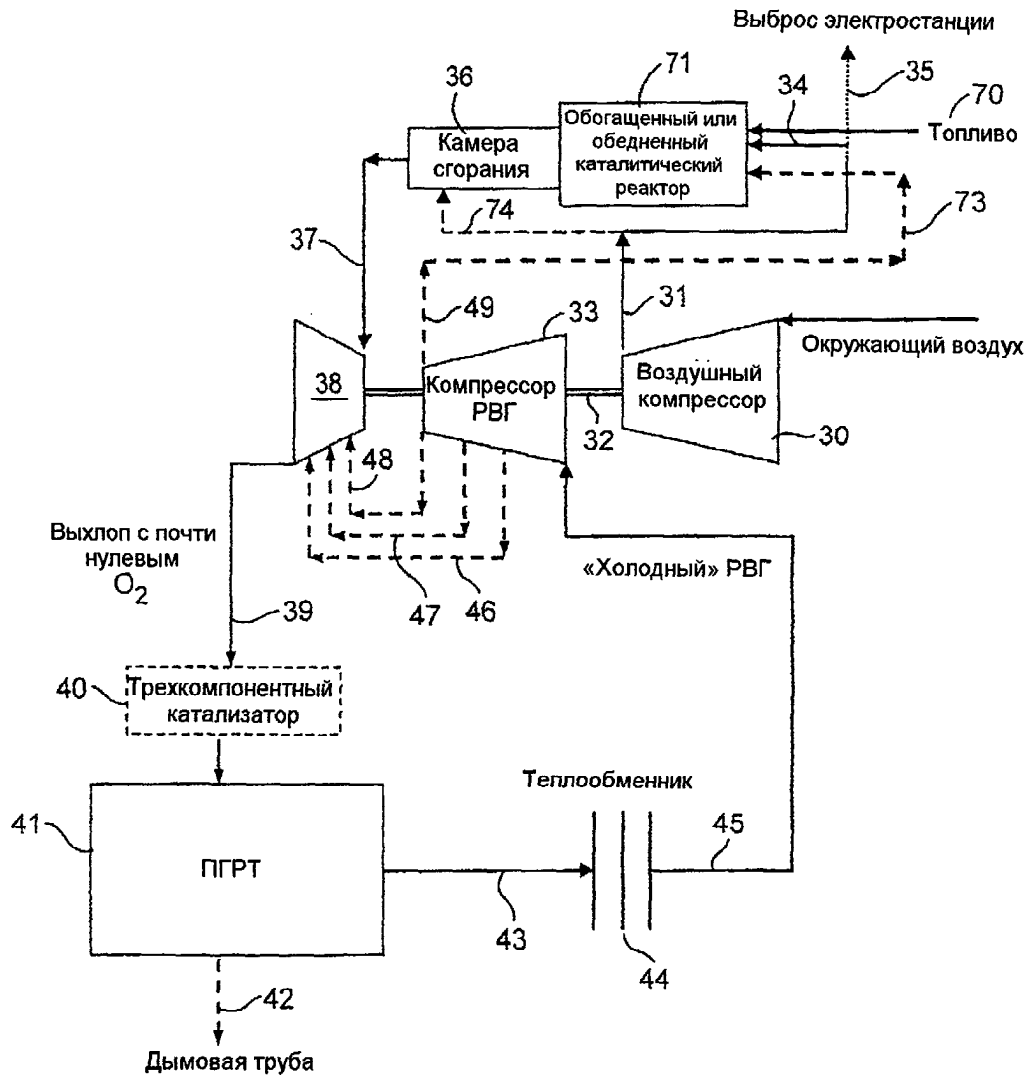
приводят в контакт частично отработанный выхлопной газ из газотурбинного генератора с трехкомпонентным катализатором, расположенным ниже по потоку от газотурбинного двигателя, причем трехкомпонентный катализатор выполнен с возможностью удаления, по существу, всех компонентов  $\text{NO}_x$ , присутствующих в выхлопном газе.



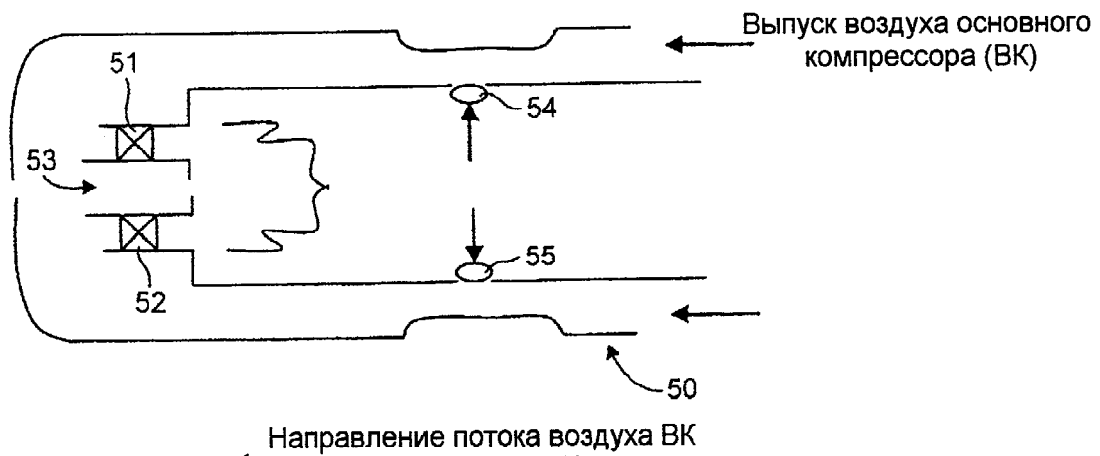
Фиг.1



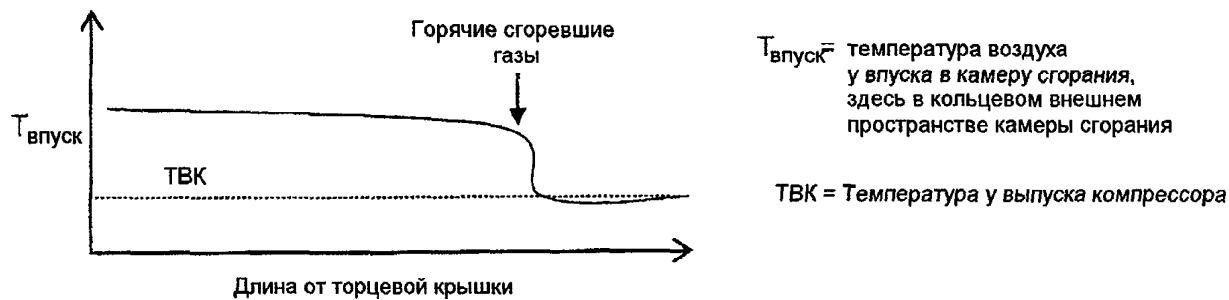
Фиг.2



Фиг.4

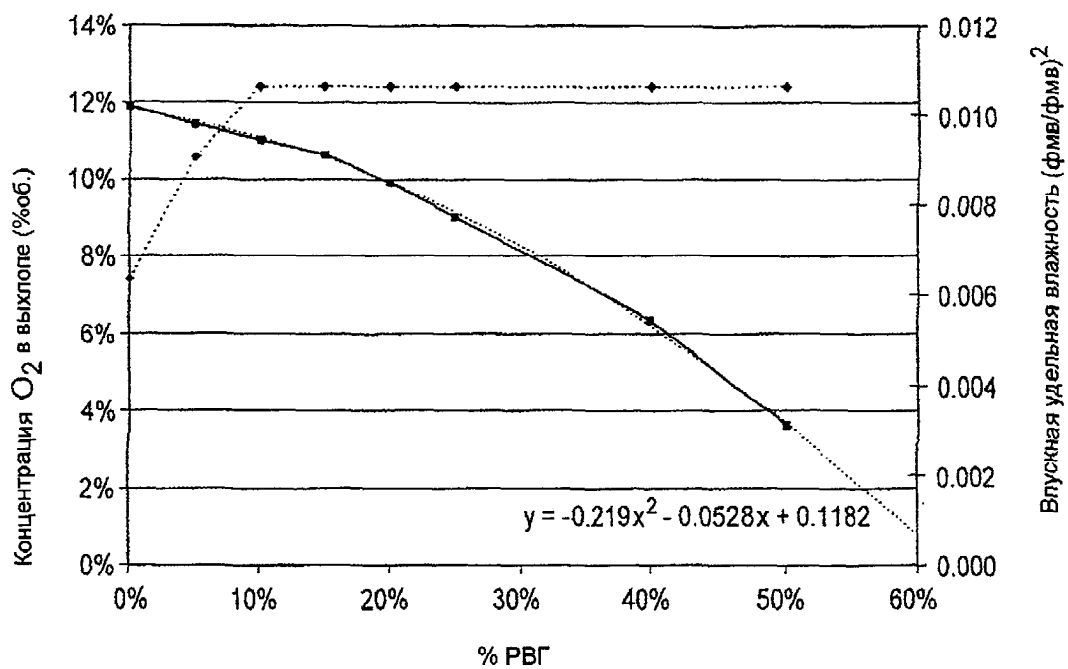


Фиг.5А



Фиг.5В

Влияние РВГ на газовую турбину @ ISO в дневных условиях<sup>1</sup>

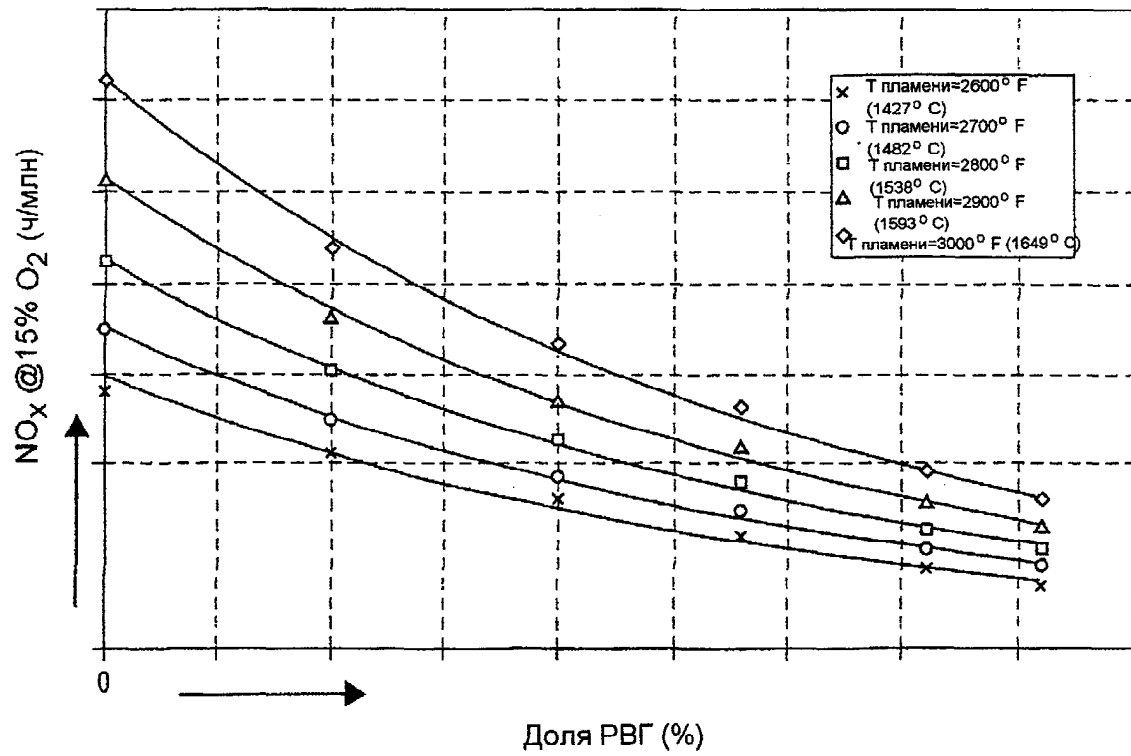


<sup>1</sup> Дневные условия международной организации по стандартизации (ISO), т.е. 59°F (15°C) на уровне моря

<sup>2</sup> Фунты массы воды/фунты массы воздуха

—■—  $O_2$  - впуск приведен к 59°F (15°C)  
 ...◆... Впускная удельная влажность

Фиг.6



Фиг.7