

РЭСПУБЛІКА БЕЛАРУСЬ



# ПАТЕНТ

НА ВЫНАХОДСТВА

№ 23657

Способ конверсии газа или газовой смеси в электрическом разряде

выдадзены

Нацыянальным цэнтрам інтэлектуальнай уласнасці  
ў адпаведнасці з Законам Рэспублікі Беларусь  
«Аб патэнтах на вынаходствы, карысныя мадэлі, прамысловыя ўзоры»

Патэнтаўладальнік (патэнтаўладальнікі):

Учреждение образования "Белорусская государственная академия  
авиации" (BY)

Аўтар (аўтары):

Шегидевич Артем Артурович; Жукова Анна Анатольевна;  
Мартынюк Виктор Иванович; Сенько Сергей Федорович;  
Василевич Сергей Владимирович; Степаненко Валерий  
Николаевич; Савицкий Александр Александрович; Дронов  
Виктор Николаевич (BY)

Заяўка № а 20200231

Дата падачы:

14.08.2020

Зарэгістравана ў Дзяржаўным рэестры  
вынаходстваў:

28.12.2021

Дата пачатку дзеяння:

14.08.2020

Генеральны дырэктар

У.А.Рабаволаў

**ОПИСАНИЕ  
ИЗОБРЕТЕНИЯ  
К ПАТЕНТУ**  
(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ (19) BY (11) 23657



(13) C1

(46) 2022.02.28

(51) МПК

H 05H 1/24

(2006.01)

H 05B 7/00

(2006.01)

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
СОБСТВЕННОСТИ

(54)

**СПОСОБ КОНВЕРСИИ ГАЗА ИЛИ ГАЗОВОЙ СМЕСИ  
В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ**

(21) Номер заявки: а 20200231

(22) 2020.08.14

(71) Заявитель: Учреждение образования  
"Белорусская государственная академия авиации" (BY)

(72) Авторы: Шегидевич Артем Артурович; Жукова Анна Анатольевна; Мартынюк Виктор Иванович; Сенько Сергей Федорович; Васильевич Сергей Владимирович; Степаненко Валерий Николаевич; Савицкий Александр Александрович; Дронов Виктор Николаевич (BY)

(73) Патентообладатель: Учреждение образования "Белорусская государственная академия авиации" (BY)

(56) BY 22302 C1, 2018.

BY 14068 C1, 2011.

BY 17061 C1, 2013.

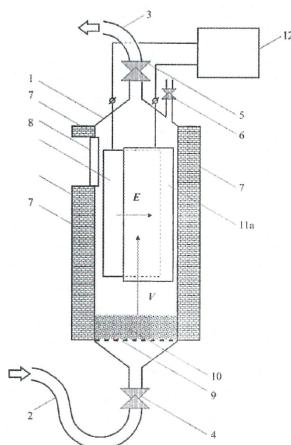
RU 2687422 C1, 2019.

US 2001/0020582 A1.

ВАСИЛЕВИЧ С.В. и др. Разработка экспериментального стенда электротермического кипящего слоя для исследования высокотемпературных процессов в газовых потоках. Авиационный вестник, 2020, № 2 июнь, с. 12-15, ISSN 2707-6989.

(57)

Способ конверсии газа или газовой смеси в электрическом разряде, при котором в рабочую камеру, содержащую газораспределительную решетку, установленную в ее нижней части, и два электрода, установленные над газораспределительной решеткой и выполненные в виде взаимопроникающих пластинчатых гребенок с расстоянием между упомянутыми гребенками от 5 до 50 мм, через слой расположенного на газораспределительной



Фиг. 1

решетке электропроводного порошка подают газ или газовую смесь со скоростью, обеспечивающей образование псевдоожженного слоя, верхняя граница которого расположена вблизи верхнего края электродов, создают между электродами электрическое поле, напряженность которого перпендикулярна направлению подачи газа или газовой смеси, инициируя разряд и зажигание плазмы, после чего, регулируя величину напряжения на электродах, давление в рабочей камере от 1 до 10 атм и скорость подачи газа или газовой смеси, обеспечивают стабильное горение плазмы по всей площади электродов, затем собирают или утилизируют продукты конверсии на выходе из рабочей камеры.

---

Изобретение относится к области химической технологии, в частности к конверсии газов в электрическом разряде, и может быть использовано для дожига дымовых газов, расщепления углеводородов, получения озона, получения оксидов азота из воздуха и т.п.

Плазменные процессы в настоящее время все шире используются для конверсии различных газовых смесей. Это связано преимущественно с тем, что по сравнению с обычными термическими процессами они существенно расширяют технологические возможности и открывают путь совершенно новым конкурентоспособным производственным процессам.

Так, например, известен способ конверсии воздуха для получения оксидов азота, открытый в [1] и включающий подачу воздуха со скоростью 2 л/мин в разрядную камеру с межэлектродным промежутком 3 мм и воздействие на подаваемый воздух в области разрядного промежутка электрическими импульсами чередующейся полярности напряжением 15 кВ с длительностью 2 мкс, с частотой от 500 до 2500 Гц. Образующаяся смесь оксида и диоксида азота поступает в выпускной канал разрядной камеры и абсорбируется поглотителем.

Главным недостатком рассматриваемого аналога является чрезвычайно низкий коэффициент полезного действия (КПД) процесса, обусловливающий высокую себестоимость готового продукта и малую производительность, что накладывает существенные ограничения на область его использования. Эти особенности процесса обусловлены малым объемом генерируемой плазмы вследствие небольшого расстояния между электродами и непроизводительными затратами энергии на поддержание электрического разряда при атмосферном давлении, приводящими к чрезмерному разогреву газовой смеси. Реакция образования оксида азота из азота и кислорода при высокой температуре является обратимой, что требует принудительного охлаждения и, соответственно, приводит к необоснованному увеличению затрат энергии на получение конечного продукта.

Наиболее близким к заявляемому техническому решению, его прототипом является способ конверсии воздуха для получения связанного азота, включающий подачу в разрядную камеру через слой расположенного на катоде электропроводного порошка воздуха с расходом, обеспечивающим псевдоожжение порошка, возбуждение в области разрядного промежутка между катодом и анодом тлеющего разряда и сбор продуктов конверсии на выходе из разрядной камеры поглотителем [2].

Разрядную камеру при проведении конверсии располагают вертикально для обеспечения восходящего потока газа. Подача рабочего газа со скоростью потока  $V$  приводит к "закипанию" слоя электропроводного порошка на катоде, что позволяет существенно снизить рабочее напряжение и многократно увеличить объем генерируемой плазмы. Использование "кипящего" катода позволяет значительно увеличить КПД процесса по сравнению с приведенным выше аналогом и за счет этого значительно расширить его технические возможности. Основным назначением прототипа является получение оксидов азота. Однако, как указано в описании, он может быть использован для конверсии других газовых смесей, в том числе для дожига отходящих газов.

Недостатком прототипа является сравнительно невысокая производительность, обусловленная ограниченным объемом рабочей камеры. Повышение объема разрядной камеры, обеспечивающее соответствующее повышение производительности за счет увеличения объема кипящего слоя, может быть достигнуто как за счет увеличения площади электродов, так и за счет увеличения расстояния между ними. Однако увеличение расстояния между электродами вследствие параллельности векторов скорости потока  $V$  и приложенного к электродам потенциала  $E$  требует соответствующего повышения рабочего напряжения и сдерживается требованиями по электроизоляции. Кроме того, при этом потребляемая мощность возрастает непропорционально росту производительности, что влечет необходимость охлаждения электродов, существенно усложняет конструкцию и снижает КПД. Увеличение же площади электродов сопровождается существенным ростом неоднородности кипящего слоя, что приводит к шнуркованию тока и трансформации разряда в электрическую дугу. А это существенно снижает КПД устройства. Таким образом, характеристики прототипа ограничены сравнительно невысоким объемом кипящего слоя, что не позволяет достичь высокой производительности устройства.

Данный недостаток особенно актуален при использовании прототипа для дожига отходящих газов, когда требуются очень высокие производительности. Кроме того, этот процесс наиболее эффективно протекает при высоких температурах, при которых положительные характеристики прототипа заметно ухудшаются вследствие спекания частиц порошка на катоде.

Задачей заявляемого изобретения является дальнейшее повышение производительности способа.

Поставленная задача решается тем, что в способе конверсии газа или газовой смеси в электрическом разряде, при котором в рабочую камеру, содержащую газораспределительную решетку, установленную в ее нижней части, и два электрода, установленные над газораспределительной решеткой и выполненные в виде взаимопроникающих пластинчатых гребенок с расстоянием между упомянутыми гребенками от 5 до 50 мм, через слой расположенного на газораспределительной решетке электропроводного порошка подают газ или газовую смесь со скоростью, обеспечивающей образование псевдоожженного слоя, верхняя граница которого расположена вблизи верхнего края электродов, создают между электродами электрическое поле, напряженность которого перпендикулярна направлению подачи газа или газовой смеси, инициируя разряд и зажигание плазмы, после чего, регулируя величину напряжения на электродах, давление в рабочей камере от 1 до 10 атм и скорость подачи газа или газовой смеси, обеспечивают стабильное горение плазмы по всей площади электродов, затем собирают или утилизируют продукты конверсии на выходе из рабочей камеры.

Сущность заявляемого технического решения заключается в обеспечении условий для многократного увеличения объема рабочей камеры за счет устранения зависимости фактически используемых значений  $E$  от скорости газового потока  $V$ .

Направление  $V$  в любом случае является вертикальным вверх, иначе невозможно псевдоожжение слоя электропроводного порошка. Направление  $E$  задается только расположением электродов рабочей камеры. Поэтому реализация условия  $V \perp E$  возможна только при горизонтальном направлении  $E$ , что, однако, предоставляет широкие возможности как для увеличения объема рабочей камеры, так и для расширения технологических режимов конверсии, в частности для использования более широких интервалов рабочих напряжений и плотностей тока, использования как постоянного, так и переменного тока и др. Электропроводный порошок при реализации заявляемого способа, в отличие от прототипа, в начальный момент времени не несет электрического заряда. Он не находится под напряжением, расположен на газораспределительной решетке в нижней части рабочей камеры и интенсивно охлаждается восходящим потоком рабочего газа, что предупреждает его спекание. Электроды, обеспечивающие заданное направление и величину  $E$ , при этом

располагают на некотором расстоянии от поверхности слоя порошка. Это позволяет формировать электродный узел в виде большого количества чередующихся пластин противоположной полярности с фиксированным расстоянием между разнополюсными электродами в широких размерных интервалах, например в форме взаимопроникающих пластинчатых гребенок. При соблюдении заявляемого условия  $V \perp E$  реализации процесса вследствие отсутствия зависимости между параметрами  $V$  и  $E$ , как это имеет место у прототипа, расстояние от газораспределительной решетки до электродного узла также может быть значительно увеличено. Это позволяет существенно повысить скорость газового потока  $V$  и, соответственно, производительность процесса.

При подаче рабочего газа и достижении определенной скорости  $V$  газового потока порошок "закипает" и попадает в межэлектродное пространство с потенциалом  $E$ . Частицы порошка при контакте с одним из электродов приобретают соответствующий этому электроду заряд и становятся его носителями в межэлектродном пространстве. При этом часть частиц заряжается положительно, а часть - отрицательно. Заряженная частица вследствие электростатических сил отталкивается от "своего" электрода и устремляется к противоположному, где перезаряжается и снова отталкивается. Далее процесс перезарядки частиц повторяется циклически, между электродами возникает разрядный ток. Наличие электрического поля и "кипящего" слоя заряженного порошка приводит к возникновению стационарного электрического разряда в межэлектродном пространстве - плазма зажигается. Перпендикулярность направления газового потока и электрического поля при этом способствуют повышению турбулентности и интенсификации перемещения заряженных частиц в межэлектродном пространстве.

Высота "кипящего" слоя определяется характеристиками порошка и скоростью газового потока. Нижняя граница кипящего слоя при этом определяется положением газораспределительной решетки в нижней части рабочей камеры. Верхнюю границу "кипящего" слоя формируют вблизи верхнего края электродов выбором скорости газового потока. Увеличение количества чередующихся электродов и их размеров как по горизонтали, так и по вертикали позволяет при реализации заявляемого способа существенно увеличить размеры рабочей камеры вплоть до сотен литров и более при сохранении заданного межэлектродного промежутка.

Циклическое движение частиц порошка в кипящем слое от его нижней границы на газораспределительной решетке в межэлектродное пространство и обратно за счет интенсивного теплообмена с рабочим газом обеспечивает поддержание его температуры на уровне температуры подаваемых газов. Поэтому спекание частиц порошка, как это наблюдается иногда в прототипе, в принципе невозможно. По этой причине заявляемый способ может быть эффективно использован для высокотемпературной конверсии газов, в частности для дожига отходящих газов, содержащих трудно окисляемые ядовитые продукты.

Проведение процесса конверсии при повышенном давлении позволяет пропорционально повысить скорость процесса за счет увеличения концентрации реагирующих компонентов и, соответственно, его производительность. Одновременно это расширяет интервалы допустимых плотностей тока, что также повышает скорость конверсии и расширяет возможности управления процессом. Рабочую камеру в этом случае снабжают предохранительным клапаном для аварийного сброса давления и обратным клапаном на впусканом коллекторе для предупреждения выброса содержимого рабочей камеры в нагнетательную систему, например компрессор. Конкретный рабочий интервал давлений выбирается с учетом фактически осуществляемого процесса, например дожига отходящих газов, крекинга нефтепродуктов и др. Нижним пределом рабочего давления является 1 атм, что не требует дополнительных пояснений. Верхний предел давления регламентируется необходимостью визуального контроля горения плазмы и, соответственно, наличием смотрового окна из прозрачного материала, в качестве которого может быть

использовано кварцевое стекло. Поскольку стенки рабочей камеры могут быть выполнены из высокопрочной стали, выдерживающей значительные давления, то определяющим элементом в данном случае является прочность стекла смотрового окна. Кроме того, давления более 10 атм в рабочей камере требуют существенного повышения рабочего напряжения (более 25 кВ), что накладывает серьезные ограничения по электроизоляции и безопасности процесса в целом.

Межэлектродное расстояние при реализации заявляемого способа выбирают на основании требований конкретного технологического процесса конверсии. На основании имеющихся экспериментальных данных можно рекомендовать расстояние от 5 до 50 мм. При расстоянии менее 5 мм возможно засорение межэлектродного пространства примесными частицами конвертируемых газов и продуктами их агломерации с частицами электропроводного порошка. Увеличение межэлектродного пространства свыше 50 мм также нецелесообразно в связи с существенным повышением рабочего напряжения и связанным с этим непроизводительным повышением мощности.

Сущность заявляемого технического решения поясняется фиг. 1, где приведено схематическое изображение устройства для реализации способа, и фиг. 2, где изображен вариант взаимного расположения электродов (вид сверху), поясняющий возможность увеличения объема рабочей камеры. На фигурах приняты следующие обозначения:

- 1 - рабочая камера;
- 2 - штуцер подачи газа;
- 3 - штуцер отвода газа;
- 4 - обратный клапан;
- 5 - клапан регулировки давления;
- 6 - предохранительный клапан;
- 7 - футеровка;
- 8 - смотровое окно;
- 9 - газораспределительная решетка;
- 10 - электропроводный порошок;
- 11а - правый электрод;
- 11б - левый электрод;
- 12 - источник электропитания.

Как видно из приведенных фигур, устройство для реализации заявляемого способа конверсии газов состоит из рабочей камеры 1, к которой присоединены штуцер подачи газа 2 и штуцер отвода газа 3. Штуцер подачи газа 2 снабжен обратным клапаном 4, а штуцер отвода газа 3 снабжен клапаном регулировки давления 5. Рабочая камера 1 содержит расположенный в ее верхней части предохранительный клапан 6 для аварийного сброса давления. Для дополнительной теплозащиты при проведении высокотемпературных процессов рабочая камера 1 может быть снабжена футеровкой 7. Внешнее наблюдение за горением плазмы в рабочей камере 1 реализуется через смотровое окно 8. В нижней части рабочей камеры 1 расположена газораспределительная решетка 9, на которую насыпают электропроводный порошок 10. Расположение электродов обеспечивает их равную функциональность, т.е. правый электрод 11а может быть как катодом, так и анодом. Такие же функции может выполнять и левый электрод 11б. Поэтому источник электропитания 12 может быть постоянного или переменного тока. Направления векторов V и E указаны стрелками (фиг. 1).

Процесс конверсии осуществляют следующим образом. С помощью клапана регулировки давления 5, установленного на штуцере отвода газа 3, устанавливают требуемое начальное давление в рабочей камере 1. Атмосферное давление в данном случае является предпочтительным, т. к. это требует меньшего начального напряжения для зажигания плазмы. Однако если межэлектродное расстояние фактически используемого устройства достаточно мало, например 5 мм, то это позволяет зажигать плазму и при повышенном

# BY 23657 С1 2022.02.28

давлении, что упрощает дальнейшую настройку. Штуцер подачи газа 2 соединяют с источником конвертируемых газов. При этом газовая смесь начинает поступать в рабочую камеру 1. Обратный клапан 4 обеспечивает требуемую скорость прямого газового потока, а при прекращении подачи газа препятствует возникновению обратного потока. Под действием восходящего потока газа электропроводный порошок 10, расположенный на газораспределительной решетке 9, "закипает". При помощи обратного клапана 4 и клапана регулировки давления 5 регулируют высоту "кипящего" слоя электропроводного порошка 10 так, чтобы его верхняя граница была расположена вблизи верхнего края электродов. Высоту "кипящего" слоя при этом наблюдают в смотровое окно 8. Включают источник электропитания 12. При этом на правый электрод 11а и левый электрод 11б подается потенциал Е, направленный перпендикулярно направлению потока газа и, соответственно, вектору V, в результате чего в межэлектродном промежутке за счет наличия электропроводного порошка 10 инициируется разряд и загорается плазма. Величину начального напряжения зажигания выбирают на основании фактического расстояния между электродами и характеристик используемого электропроводного порошка из интервала от 3 до 25 кВ. После этого регулировкой рабочего напряжения на электродах, давления в рабочей камере (при необходимости) и скорости газового потока добиваются стабилизации горения плазмы по всей площади электродов. Величина рабочего тока и напряжения зависит от расстояния между пластинами электродов и их площади, которые, в свою очередь, определяются конкретным назначением устройства. Футеровка 7 предохраняет от возможных ожогов при касании металлической поверхности рабочей камеры 1, а также обеспечивает поддержание высокой температуры процесса. Предохранительный клапан 6 служит для аварийного сброса давления при выходе процесса горения из-под контроля. Рабочими давлениями проведения процесса конверсии являются значения от 1 до 10 атм, и регулировку предохранительного клапана 6 осуществляют с учетом этих данных, а также на основании требований к сосудам, работающим под давлением.

По окончании работы отключают источник электропитания 12, перекрывают обратный клапан 4 и полностью открывают клапан регулировки давления 5.

Испытания заявляемого способа проводили при дожиге выхлопных газов дизельного двигателя. Эффективность дожига несгоревших остатков дизельного топлива оценивали по изменению содержания CO и CH в выхлопе при помощи газового анализатора testo 350 XL. Корпус рабочей камеры устройства и электроды были изготовлены из жаростойкого сплава на основе никеля. Смотровое окно изготавливали из высокопрочного кварцевого стекла, футеровку - из керамики. Каждый электрод был выполнен в форме гребенки из 5 пластин размером 10×15 см (15 см - высота). Расстояние между пластинами электродов составило 10 мм. В качестве электропроводного порошка использовали порошкообразный никель марки ПНЭ ГОСТ 9722-79. Процесс дожига выхлопных газов проводили как при атмосферном, так и при повышенном давлении, величина которого указана в таблице. Рабочее давление в камере контролировали при помощи манометра. Результаты испытаний приведены в таблице.

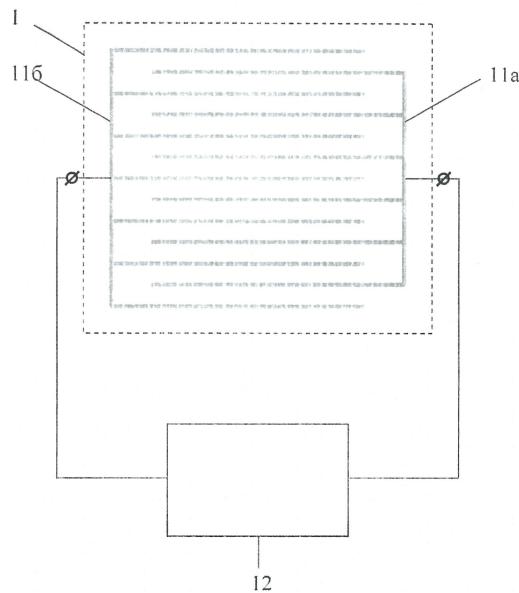
Из приведенных данных видно, что заявляемый способ в совокупности отличительных признаков обеспечивает повышение производительности по сравнению с прототипом в 15-25 раз, при этом его работа стабильна во времени и не требует промежуточных операций по замене электропроводного порошка.

**Результаты контроля состава выхлопных газов в зависимости от режимов проведения процесса**

| Рабочее давление в камере, атм | Содержание CO на входе, об. % | Содержание CO на выходе, об. % | Содержание CH на входе, об. % | Содержание CH на выходе, об. % | Производительность, л/мин | Примечание   |
|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------|--|
| 1                              | 1,3                           | 0,01                           | 2,1                           | 0,01                           | 120                       |  |
| 5                              | 1,3                           | 0,01                           | 2,1                           | 0,01                           | 200                       |  |
| 10                             | 1,3                           | 0,01                           | 2,1                           | 0,01                           | 250                       |  |
| 12                             | 1,3                           | 0,01                           | 2,1                           | 0,4                            | 200                       | нестабильность горения плазмы, периодическое затухание           |
| Прототип                       | 1,3                           | 0,01                           | 2,1                           | 0,01                           | 10                        | выход из строя через час работы из-за спекания порошка на катоде |

Источники информации:

1. KUNHARDT E.E. Generation of Large Volume, Atmospheric Pressure, Nonequilibrium Plasmas. IEEE Transactions on Plasma Science. V. 28. № 1. February 2000.
2. BY 10597, 2008.
3. BY 22302, 2018.



Фиг. 2