

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **046069**

(13) **B9**

(12) **ИСПРАВЛЕННОЕ ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К
ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(15) Информация об исправлении
**Версия исправления: 1 (W1 B1)
исправления в формуле: п.1**

(48) Дата публикации исправления
2024.04.23, Бюллетень №4'2024

(45) Дата публикации и выдачи патента
2024.02.05

(21) Номер заявки
202191607

(22) Дата подачи заявки
2021.07.07

(51) Int. Cl. **F23N 1/02** (2006.01)
F23D 14/02 (2006.01)
F23D 14/20 (2006.01)
F23D 14/22 (2006.01)
F23C 5/00 (2006.01)
F23C 5/08 (2006.01)

(54) **СПОСОБ СТУПЕНЧАТОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА И ГОЛОВКА СГОРАНИЯ**

(31) **10 2020 118 325.9**

(32) **2020.07.10**

(33) **DE**

(43) **2022.01.31**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
ЭЛКО БЁРНЕРС ГМБХ (DE)

(56) **US-A-4395223**
US-A-5215455
US-A-3729285
CN-A-109611835
CN-A-110822430
CN-A-108397772
CN-A-108613181

(72) Изобретатель:
**Шмидт Томас, Ханка Кэтлин,
Крецшмар Ронни, Тобиас Штефан Х.
(DE)**

(74) Представитель:
**Поликарпов А.В., Соколова М.В.,
Путинцев А.И., Черкас Д.А., Игнатъев
А.В., Билык А.В., Дмитриев А.В.,
Бучака С.М., Бельтюкова М.В. (RU)**

(57) В изобретении предложен способ ступенчатого сжигания топлива при подаче воздуха (28) для сжигания топлива в трубу (12) горелки. Для образования первичного пламени (24) внутрь трубы горелки подают начальное количество топлива. Для образования фронта основного пламени (26) ниже по потоку подают второе количество топлива. Основное пламя (26) стабилизируется ниже по потоку от трубы (12) горелки и на расстоянии от нее. Подачу топлива выполняют так, чтобы первичное пламя (24) горело со стехиометрией более 1,5, в частности более 2,0.

B9

046069

046069

B9

Изобретение относится к способу ступенчатого сжигания топлива и к головке сгорания для ступенчатого сжигания топлива.

При сжигании ископаемого топлива в топочных установках помимо других продуктов сгорания образуются оксиды азота, например, NO (монооксид азота), NO₂ (диоксид азота). Далее обобщенно будет говориться только о NO. На эти и другие выбросы загрязняющих веществ можно влиять, а также сокращать количество указанных выбросов, с помощью конструктивных мер в горелках. Механизмы реакции, приводящие к образованию таких оксидов азота, широко известны и обычно заключаются в термическом и быстром образовании NO, которое также описывают как образование NO в результате окисления химически связанного азота в топливе.

Известно, что термический NO, согласно так называемому механизму Зельдовича, зависит, с одной стороны, от времени пребывания реагентов в зоне горения, а с другой стороны - в значительной степени от самой температуры горения. Температура горения связана с соотношением λ топлива и воздуха. Максимальная температура горения обеспечивается при соотношении топлива и воздуха $\lambda=1$. Это также называется стехиометрическим соотношением. Оно обозначает, что в воздухе для сжигания топлива имеется именно такое количество кислорода, что топливо будет сгорать полностью. При соотношении топлива и воздуха $\lambda<1$ говорят о богатой смеси, т.е. смеси, в которой имеется слишком много топлива. При соотношении топлива и воздуха $\lambda>1$ смесь считается обедненной, содержащей избыток воздуха. В обоих указанных случаях температуры горения снова снижается, и, таким образом, образуется меньше термического NO.

Кроме термического NO немаловажную роль играет также образование быстрых оксидов азота NO_x. Быстрый NO образуется с помощью углеводородных радикалов CH, которые образуются на промежуточной фазе в пламени и присутствуют в качестве промежуточных продуктов при сгорании углеродистого ископаемого топлива. Радикалы CH вступают в реакцию с атмосферным азотом с образованием синильной кислоты (HCN), которая далее образует NO в очень быстрых реакциях образования. Проверенным способом подавления образования свободных радикалов CH и, следовательно, образования быстрого NO, является обедненное горение или горение гиперстехиометрической смеси. Обедненным горением называют горение с избытком воздуха, т.е. при $\lambda>1$.

Быстрый NO возникает в небольших количествах по сравнению с термическим NO, но играет важную роль в снижении образования NO, особенно в областях применения с ультранизким содержанием NO.

Также известно, что рециркуляция, или обратное течение, отработавших газов, образующихся при горении, положительно влияет на снижение образования оксидов азота. Рециркулирующий охлажденный отработавший газ снижает как температуру пламени, так и парциальное давление O₂ (кислорода) в зоне горения. Оба эффекта способствуют снижению образования NO. Тем не менее, подмешивание все большего количества отработавших газов приводит к дестабилизации процесса непрерывного горения.

В патентных документах EP 1754937 B1 и EP 2037173 B1 представлены головки сгорания, с помощью которых достигают снижения количества NO. В этих устройствах происходят одноступенчатые процессы сжигания, которые лишь в ограниченной степени допускают дальнейшую оптимизацию режима образования NO и стабилизацию пламени. В патентном документе DE 19509219 A1 представлена головка сгорания для двухступенчатого сжигания с использованием гиперстехиометрической газовой смеси в первой ступени и гипостехиометрической газовой смеси во второй ступени.

В головке сгорания обычно различают так называемые зоны смешивания и так называемые зоны горения.

В зоне смешивания смешиваются разные текучие среды, которые (еще) не сгорели. В зоне смешивания обычно не выполняются условия, которые необходимы для горения. Это возможно, например, если скорость потока воспламеняющейся смеси значительно выше скорости пламени.

Зона горения - это область, в которой существуют условия, необходимые для горения. Зона горения существует, когда имеется воспламеняющаяся смесь (например, смесь топлива с воздухом для сжигания топлива, смесь топлива с воздухом для сжигания топлива и отработавшими газами, смесь топлива с окислителем, смесь топлива с окислителем и отработавшими газами), скорость потока воспламеняющейся смеси и скорость пламени практически равны, и обеспечена температура, равная температуре воспламенения воспламеняющейся смеси или превышающая ее. Более общее понятие "окислитель" включает понятия "воздух для сжигания топлива", а также включает, например, понятие "воздух окружающей среды, обогащенный дополнительным кислородом". В областях, где данные условия не выполняются, воспламенение или горение невозможно. Зоны смешивания часто переходят в зоны горения без четкого пространственного разделения.

В связи с указанными и другим причинами имеется необходимость в данном изобретении. Задачей данного изобретения может являться обеспечение возможности отказа от внешних мер по снижению NO, например, от внешней рециркуляции отработавших газов. Задачей данного изобретения может являться поддержание как можно более низкого энергопотребления. Задачей данного изобретения может являться обеспечение энергетически выгодного сгорания со сведением к минимуму выбросов NO.

Задачи и признаки настоящего изобретения будут очевидны из следующего описания вариантов выполнения, приведенного со ссылкой на прилагаемые чертежи, на которых:

на фиг. 1 весьма схематично изображен вид сбоку головки сгорания;

на фиг. 2 схематично изображен вид в аксонометрии частей головки сгорания со стороны подачи топлива;

на фиг. 3 схематично изображен вид в аксонометрии частей головки сгорания, показанной на фиг. 2, со стороны пламени;

на фиг. 4 схематично изображен вид сбоку головки сгорания;

на фиг. 5 схематично изображен вид в разрезе передней части головки сгорания;

на фиг. 6 схематично изображен вид спереди головки сгорания.

Здесь и далее со ссылкой на чертежи описаны аспекты и варианты выполнения изобретения, на которых для обозначения одинаковых или схожих элементов в целом используются одинаковые или схожие ссылочные позиции. Для обеспечения глубокого понимания одного или более аспектов вариантов выполнения изобретения в последующем описании приведены конкретные детали. Тем не менее, специалисту в данной области может быть очевидно, что один или более аспектов вариантов выполнения изобретения могут быть осуществлены с меньшей степенью детализации. В других случаях для облегчения описания одного или более аспектов вариантов выполнения изобретения элементы показаны схематично. Таким образом, приведенное ниже описание не имеет ограничительного характера. Следует отметить, что изображение различных элементов на чертежах не обязательно соответствует масштабу.

Термины, обозначающие направления, используемые в данном описании со ссылкой на чертежи, например, "верх", "низ", "верхний", "нижний", "левый", "правый", "передний", "задний", "вертикальный", "горизонтальный" и т.д., не должны толковаться в качестве ограничений. Компоненты вариантов выполнения могут быть расположены в нескольких различных ориентациях, и термины, обозначающие направления, используются только в качестве пояснения. Следует понимать, что без отхода от концепции данного изобретения могут быть использованы другие варианты выполнения и могут быть выполнены конструктивные или логические изменения.

Многоступенчатые процессы сжигания уже давно известны на практике. Тем не менее, известные на сегодняшний день подходы не являются достаточными для обеспечения удовлетворения постоянно растущих требований в отношении NO при эксплуатации топочных установок в долгосрочной перспективе. При ступенчатом сжигании в соответствии с данным изобретением возможно более интенсивное снижение NO. При соответствующем регулировании также возможно обеспечить снижение NO в широком диапазоне нагрузок и/или для разных видов топлива и/или для разных камер сгорания.

Предложен способ ступенчатого сжигания топлива при подаче воздуха для сжигания топлива в трубу горелки в соответствии с п.1 формулы изобретения. Топливо может быть газом или жидким топливом. Для образования первичного пламени в трубу горелки подают первое количество топлива. Для образования фронта основного пламени ниже по потоку может быть подано второе количество топлива. Основное пламя стабилизируется ниже по потоку от трубы горелки и находится на расстоянии от нее. Линии подачи топлива выполнены так, чтобы горение первичного пламени происходило при стехиометрическом соотношении более 1,5, в частности, более 2,0. Это позволяет обеспечить очень низкую температуру пламени. При этом практически не образуется быстрый NO. Основное пламя является слабо гиперстехиометрическим. Стехиометрическое соотношение может находиться в диапазоне от 1,03 до 1,18. Температура основного пламени может быть значительно снижена благодаря рециркуляции отработавших газов внутри камеры сгорания.

В одном варианте выполнения возможно регулирование указанного первого количества топлива независимо от указанного второго количества топлива. Это обеспечивает создание гиперстехиометрического первичного пламени в широком диапазоне нагрузок.

В одном варианте выполнения первое количество подаваемого топлива может быть значительно меньше второго количества подаваемого топлива. Указанное первое количество топлива может составлять приблизительно от 3% до 15% от общего количества топлива, т.е. от суммы указанного первого количества топлива и указанного второго количества топлива. Предпочтительно первое количество топлива составляет от 5% до 10% от суммы первого количества топлива и второго количества топлива.

В другом варианте выполнения закручивают часть воздуха для сжигания топлива. Тем самым создают завихренный поток воздуха для сжигания топлива. В область завихренного воздуха подают первую часть первого количества топлива. Это создает закрученную обедненную смесь воздуха и топлива. Это обеспечивает очень хорошее смешивание. В данной области скорость потока высокая, а смесь обеднена, так что условия для воспламенения отсутствуют. На следующем этапе скорость потока закрученной обедненной смеси воздуха и топлива уменьшается. К замедленной закрученной обедненной смеси воздуха и топлива добавляют вторую часть первого количества топлива.

Кроме того, предложена головка сгорания для ступенчатого сжигания топлива в соответствии с п.7 формулы изобретения. Предложенная головка сгорания обеспечивает возможность выполнения вышеуказанного способа. Головка сгорания выполнена с возможностью сжигания первого подаваемого количества топлива в гиперстехиометрическом первичном пламени. Второе подаваемое количество топлива сжигают в слабом гиперстехиометрическом основном пламени.

Предпочтительно имеется возможность регулирования подачи указанного первого количества топлива и подачи указанного второго количества топлива независимо друг от друга, что обеспечивает сгорание с очень низким содержанием оксидов азота в широком диапазоне нагрузок.

На следующих фигурах чертежей показаны примерные варианты выполнения головок сгорания согласно данному изобретению, с помощью которых может быть выполнен предложенный способ ступенчатого сжигания топлива.

На фиг. 1 весьма схематично показан вид сбоку головки 10 сгорания. Головка 10 сгорания содержит трубу 12 горелки, средство 14 завихрения, первые топливные форсунки 16a, 16b, вторые топливные форсунки 18, первую линию 20 подачи топлива и вторую линию 22 подачи топлива. Стрелки указывают направление подачи топлива. В процессе работы внутри средства 14 завихрения образуется гиперстехиометрическое первичное пламя 24, а на расстоянии от головки 10 сгорания образуется основное пламя или фронт 26 основного пламени, причем каждое пламя схематически обозначено значком пламени на фиг. 1. Таким образом, головка 10 сгорания обеспечивает ступенчатое сжигание топлива. Топливо может быть газообразным. Топливо может быть природным газом. Топливо может содержать водород. Кроме использования в качестве чисто газовой горелки, возможна также работа в качестве двухтопливной горелки, в которой наряду с газообразным топливом может сжигаться жидкое топливо. Также возможно выполнение горелки только для жидкого топлива. Дальнейшее описание в целом не ограничивающим образом относится к варианту выполнения в виде газовой горелки.

На фиг. 1 показано, что воздух 28 для сжигания топлива подают в трубу 12 горелки справа. Таким образом, правый конец трубы 12 горелки в данном варианте выполнения изобретения является верхним по потоку концом. Труба 12 горелки может быть по существу цилиндрической. Воздух 28 для сжигания топлива проходит через трубу 12 горелки и выходит из нее на левом открытом конце трубы 12 горелки, в данном варианте выполнения изобретения на нижнем по потоку конце. Фронт 26 основного пламени образуется ниже по потоку от головки 10 сгорания. Здесь находится камера сгорания или топочная камера, которая далее в описании не рассматривается.

Количество топлива, выходящего из первых топливных форсунок 16a, 16b, может быть небольшим по сравнению с количеством топлива, выходящего из вторых топливных форсунок 18. Если в первичном пламени 24 сгорает лишь небольшое количество топлива, сильно превышающее гиперстехиометрическую норму, вторая ступень сжигания с гипостехиометрической нормой не требуется. Поэтому находящееся на расстоянии основное пламя 26 также может быть в целом гиперстехиометрическим. В головке 10 сгорания согласно данному изобретению не создается общая гипостехиометрическая зона горения, как при ступенчатом сжигании с гипостехиометрической и гиперстехиометрическими зонами горения и временем пребывания газов в данных зонах, необходимым для восстановления NO. Предложенный способ предусматривает создание сильно гиперстехиометрического первичного пламени и слабо гиперстехиометрического основного пламени.

Средство 14 завихрения расположено внутри трубы 12 горелки. Средство 14 завихрения может быть открытым с обоих концов. Продольная ось трубы 12 горелки и продольная ось средства 14 завихрения могут быть параллельны или расположены друг над другом, так что средство 14 завихрения расположено по центру внутри трубы 12 горелки и равномерно отстоит радиально от внутренней стенки трубы горелки. Часть воздуха 28 для сжигания топлива проходит снаружи средства 14 завихрения через трубу 12 горелки, а другая часть воздуха 28 для сжигания топлива проходит через средство 14 завихрения.

Средство 14 завихрения содержит завихритель 30, завихряющие лопатки 32 и перфорированную перегородку 34. Завихритель 30 может быть по существу цилиндрическим. Перфорированная перегородка 34 может проходить по существу перпендикулярно продольной оси завихрителя 30 и обеспечивает разделение внутреннего пространства завихрителя 30 на первую область 36 и вторую область 38. Первая область 36 может располагаться выше по потоку относительно второй области 38. Перфорированная перегородка 34 может вызвать понижение давления. Таким образом, она может локально снижать скорость потока ниже по потоку от перфорированной перегородки 34.

Завихряющие лопатки 32 завихрителя могут располагаться только в первой области 36. Вторая область ниже по потоку от перегородки 34 может не иметь завихряющих лопаток 32. Может быть предусмотрено множество завихряющих лопаток 32.

Завихритель 30 может иметь больший диаметр в первой области 36, чем во второй области 38. В месте перехода между первой областью 36 и второй областью 38 может быть выполнен конический участок.

Первые топливные форсунки 16a, 16b расположены внутри завихрителя 30. Они соединены с первой линией 20 подачи топлива. Первая линия 20 подачи топлива обеспечивает возможность регулирования количества топлива/топливного газа, поступающего в первые топливные форсунки 16a, 16b, как показано символом 40 на фиг. 1. Это регулирование является отдельным и независимым от регулирования 42 во второй линии 22 подачи топлива.

Первые топливные форсунки 16a, 16b могут содержать форсунки для первичного топлива, далее называемые также форсунками 16a для первичного газа, расположенными во второй области 38 средства 14 завихрения, расположенной ниже по потоку. Первые топливные форсунки 16a, 16b могут содержать

дополнительные топливные форсунки, далее называемые форсунками для поддерживающего топлива или форсунками 16b для поддерживающего газа, расположенные в первой области 36 средства 14 завихрения, расположенной выше по потоку.

Форсунки 16b для поддерживающего топлива могут быть равномерно расположены между завихряющими лопатками 32. Форсунки 16b для поддерживающего топлива могут быть расположены по существу параллельно продольной оси трубы 12 горелки. Завихряющие лопатки 32 вызывают сильное закручивание воздуха 28 для сжигания топлива. Таким образом, топливо, вытекающее из форсунок 16b для поддерживающего топлива, также называемое поддерживающим газом, высокоэффективно смешивается с частью воздуха 28 для сжигания топлива для первичного пламени 24. В результате получается закрученная смесь топлива и воздуха для сжигания топлива. Подача топлива через форсунки 16b для поддерживающего газа может быть выполнена с возможностью образования закрученной обедненной смеси воздуха и топлива. Форсунки 16b для поддерживающего газа выполнены с возможностью подачи первой части указанного первого количества топлива. Форсунки 16b для поддерживающего газа могут иметь отверстия для подачи топлива. Указанные отверстия могут быть расположены с возможностью по меньшей мере частичной подачи топлива в направлении по существу радиально внутрь, то есть в направлении, по существу перпендикулярном стенке завихрителя 30. Из-за высокой скорости потока закрученного воздуха для сжигания топлива и из-за высокой доли воздуха по сравнению с количеством топлива или газа, в области завихряющих лопаток 32, т.е. в области 36, расположенной выше по потоку, еще не создаются условия для воспламенения вихревой смеси топлива и воздуха для сжигания топлива.

Перегородка 34 может быть выполнена с возможностью замедления закрученной смеси топлива и воздуха для сжигания топлива. Для этого перегородка 34 может иметь отверстия. Для этого перегородка может быть выполнена по существу в виде решетки. Геометрическая форма перегородки 34 может быть выполнена с возможностью уменьшения скорости потока закрученной смеси топлива и воздуха для сжигания топлива, причем не должна значительно нарушаться турбулентность. Перегородка 34 уменьшает абсолютную скорость потока закрученного и предварительно смешанного первичного воздуха, обеспечивая тем самым воспламенение первичного пламени 24, которое в данной области дополнительно обогащается второй долей первого количества топлива.

Форсунки 16a для первичного топлива могут быть равномерно распределены в области 38 ниже по потоку. Таким образом, форсунки 16a для первичного топлива расположены ниже по потоку от перегородки 34 в области с более низкой скоростью потока. Форсунки 16a для первичного топлива могут быть расположены по существу перпендикулярно продольной оси трубы 12 горелки. Форсунки 16a для первичного топлива могут быть равномерно распределены в радиальном кольце. Может быть предусмотрено множество форсунок 16a для первичного топлива. Форсунки 16a для первичного топлива подают в область 38, расположенную ниже по потоку, вторую часть первого количества топлива, которое называется первичным газом, в топливно-воздушную смесь, образованную в лопастной части завихрителя 30 или, другими словами, в первой области 36, с созданием, тем самым, воспламеняющейся смеси для образования первичного пламени 24. Форсунки 16a для первичного топлива могут иметь отверстия для подачи топлива. Указанные отверстия могут быть расположены с боков форсунок 16a для первичного топлива. Боковые отверстия могут быть размещены так, чтобы была обеспечена подача топлива в по существу тангенциальном направлении.

Отношение площади всех отверстий в форсунках 16a для первичного топлива к площади всех отверстий в форсунках 16b для поддерживающего топлива может определять отношение первичного и поддерживающего газа, принимая во внимание линии подачи к форсункам 16a для первичного топлива и форсункам 16b для поддерживающего топлива. Указанное отношение может быть выбрано в зависимости от общей геометрической формы и качества или состава топлива. Указанное отношение может быть примерно 1:1. Приблизительно половина топлива, проходящего через первую линию 20 подачи топлива, может быть подана через форсунки 16a для первичного топлива в области 38, и приблизительно половина топлива, проходящего через первую линию 20 подачи топлива, может быть подана через форсунки 16b для поддерживающего топлива в области 36.

Раздельное регулирование первичного и поддерживающего газа выполняют с помощью регулирующего средства 40 в отношении регулирования второго, основного, топлива, протекающего через вторую линию 22 подачи топлива, причем конструкция завихрителя 30, форсунок 16a, 16b для первичного и поддерживающего топлива и перегородки 34 обеспечивают создание первичного пламени 24 со стехиометрией $\lambda \gg 1$ в широком диапазоне нагрузок. В одном варианте выполнения стехиометрия первичного пламени 24 составляет $\lambda > 1,5$. В другом варианте выполнения стехиометрия первичного пламени 24 составляет $\lambda > 2$.

В связи с очень низкими температурами сгорания в первичном пламени 24 практически не образуются термических и быстрых NO.

Тем не менее, такие низкие температуры сгорания всегда приводят к нестабильности пламени, которую требуется предотвратить. Скорость реакции экспоненциально зависит от температуры в зоне пламени и от турбулентности в ней. Скорость реакции снижается из-за несовершенного смешивания топли-

ва и окислителя. Неустойчивость пламени возникает, когда скорость потока в осевом направлении больше, чем турбулентная скорость пламени.

Для стабильного первичного пламени 24 важны предварительная подача поддерживающего газа через форсунки 16b для поддерживающего топлива в закрученный воздух для сжигания топлива и, таким образом, обогащение и предварительное смешивание первичного воздуха с топливом, тип и положение подачи первичного газа, соотношение поддерживающего и первичного газа, а также геометрическая форма и положение перегородки 34 в безлопастной части 38 завихрителя 30 в иллюстрируемом варианте выполнения. Для получения стабильного первичного пламени со стехиометрией больше 1, в частности больше 1,5 или даже больше 2, могут быть предусмотрены другие средства.

Кроме того, цилиндрическая безлопастная часть завихрителя 30, т.е. область 38, показанная на фиг. 1, выполнена так, что в определенной области, которая экранирована от остального воздуха 28 для сжигания топлива, проходящего через трубу 12 горелки за пределами завихрителя 30, образуется первичное пламя 24.

Вторые топливные форсунки 18, также называемые форсунками для основного газа, расположены снаружи средства 14 завихрения и ниже по потоку относительно указанного средства 14 завихрения. Вторые топливные форсунки 18 соединены со второй линией 22 подачи топлива. Вторая линия 22 подачи топлива обеспечивает возможность регулирования количества топлива/топливного газа, поступающего во вторые топливные форсунки 18. Второе количество топлива составляет большую часть от общего количества топлива и, таким образом, также называется основным количеством топлива или основным газом. Регулирование основного газа обозначено символом 42 на фиг. 1.

Вторые топливные форсунки 18 расположены внутри трубы 12 горелки. Вторые топливные форсунки 18 могут быть расположены на нижнем конце трубы 12 горелки и оканчиваться в ней. Вторые топливные форсунки 18 могут быть равномерно разнесены по внутренней окружности трубы 12 горелки. На фиг. 1 не показан кольцевой дельта-диск, который может заполнять промежуток между трубой 12 горелки и вторыми топливными форсунками 18 на нижнем конце трубы горелки. Более подробно дельта-диск описан со ссылкой на фиг. 4-6.

Вторые топливные форсунки 18 могут быть выполнены с возможностью обеспечения высокой скорости выпуска топлива. Возникающий импульс переносит топливо как можно дальше в камеру сгорания, образуя зону горения, удаленную от головки 10 сгорания. Основной газ может быть подан по существу в направлении потока, то есть параллельно продольной оси трубы 12 горелки. Для этого вторые топливные форсунки 18 могут иметь отверстие на лицевой стороне. Отверстие на торцевой стороне может быть образовано дроссельной шайбой. При указанном варианте выполнения вторых топливных форсунок 18 образуется основное пламя или фронт 26 основного пламени, который находится на расстоянии от нижнего конца головки 10 сгорания и стабильно создается в камере сгорания, которая подробно не показана. Основное пламя 26 может иметь тонкую и удлиненную форму благодаря расположению вторых топливных форсунок соосно с направлением вытекания относительно оси трубы горелки. Внутренняя рециркуляция отработавших газов, более подробно рассмотренная ниже, может вводить отработавшие газы в горячие зоны основного пламени 26 и, таким образом, в области, где возникает наибольшее количество NO. Это снижает образование NO в основном пламени.

Подача топлива может быть выполнена и настроена так, что энергия воспламенения для расположенного на расстоянии основного пламени 26, передаваемая от первичного пламени и рециркулирующих отработавших газов, обеспечивает воспламенение смеси основного топлива, воздуха для сжигания топлива или в целом окислителя и рециркулирующих отработавших газов и протекание непрерывных, стабильных реакций окисления.

Оба газовых соединения, т.е. линия 20 подачи топлива для первичного и поддерживающего газа для первичного пламени 24 и линия 22 подачи топлива для основного газа для основного пламени 26, в показанном варианте выполнения отдельно регулируют средствами 40 и 42 регулирования газа. В результате этого имеется возможность независимого регулирования количества газа в первичном пламени 24 и в основном пламени 26 и, таким образом, возможно индивидуальное регулирование стехиометрии в соответствующей зоне горения. Это обеспечивает установку стабильной и гиперстехиометрической первичной зоны горения и, таким образом, образования первичного пламени 24, практически не содержащего NO, в широком диапазоне нагрузок, а также обеспечивает приспособление к различным камерам сгорания.

На фиг. 2 схематично показан вид в аксонометрии частей головки 10а сгорания со стороны линии подачи топлива. Головка 10а сгорания может иметь те же признаки, которые описаны для головки 10 сгорания, показанной на фиг. 1. Головка 10а сгорания может представлять собой один из вариантов выполнения головки 10 сгорания. Поэтому используются те же ссылочные обозначения, что и на фиг. 1. Описание фиг. 2 по существу ограничено деталями, которые не видны на изображении, представленном на фиг. 1. На фиг. 2 труба 12 горелки не показана.

Вторая линия 22 подачи топлива головки 10а сгорания выполнена в виде трубы, имеющей соединительный фланец 44, который предназначен для соединения с линией подачи топлива. От второй линии 22 подачи топлива отходят меньшие трубки 46, или трубки 46 подачи основного газа. Трубки 46 подачи

основного газа направляют топливо из второй линии 22 подачи топлива ко вторым топливным форсункам 18 и оканчиваются ими. В проиллюстрированном варианте выполнения изобретения головка 10а сгорания содержит шесть вторых топливных форсунок 18. Трубки 46 подачи основного газа выходят за пределы завихрителя 30.

Вторая линия 22 подачи топлива переходит в топливную трубу 48, которая может проходить по центру через завихритель 30 параллельно продольной оси завихрителя 30. Топливная труба 48 предпочтительно имеет конфигурацию центральной топливной трубы. Топливная труба 48 направляет основной газ в первую область, расположенную выше по потоку. Ниже по потоку от ответвления трубок 46 подачи основного газа установлена газоразделительная пластина 50, которая отделяет вторую линию 22 подачи топлива от расположенной ниже по потоку топливной трубы 48. Газоразделительная пластина 50 расположена во второй линии 22 подачи топлива/топливной трубе 48 по существу перпендикулярно продольной оси второй линии 22 подачи топлива/топливной трубы 48.

Ниже по потоку от газоразделительной пластины 50 первая линия 20 подачи топлива открывается в топливную трубу 48. Таким образом, топливная труба 48 выполнена с возможностью направления первого количества топлива ниже по потоку от газоразделительной пластины 50. Ниже по потоку от газоразделительной пластины 50 отходят меньшие трубки 52, так называемые трубки подачи поддерживающего газа. Трубки 52 подачи поддерживающего газа направляют топливо из первой линии 20 подачи топлива к форсункам 16b для поддерживающего газа. В проиллюстрированном варианте выполнения головка 10а сгорания содержит три форсунки 16b для поддерживающего газа. Форсунки 16b расположены внутри завихрителя 30. Кроме того, рядом с форсунками 16b для поддерживающего газа показаны завихряющие лопатки 32.

На фиг. 2 также показана примерная форма завихрителя 30. В первой области 38 с завихряющими лопатками 32 и форсунками 16b для поддерживающего газа завихритель 30 имеет цилиндрическую форму с первым диаметром. Во второй области 38 без завихряющих лопаток завихритель 30 имеет цилиндрическую форму со вторым диаметром. В одном варианте выполнения указанный первый диаметр больше указанного второго диаметра. Далее обе области 36, 38 могут быть соединены друг с другом с помощью конической области.

Завихритель 30 подвижно установлен на топливной трубе 48 поверх внутренней трубы 54 завихрителя, что обеспечивает, например, приспособление к различным геометрическим формам камеры сгорания и параметрам процесса. Путем перемещения завихрителя 30 в осевом направлении на топливной трубе 48, в определенных пределах можно изменять соотношение между количеством воздуха, проходящего через завихритель 30, и количеством воздуха, выходящего из промежутка, образованного наружным диаметром завихрителя в области 38 и внутренним диаметром дельта-диска 66.

Несмотря на то, что труба 12 горелки не показана на фиг. 2, следует понимать, что воздух 28 для сжигания топлива проходит спереди справа назад налево, согласно изображению на фиг. 2, как через завихритель 30, так и снаружи завихрителя 30. Трубки 46 подачи основного газа расположены в воздушном потоке.

На фиг. 3 схематично показан вид в аксонометрии головки 10а сгорания со стороны пламени. Детали, уже описанные со ссылкой на фиг. 1 и 2, далее подробно не описываются. Все описанные до сих пор признаки также применимы к головке 10а сгорания, показанной на фиг. 3. На фиг. 3 коническая часть завихрителя 30 не показана, а части завихрителя 30, окружающие расположенную ниже по потоку область 38, отсечены, чтобы можно было показать части, находящиеся внутри завихрителя 30. Как и на фиг. 2, труба 12 горелки не показана.

Для запуска процесса горения может быть предусмотрено прямое электрическое зажигание 56, которое используется только для (например, первоначального) воспламенения. После образования и стабилизации пламени дальнейшее воспламенение топливно-воздушной смеси происходит в результате обратного воздействия пламени. В одном варианте выполнения средство 56 воспламенения прикреплено к одной из форсунок 16b для поддерживающего газа.

В проиллюстрированном варианте выполнения топливная труба 48 оканчивается ниже по потоку в цилиндрическом распределителе 58 топлива. Распределитель 58 топлива может также называться распределителем 58 первичного газа, поскольку в данном случае по топливной трубе 48 проходит только первичный газ. В распределителе 58 первичного газа в рассматриваемом варианте выполнения изобретения на окружной поверхности распределителя 58 первичного газа радиально расположены четыре форсунки 16а для первичного газа. Форсунки 16а для первичного газа расположены равномерно и направлены от топливной трубы 48 или распределителя 58 первичного газа в сторону трубы 12 горелки, которая не показана.

Форсунки 16а для первичного газа могут иметь отверстия 60. Каждая форсунка 16а для первичного газа может иметь несколько отверстий 60. Показаны два отверстия 60. Тем не менее, указанных отверстий может быть больше или меньше. Указанные отверстия 60 расположены в форсунках 16а для первичного газа так, что первичный газ выходит по существу в тангенциальном направлении. Ориентация отверстий 60 может быть согласована с расположением и конструкцией завихряющих лопаток 32 так, что первичный газ выходит вместе с потоком смеси топлива и воздуха для сжигания топлива, закручен-

ным в первой области 36. Первичный газ выходит из боковых отверстий в тангенциальном направлении, которое определяется направлением вихря. Дополнительно или как вариант, форсунки 16а для первичного газа могут иметь осевое отверстие, из которого также выходит первичный газ.

Вторые топливные форсунки 18, или форсунки для основного газа, расположены по окружности вокруг нижнего конца завихрителя 30. В их торцевых поверхностях имеются отверстия 62. Указанные отверстия 62 выполнены с возможностью обеспечения высокой скорости выхода основного газа, так чтобы фронт 26 основного пламени образовывался на расстоянии от головки сгорания.

На фиг. 4 схематично показан вид сбоку головки 10b сгорания. Головка 10b сгорания может соответствовать головке 10 сгорания и/или головке 10а сгорания. Детали, уже описанные со ссылкой на фиг. 1-3, далее подробно не описываются. На виде сбоку отдельные детали отсечены, чтобы лучше показать подробности. Часть завихрителя 30, обращенная к пользователю, отсечена, чтобы показать внутреннюю конструкцию. Область входа первой линии 20 подачи топлива в топливную трубу 48 показана в разрезе.

На виде сбоку, проиллюстрированном на фиг. 4, показаны отверстия 64 в форсунках 16а для первичного газа. Указанные отверстия 64 выполнены с возможностью подачи топлива в направлении по существу радиально внутрь. Дополнительно или как вариант, форсунки для первичного газа могут иметь осевые отверстия.

На фиг. 4 также показана труба 12 горелки. Труба 12 горелки может оканчиваться на своем нижнем конце кольцевым дельта-дисксом 66, проходящим радиально внутрь от трубы 12 горелки. В проиллюстрированном варианте выполнения изобретения дельта-дискс 66 содержит направляющие средства 68, проходящие радиально внутрь. Отверстия вторых топливных форсунок 18 могут быть расположены вровень с дельта-дисксом 66. Конструкция дельта-диска 66, описанная подробнее со ссылкой на фиг. 6 обеспечивает возможность внутренней рециркуляции отработавших газов в основном пламени 26. Рециркуляция может быть выполнена с помощью той части воздуха 28 для сжигания топлива, которая проходит мимо средства 14 завихрения и попадает непосредственно на кольцевую часть кольцевого дельта-диска 66. В результате на нижней стороне направляющих средств 68, то есть на стороне направляющих средств 68, обращенной к камере сгорания, образуются зоны отрицательного давления и вихревые области. Рециркулируемые таким образом отработавшие газы подают в горячие зоны основного пламени 26. В этих зонах рециркулирующий отработавший газ снижает температуру и парциальное давление O_2 . Оба эффекта способствуют снижению образования NO или образованию NO.

Количество топлива, выходящее из форсунок 16а для первичного газа и форсунок 16b для поддерживающего газа, мало по сравнению с количеством топлива, выходящего из вторых топливных форсунок 18. Предпочтительно оно составляет от 3% до 15%, более предпочтительно от 5% до 10% от общего количества топлива.

В вариантах выполнения избыток воздуха, необходимый для полного сгорания частей топлива, поступающих из форсунок 16а для первичного газа, форсунок 16b для поддерживающего газа и топливных форсунок 18, может составлять от 1,075 до 1,2. Зоны горения первичного пламени и расположенного на расстоянии от него основного пламени являются гиперстехиометрическими. Локально, из-за наличия потока топлива, поступающего в камеру сгорания в осевом направлении от вторых топливных форсунок 18, могут образовываться гипостехиометрические зоны до того, как топливный газ и воздух, а также рециркулирующий отработавший газ перемешаются в достаточной степени.

Снижение значений NO является результатом чрезвычайно низкого содержания NO при сгорании в частично предварительно смешанном очень обедненном первичном пламени в сочетании с расположенным на расстоянии от него основным пламенем, которое, благодаря интенсивному перемешиванию рециркулирующих внутри отработавших газов, а также снижению парциального давления O_2 в смеси, не может образовывать нежелательные высокие температуры для образования NO. Преимуществом является образование тонкого, но, тем не менее, не слишком длинного пламени, которое эффективно передает тепло, выделяющееся при горении топлива, от преобразования химической энтальпии к охлажденным окружающим стенкам камеры сгорания путем излучения и конвекции.

На фиг. 5 схематично показан разрез передней части головки 10b сгорания. Детали, уже описанные со ссылкой на фиг. 1-4, далее не описываются подробно.

Видна внутренняя труба 54 завихрителя, которая проходит поверх топливной трубы 48. Таким образом, завихритель выполнен с возможностью продольного перемещения и может быть зафиксирован в нужном положении винтом 70. Возможностью перемещения обеспечивает лучшее приспособление к разным камерам сгорания, в которых образуется фронт 26 основного пламени.

Перфорированная перегородка 34 расположена в области 38. Перфорированная перегородка 34 расположена и выполнена так, что в описанном варианте выполнения изобретения первичное пламя 24 надежно стабилизируется или удерживается в области 38 завихрителя 30.

На фиг. 6 схематично показан вид спереди головки 10b сгорания со стороны пламени, или, другими словами, со стороны камеры сгорания. В центре расположен распределитель 58 топлива, от которого отходят форсунки 16а для первичного газа с отверстиями 60. За ним расположена перфорированная перегородка 34. В проиллюстрированном варианте выполнения изобретения перфорированные отверстия выполнены в виде двух концентрических рядов отверстий, причем отверстия являются круглыми. Следу-

ет понимать, что перфорированные отверстия могут иметь и другую форму. Кроме того, отношение площадей указанных отверстий к общей площади может быть иным, чем показанное на чертеже. Перфорированная перегородка 34 служит для уменьшения скорости потока закрученной смеси воздуха и топлива в области 36 завихрителя 30. Перегородка 34 ограничена стенкой завихрителя 30. За ней через отверстия видны форсунки 16b для поддерживающего газа.

По окружности вокруг центральной оси завихрителя 30 через равные промежутки расположены вторые топливные форсунки 18 с отверстиями 62 в них. По окружности расположен кольцевой дельта-диск 66, который закрывает трубу 12 горелки. От внутренней окружности дельта-диска 66 радиально внутрь отходят направляющие средства 68. В проиллюстрированном варианте выполнения изобретения предусмотрено три направляющих средства 68. Три направляющих средства 68 равномерно распределены по внутренней окружности. Головка 10b сгорания может также содержать больше или меньше направляющих средств 68, которые также могут быть равномерно распределены по внутренней окружности. В проиллюстрированном варианте выполнения направляющие средства 68 имеют треугольную форму с вершиной, направленной внутрь в радиальном направлении. Треугольники имеют вершину, направленную в сторону от кольцевого дельта-диска 66. Как показано на фиг. 5, направляющие средства 68 не лежат в плоскости чертежа фиг. 6, а направлены в сторону от завихрителя 30 и расположены под углом.

Направляющие средства 68 с дельта-диском 66 выполнены так, что образуется зона отрицательного давления, которая обеспечивает выход отработавших газов из камеры сгорания. Таким образом, дельта-диск 66 и направляющие средства 68 обеспечивают внутреннюю рециркуляцию отработавших газов. Конструкция в виде наклонного треугольника, направленного в сторону от завихрителя, обеспечивает образование на направляющих средствах 68 "стоячих вихрей", которые помогают стабилизировать фронт 26 основного пламени. Следовательно, рециркулирующие отработавшие газы инжестируются в горячие зоны основного пламени и, таким образом, в зоны, где образуется наибольшее количество NO.

Геометрическая форма направляющих средств 68 оптимизирована для втягивания как можно большего количества внутреннего отработавшего газа в основное пламя 26. Количество и геометрическая форма направляющих средства 68 должны быть учтены как для эффекта снижения NO, так и для создания стабильного основного пламени.

Кольцевой дельта-диск 66 может иметь на своей внутренней окружности выступы 72 между направляющими средствами 68. Выступы 72 образуют зубчатую геометрическую форму. На фиг. 6 показаны полукруглые выступы, но зубцы могут иметь и другую геометрическую форму. Зубцы 72 выполнены с возможностью обеспечения большей площади поверхности. Большая площадь поверхности обеспечивает увеличение площади контакта между отработавшими газами, воздухом для сжигания топлива и основным топливом, с созданием более интенсивного и равномерного перемешивания смеси топлива, воздуха и отработавших газов. В результате, в основном пламени 26 может быть получено более равномерное распределение зон горения, обогащенных отработавшим газом и, таким образом, более благоприятных в стехиометрическом отношении. Авторы обнаружили, что это еще больше снижает общее образование термического NO.

Как упоминалось выше, вторые топливные форсунки 18 имеют форму, которая обеспечивает достижение максимально возможной скорости на выходе. Для этого перед осевым отверстием топливной форсунки может быть установлена дроссельная шайба. Высокий импульс выходящего газа может еще больше увеличить интенсивность перемешивания отработавших газов с внутренней рециркуляцией и топлива. Дальнейшая оптимизация обеспечена благодаря размещению вторых топливных форсунок 18 с учетом геометрической формы направляющих средств 68. Вторые топливные форсунки 18 равномерно расположены между направляющими средствами 68.

В процессе эксплуатации обеспечивается преимущество, состоящее в том, что горения с низким содержанием азота достигают путем подачи воздуха 28 для сжигания топлива сначала в трубу 12 горелки с открытым нижним концом. Часть воздуха 28 для сжигания топлива закручивают в средстве 14 завихрения, расположенном в трубе 12 горелки. Непосредственно в завихрителе 30 подают первое количество топлива, где оно смешивается с закрученным воздухом 28 для сжигания топлива. В закрученной смеси топлива и воздуха для сжигания топлива внутри завихрителя образуется первичное пламя. Ниже по потоку от средства 14 завихрения подают второе количество топлива. Образуется фронт основного пламени, который стабилизируется ниже по потоку от трубы горелки и на расстоянии от нее. В данном случае первое количество топлива регулируют независимо от второго количества топлива.

Раздельное регулирование подачи топлива позволяет обеспечить очень низкие выбросы NO в широком диапазоне нагрузок. При низкой нагрузке оптимальным может быть другое отношение первого и второго количеств топлива, чем при высокой нагрузке. Если отношение двух количеств топлива друг к другу фиксировано, низкие выбросы NO не могут быть гарантированы во всем диапазоне нагрузки горелки. В головке сгорания согласно данному изобретению, например, при низкой нагрузке может подаваться меньше первичного газа/поддерживающего газа в процентном отношении от основного газа, чем при высокой нагрузке. В случае нераздельного регулирования первое количество топлива уменьшается пропорционально меньше при низких нагрузках, чем количество воздуха, проходящего через завихри-

тель, так что выбросы NO могут увеличиваться при низких нагрузках даже при гиперстехиометрическом первичном пламени.

Несмотря на то что были показаны и описаны конкретные варианты выполнения изобретения, специалистам в данной области ясно, что конкретные показанные и описанные варианты выполнения могут быть заменены на альтернативные и/или эквивалентные варианты выполнения без отступления от основной идеи данного изобретения. Данная заявка предназначена для охвата любых адаптации или вариаций конкретных вариантов выполнения, рассмотренных в данном документе.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ ступенчатого сжигания топлива при подаче воздуха (28) для сжигания топлива в трубу (12) горелки, в котором

подают первое количество топлива для образования сильно гиперстехиометрического первичного пламени (24) внутри трубы (12) горелки,

подают второе количество топлива ниже по потоку для образования слабо гиперстехиометрического основного пламени (26) в камере сгорания, причем температуру основного пламени (26) снижают с помощью отработавших газов, рециркулирующих внутри камеры сгорания, при этом основное пламя (26) стабилизируется ниже по потоку от трубы (12) горелки и на расстоянии от нее,

причем стехиометрия сильно гиперстехиометрического первичного пламени (24) составляет более 1,5, при этом стехиометрия слабо гиперстехиометрического основного пламени (26) составляет от 1,03 до 1,18.

2. Способ по п.1, в котором дополнительно регулируют первое количество топлива независимо от регулирования второго количества топлива, причем указанное регулирование выполняют так, что первое количество топлива составляет приблизительно от 3 до 15%, предпочтительно от 5 до 10%, от суммы первого и второго количеств топлива.

3. Способ по п.1 или 2, в котором дополнительно

закручивают часть воздуха (28) для сжигания топлива для получения завихренного воздуха для сжигания топлива,

подают первую часть первого количества топлива в область указанного завихренного воздуха для сжигания топлива для обеспечения завихренной обедненной смеси воздуха и топлива,

уменьшают скорость потока завихренной обедненной смеси воздуха и топлива и

подают вторую часть первого количества топлива в замедленную завихренную обедненную смесь воздуха и топлива.

4. Способ по любому из предшествующих пунктов, в котором подачу по меньшей мере части указанной первой части указанного первого количества топлива выполняют в направлении радиально внутрь.

5. Способ по любому из предшествующих пунктов, в котором подачу по меньшей мере части указанной второй части первого количества топлива выполняют в тангенциальном направлении относительно потока закрученной смеси топлива и воздуха для сжигания топлива.

6. Способ по любому из предшествующих пунктов, в котором дополнительно образуют вихри, в частности стоячие вихри, в области подачи второго количества топлива, так чтобы отработавшие газы рециркулировали в горячие зоны фронта (26) основного пламени.

7. Головка (10) сгорания для ступенчатого сжигания топлива для осуществления способа по любому из пп.1-6, содержащая

трубу (12) горелки, выполненную с возможностью прохождения через нее воздуха (28) для сжигания топлива, причем указанная труба (12) горелки имеет открытый конец, расположенный ниже по потоку,

средство (14) завихрения, которое расположено внутри трубы (12) горелки и через которое проходит часть воздуха (28) для сжигания топлива, причем средство (14) завихрения содержит завихритель (30), охватывающий первую и вторую области, и первая область (36) находится выше по потоку, чем вторая область (38), при этом только в первой области расположены завихряющие лопасти (32),

первые топливные форсунки (16a, 16b), расположенные внутри завихрителя (30), для подачи топлива для образования первичного пламени (24) внутри завихрителя (30),

вторые топливные форсунки (18), расположенные ниже по потоку от средства (14) завихрения, для подачи топлива для образования свободного фронта (26) слабо гиперстехиометрического основного пламени, причем указанный фронт (26) основного пламени стабилизируется ниже по потоку от головки (10) сгорания и на расстоянии от нее,

первую линию (20) подачи топлива, соединенную с первыми топливными форсунками (16a, 16b), и вторую линию (22) подачи топлива, соединенную со вторыми топливными форсунками (18), причем завихритель (30) и первые топливные форсунки (16a, 16b) выполнены с возможностью создания сильно гиперстехиометрического первичного пламени (24) со стехиометрией более 1,5, и

кольцевой дельта-диск (66) для внутренней рециркуляции отработавших газов в указанном фронте (26) основного пламени, проходящий радиально внутрь от нижнего по потоку конца трубы (12) горелки и содержащий направленные радиально внутрь направляющие средства (68).

8. Головка сгорания по п.7, выполненная с возможностью независимого регулирования количества топлива, подаваемого, соответственно, через первую линию (20) подачи топлива и через вторую линию (22) подачи топлива.

9. Головка сгорания по п.7 или 8, в которой средство (14) завихрения содержит перфорированную перегородку (34) между первой областью (36) и второй областью (38).

10. Головка сгорания по любому из пп.7-9, в которой первые топливные форсунки (16а, 16б) содержат форсунки (16а) для первичного топлива, расположенные во второй области (38) завихрителя (30), и форсунки (16б) для поддерживающего топлива, расположенные в первой области завихрителя (30).

11. Головка сгорания по п.10, в которой форсунки (16б) для поддерживающего топлива равномерно распределены между завихряющими лопатками (32) и выполнены с возможностью подачи топлива внутрь в радиальном направлении для образования закрученной смеси топлива и воздуха для сжигания топлива.

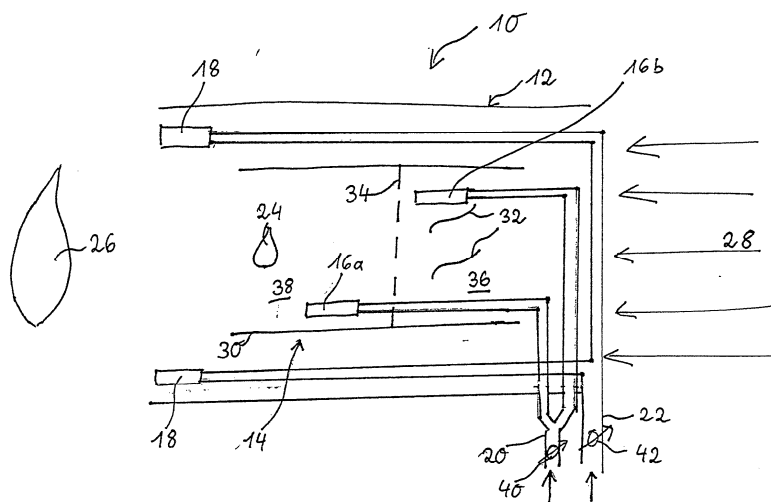
12. Головка сгорания по п.10 или 11, в которой форсунки (16а) для первичного топлива равномерно распределены в радиальном кольце и выполнены с возможностью подачи топлива в тангенциальном направлении с потоком закрученной смеси топлива и воздуха для сжигания топлива.

13. Головка сгорания по любому из пп.7-12, в которой по меньшей мере часть топлива выходит из первых топливных форсунок (16а) через боковые отверстия (60) в указанных первых топливных форсунках.

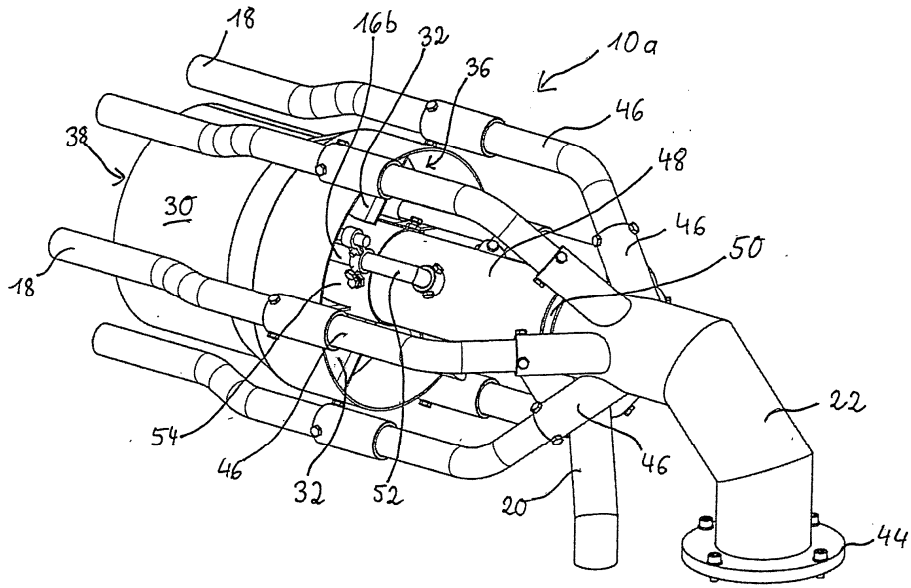
14. Головка сгорания по любому из пп.7-13, в которой первая линия (20) подачи топлива соединена с форсунками (16а) для первичного топлива и форсунками (16б) для поддерживающего топлива с помощью топливной трубы (48) в завихрителе (30), причем указанная топливная труба (48) оканчивается распределителем (58) топлива, к которому присоединены форсунки (16а) для первичного топлива.

15. Головка сгорания по п.14, в которой завихритель (30) расположен на топливной трубе (48) с возможностью продольного перемещения.

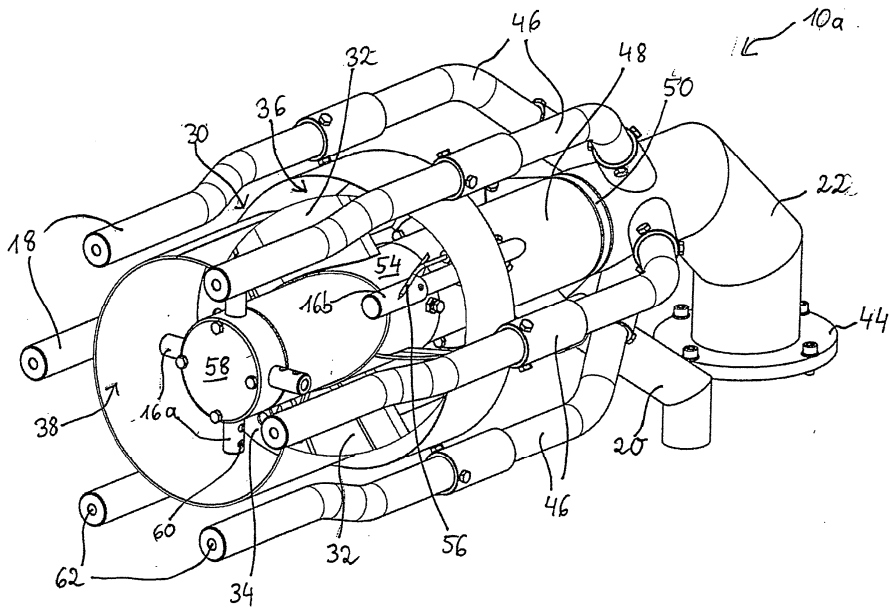
16. Головка сгорания по любому из пп.7-15, в которой кольцевой дельта-диск (66) имеет на своей внутренней окружности выступы (72) между направляющими средствами (68).



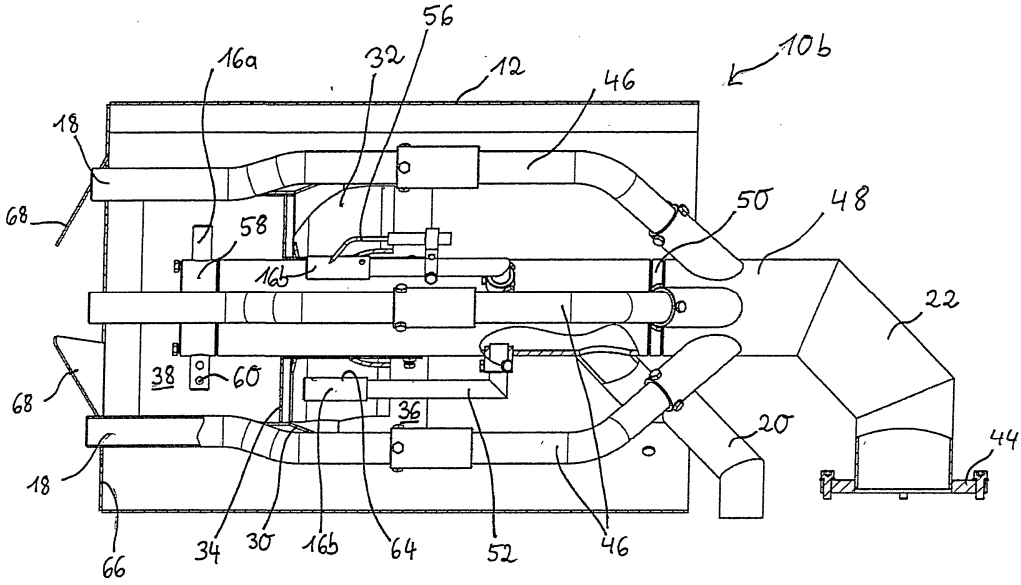
Фиг. 1



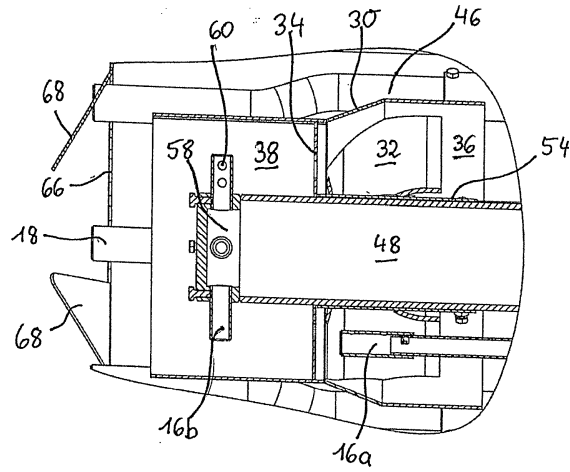
Фиг. 2



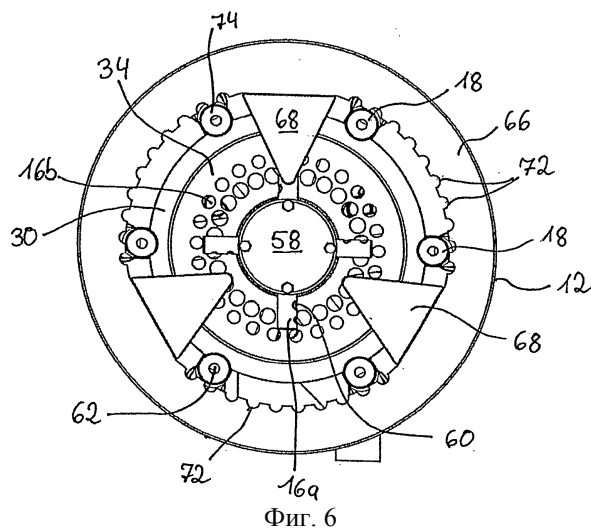
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6

