

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **038436**(13) **B1**(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2021.08.27

(51) Int. Cl. *F23C 5/08* (2006.01)
F23C 13/00 (2006.01)

(21) Номер заявки
201990303

(22) Дата подачи заявки
2017.07.12

(54) **УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ЭНДОТЕРМИЧЕСКОГО СПОСОБА С
УЛУЧШЕННОЙ СХЕМОЙ РАСПОЛОЖЕНИЯ ТРУБ**

(31) **16306000.7**

(56) EP-A1-2708812
EP-A1-1193219

(32) **2016.08.02**

(33) **EP**

(43) **2019.07.31**

(86) **PCT/EP2017/067625**

(87) **WO 2018/024455 2018.02.08**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**ЛЬЕР ЛИКИД, СОСЬЕТЕ
АНОНИМ ПУР ЛЬЕТЮД Э
ЛЬЕКСПЛОАТАСЁН ДЭ ПРОСЕДЕ
ЖОРЖ КЛОД (FR)**

(72) Изобретатель:
Тудораш Диана (FR)

(74) Представитель:
**Харин А.В., Буре Н.Н., Стойко Г.В.
(RU)**

(57) Печь для осуществления эндотермического способа, содержащая трубки, содержащие катализатор для конверсии газообразного сырья, причем трубки расположены рядами внутри печи, при этом горелки установлены между трубками и между трубками и стенками печи параллельно ряду трубок, и при этом ряды горелок и ряды трубок заканчиваются торцевыми стенками и разделены на секции, при этом расстояние от пристеночной трубки до торцевой стенки в каждом ряду трубок составляет T2W, расстояние между двумя смежными внутренними трубками в секции составляет T2T, а расстояние между двумя крайними относительно плоскости симметрии трубками в двух смежных секциях составляет T2S, причем трубки в рядах расположены таким образом, что соотношения T2T/T2W и T2T/T2S составляют более 0,5 и менее 2, ограничивая таким образом различия в теплопередаче к внешним трубкам (пристеночным трубкам и крайним относительно плоскости симметрии трубкам) относительно внутренних трубок и снижая разницу температур между внешними трубками и внутренними трубками.

038436 B1

038436 B1

Настоящее изобретение относится к конструктивному исполнению печей с верхним обогревом или нижним обогревом для парового риформинга метана (SMR) и других эндотермических реакций, таких как крекинг углеводородного сырья в реакторах с наружным обогревом.

Хотя в следующем описании будет упоминаться только способ SMR, оно подходит для всех остальных способов, в которых применяют реакторы того же типа.

Способ SMR главным образом основан на реакции риформинга легких углеводородов, таких как метан, которая обеспечивает получение смеси водорода (H_2) и монооксида углерода (CO) в присутствии водяного пара. Основная реакция является эндотермической, протекает медленно и требует дополнительного подвода теплоты, а также катализатора для возникновения. Обычно характеристики производительности SMR-реактора ограничены теплопередачей, а не кинетикой реакций.

В промышленной практике SMR-реактор обычно содержит трубки, расположенные в печи, причем указанные трубки заполнены катализатором, обычно в виде гранул, и в них подают смесь технологического газа (как правило, смесь метана и пара).

Доступно несколько хорошо зарекомендовавших себя конфигураций конструктивного исполнения печей, как проиллюстрировано на фиг. 1, на которой представлены конфигурации с верхним обогревом (также известные как "с нисходящим пламенем"), с нижним обогревом (также известные как "с восходящим пламенем"), с боковым обогревом и со ступенчатой стенкой.

Технология с верхним обогревом является одним из наиболее упоминаемых конструктивных исполнений и предлагается несколькими поставщиками технологий. Печи с верхним обогревом обычно изготовлены из топочной коробки с огнеупорной футеровкой, содержащей несколько рядов трубок, содержащих катализатор. Необходимую теплоту для осуществления эндотермической реакции обеспечивают потолочными горелками, расположенными рядами между трубками, а также рядами дополнительных потолочных горелок с боковой стороны печи вдоль стенок печи. Продукты сгорания от горелок обычно выдувают вертикально вниз, таким образом, ряды трубок сталкиваются с пламенем в своей верхней части. Выхлопной коллектор дымовых газов обычно обеспечен на уровне пола печи.

Технология с нижним обогревом реже встречается в современных установках. В соответствии с технологией с нижним обогревом горелки расположены рядами на полу зоны горения между рядами трубок и обеспечивают пламя, направленное вертикально вверх.

Основная цель конструктивного исполнения печи (также называемого конструктивным исполнением топочной коробки) состоит в максимальном увеличении количества теплоты, передаваемого от горелок к трубкам - от пламени, исходящего от горелок, а также от стенок и горячего дымового газа при соблюдении ограничения максимальной рабочей температуры трубки. Максимальная рабочая температура трубки или МОТ (также известная как максимальное рабочее ограничение или МОТ) зависит от ряда факторов и, в частности, от механической нагрузки на трубку (главным образом давления подаваемого газа), от механических свойств сплавов, применяемых для изготовления трубок, и от необходимого срока службы трубок, подверженных ползучести и термическому старению.

Любое увеличение количества теплоты, передаваемой трубкам, имеет непосредственное положительное воздействие либо благодаря повышению производительности, либо благодаря повышению компактности топочной коробки, которая является ценной с точки зрения капитальных затрат. Тем не менее, увеличение количества передаваемой теплоты подразумевает более высокие уровни температур поверхностного слоя трубки, что снижает срок службы трубки или требует использования более стойких сплавов, которые являются намного более дорогостоящими.

Недостаток однородности в распределении тепловой нагрузки в печи приведет к тому, что некоторые трубки будут более горячими, чем другие; поэтому профили температуры трубок являются критическими элементами для конструктивного исполнения печи, и во время ее работы. Профили температуры трубок предоставляют важнейшие сведения для поиска надлежащего компромисса между производительностью и износостойкостью; надлежащий компромисс здесь, фактически, необходим.

Таким образом, в ходе технологических операций характеристики производительности печи ограничены температурой самой горячей трубки; она не должна превышать МОТ. В то же время производственные показатели, т.е. продуктивность, зависят от средних значений теплового потока и температур трубок. Таким образом, чем меньше разность между температурой самой горячей трубки и средней температурой трубок, тем лучше характеристики производительности печи.

Стремясь к простоте, большинство объяснений, которые приводятся далее, приведены в отношении печи с верхним обогревом. Тем не менее, следует отметить, что фигуры и объяснения, относящиеся к печи с нижним обогревом, будут аналогичными.

В такой печи с верхним обогревом, изображенной на фиг. 2, трубки, содержащие катализатор, расположены рядами внутри печи. Сырье подают через верхнюю часть трубок; полученный синтез-газ, содержащий в качестве основных компонентов водород и монооксид углерода, а также несколько второстепенных компонентов и следов, извлекают в нижней части трубок. Горелки расположены рядами между рядами трубок и между трубками и стенками. Образовавшиеся дымовые газы выводят через выхлопные каналы.

На фиг. 3 изображен вид сверху той же самой печи с верхним обогревом, на котором показано 8 ря-

дов по 48 трубок в каждом, сгруппированными в 3 секциях (отсеках) по 16 трубок в каждой, а также 9 рядов по 15 горелок, также упорядоченными в 3 секциях (отсеках) по 5 горелок в каждой, и параллельными рядам трубок. Ряды горелок заканчиваются стенкой (стенкой вдоль оси Y, также обозначаемой как "торцевые стенки"). Для всех рядов трубок крайние трубки, обращенные к торцевой стенке, обозначают как "пристеночные трубки".

Для каждого ряда трубок или горелок большое количество трубок и/или горелок в каждом ряду вызывает геометрические ограничения в печи, что делает необходимым добавление опорных балок для обеспечения безопасности печи; следовательно, указанные опоры также делят ряды трубок и ряды горелок на несколько периодически повторяющихся секций (также известных как отсеки). Каждая секция заканчивается либо торцевой стенкой, либо плоскостью симметрии - плоскостью, расположенной посередине пространства между двумя смежными секциями, позволяющей устанавливать опоры. Крайние трубки, расположенные наиболее близко к плоскостям симметрии, обозначены как "крайние относительно плоскости симметрии трубки", или "симметрично расположенные трубки".

Выражения "трубки внешней секции" или "внешние трубки" подразумевают собой "пристеночные трубки" и "крайние относительно плоскости симметрии трубки" без проведения различий между ними.

Все трубки, которые не являются "пристеночными трубками" или "симметрично расположенными трубками", определяют как "трубки внутренней секции" или же "внутренние трубки".

Наличие торцевых стенок вблизи "пристеночных трубок" и разделение рядов трубок по секциям - создающие тем самым различное пространство между двумя конкретными смежными трубками - приводят к неоднородному распределению имеющегося тепла между "пристеночными трубками", "крайними относительно плоскости симметрии трубками" и "внутренними трубками".

По всему описанию выражение "ряд горелок" следует понимать как "ряд горелок, параллельный рядам трубок", причем это направление рядов также обозначено как ось X.

В печах, охватываемых настоящим изобретением, т.е. в тех, где горелки установлены рядами, параллельными рядам трубок, для каждой горелки направление струи пламени, создаваемого горелкой, зависит от

взаимодействия с соседними, одновременно вытекающими струями и

наличия стенки (если таковая присутствует), что также может привести к неоднородному распределению тепла между трубками, расположенными в одном и том же ряду.

Ранее рассматривалась неоднородность распределения тепла между трубками в ряду, которая возникает в результате взаимодействия струй пламени в ряду горелок, параллельном рядам трубок (вдоль оси X); решение было найдено и раскрыто в находящейся на рассмотрении не опубликованной европейской заявке на патент EP 15307007.3, в которой решается проблема чрезмерного (или недостаточного) нагрева труб, возникающего в результате распределения горелок в ряду, смежном с рядом трубок. Ввиду этого подобный тип однородности распределения тепла по трубам не рассматривается в настоящем изобретении.

Тем не менее, остается проблема неоднородности распределения тепла, которая, как правило, касается трубок внешней секции, и решение которой не предоставляется в цитированной выше патентной заявке.

В настоящем изобретении уделяется особое внимание свойствам трубок, образующих ряды вдоль оси X, и предусматривается их улучшение; говоря более конкретно, настоящее изобретение направлено на решение проблемы отсутствия однородности нагрева пристеночных трубок, крайних относительно плоскости симметрии трубок и внутренних трубок, расположенных вдоль ряда, вследствие влияния торцевых стенок и промежутка между секциями трубок, независимо от неверного конструктивного исполнения горелок, или их ненадлежащей эксплуатации.

Пристеночные трубки и симметрично расположенные трубки обладают более высокими коэффициентами видимости с торцевыми стенками, по сравнению с ближайшими к ним соседними внутренними трубками (коэффициент видимости поверхности (i) с поверхностью (j) определяется в качестве доли излучения, покидающего поверхность (i), которая пересекается поверхностью (j)). Пристеночные трубки подвергаются воздействию торцевых стенок под большим углом, чем внутренние трубки (что означает наличие более высокого углового значения торцевой стенки). Более высокий уровень воздействия со стороны горячих стенок означает то, что пристеночные трубки будут получать больше излучаемого тепла.

В то же время, учитывая то, что трубка имеет склонность к охлаждению окружающей среды, две смежные симметрично расположенные трубки расположены не так близко друг к другу, как две смежные внутренние трубки, поэтому они окружены более крупным объемом газообразных продуктов сгорания по сравнению с внутренними трубками; поблизости от пристеночных трубок есть лишь одна внутренняя трубка, температура которой ниже температуры газообразных продуктов сгорания. Следовательно, крайние относительно плоскости симметрии трубки и пристеночные трубки получают больше конвективного и излучаемого тепла от окружающих их горячих газообразных продуктов сгорания по сравнению с внутренними трубками.

Для иллюстрирования данного явления неоднородности теплопередачи были выполнены числен-

ные моделирования с использованием алгоритма вычислительной динамики жидкости и газа 3-D (CFD), предназначенного для расчета теплопередачи между камерой сгорания и трубчатыми каталитическими реакторами.

С данной целью определены иллюстративные отсеки SMR-печи; определенные "иллюстративные отсеки" должны быть иллюстративными секциями, определенными выше - то есть секциями, которые, будучи связанными, будут представлять печь; а также должны учитывать наличие стенок или плоскостей симметрии. Тогда модульный стандартный риформер может быть составлен посредством сборки иллюстративных отсеков для обеспечения необходимой производительности установки.

В зависимости от количества трубок и горелок в рядах и/или дополнительных геометрических ограничений могут существовать различные типы "иллюстративных отсеков" с различными количествами горелок и трубок. Тем не менее, следует отметить, что настоящее изобретение относится ко всем типам секций в отношении количества горелок, количества трубок, и в отношении края секции (торцевая стенка или симметрия между секциями).

Различные иллюстративные отсеки показаны на фиг. 4.

На фиг. 5 представлена максимальная температура для 16 трубок согласно изображенному на фиг. 4.

Особое внимание было уделено перегреву внешних трубок. Иллюстративный отсек состоит из подгруппы из шестнадцати трубок, нагреваемых двумя рядами по пять горелок одинаковой мощности, которые оканчиваются с двух сторон торцевыми стенками. На указанной фигуре изображено то, что присутствие торцевой стенки приводит к неоднородной теплопередаче к трубкам для риформинга; причем пристеночные трубки иллюстративного отсека достигают более высокой температуры поверхностного слоя, чем внутренние трубки, как показано в результатах 3-D CFD. В представленном случае разность между максимальным значением температуры поверхностного слоя пристеночных трубок и средним показателем максимального значения температуры поверхностного слоя внутренних трубок в иллюстративном отсеке составляет приблизительно 5°C.

Таким образом, существует проблема недостатка однородности нагрева вдоль ряда трубок, которая не связана со схемой расположения горелок, и настоящее изобретение направлено на решение данной проблемы таким образом, чтобы улучшить однородность теплового потока в SMR-печи с верхним обогревом (а также в печи с нижним обогревом) посредством ограничения перегрева внешних трубок (а также пристеночных трубок и крайних относительно плоскости симметрии трубок).

Авторы настоящего изобретения обнаружили, что принцип расположения трубок в ряду, несколько расстояний между трубками, торцевыми стенками и плоскостями симметрии, а точнее - некоторые конкретные соотношения расстояний, очень важны для предотвращения неравномерного нагрева трубок. Расстояния, представляющие интерес, представлены на фиг. 6; на данной фигуре изображен один из иллюстративных отсеков, показанных на фиг. 4, с шестнадцатью находящимися на одной линии трубками с двумя расположенными по бокам рядами по пять горелок, причем один конец является стенкой, а второй является плоскостью симметрии. На фигуре также указаны расстояния, которые были определены как ключевые параметры, которые являются следующими:

T2T представляет собой расстояние между двумя смежными трубками в отсеке;

T2W представляет собой расстояние между пристеночной трубкой и торцевой стенкой;

T2S представляет собой промежуточное расстояние между двумя крайними относительно плоскости симметрии трубками, т. е. расстояние между ближайшей к плоскости симметрии трубке и самой плоскостью симметрии, умноженное надвое (между двумя смежными отсеками).

Соотношения, которые авторы настоящего изобретения рассматривают как решающие, представляют собой $T2T/T2S$ и $T2T/T2W$.

Цель настоящего изобретения состоит в том, чтобы уменьшить распределение тепла между трубками в ряду.

Еще одной целью настоящего изобретения является уменьшение разности температур между внешними трубками и внутренними трубками.

Настоящее изобретение предлагает достичь указанных целей с помощью печи и способа осуществления конструктивного исполнения данной печи, которые позволят избежать проблемы перегрева внешних трубок, посредством оптимизированной схемы расположения трубок вдоль рядов горелок.

Таким образом, целью настоящего изобретения является предоставление печи для осуществления эндотермического способа, содержащей трубки, содержащие катализатор для конверсии газообразного сырья, причем трубки расположены рядами внутри печи, при этом горелки установлены между трубками и между трубками и стенками печи параллельно рядам трубок, и при этом ряды горелок и ряды трубок заканчиваются торцевыми стенками и разделены на секции, при этом расстояние от пристеночной трубки до торцевой стенки в каждом ряду трубок составляет T2W, расстояние между двумя смежными внутренними трубками в секции составляет T2T, а расстояния между двумя крайними относительно плоскости симметрии трубками в двух смежных секциях составляет T2S, отличающейся тем, что трубки в рядах расположены таким образом, что соотношения $T2T/T2W$ и $T2T/T2S$ составляют более 0,5 и менее 2, ограничивая таким образом различия в теплопередаче к внешним трубкам (пристеночным трубкам и крайним относительно плоскости симметрии трубкам) относительно внутренних трубок и снижая разницу

температур между внешними трубками и внутренними трубками.

Предпочтительные варианты осуществления представлены ниже:

В предпочтительной печи согласно настоящему изобретению соотношения $T2T/T2W$ и $T2T/T2S$ составляют более 0,75 и менее 1,75, приводя, таким образом, к дополнительному уменьшению разницы температур между внешними и внутренними трубками.

Желательно, чтобы показатели $T2T/T2W$ и $T2T/T2S$ были равны и составляли более 0,75 и менее 1,75.

В частности, настоящее изобретение подходит для печи с горелками, установленными на потолке печи.

Согласно другому варианту осуществления горелки установлены на полу и обеспечивают пламя, направленное вертикально вверх.

Риформер согласно настоящему изобретению предпочтительно представляет собой печь парового риформинга метана.

В соответствии с другим аспектом настоящее изобретение относится к эндотермическому способу, подлежащему осуществлению в печи, содержащей трубки и горелки, причем указанный способ включает введение газообразного сырья и пара в трубки, содержащие катализатор для конверсии газообразного сырья, при этом трубки расположены рядами внутри печи,

сжигание топлива с помощью воздуха в горелках, которые установлены между трубками и между трубками и стенками печи параллельно ряду трубок,

выпуск продуктов, образовавшихся в трубках,

при этом ряды горелок и ряды трубок заканчиваются торцевыми стенками и разделены на секции, при этом расстояние от пристеночных горелок до торцевой стенки составляет $T2W$, расстояние между двумя смежными трубками в секции составляет $T2T$, а расстояние между двумя крайними относительно плоскости симметрии трубками в двух смежных секциях составляет $T2S$, отличающийся тем, что трубки в рядах расположены таким образом, что соотношения $T2T/T2W$ и $T2T/T2S$ составляют более 0,5 и менее 2, ограничивая таким образом различия в теплопередаче к внешним трубкам (пристеночным трубкам и крайним относительно плоскости симметрии трубкам) относительно внутренних трубок и снижая разницу температур между внешними трубками и внутренними трубками.

Кроме того, способ согласно настоящему изобретению можно осуществлять отдельно или в комбинации со

способом парового риформинга метана;

способом, в котором соотношения $T2T/T2W$ и $T2T/T2S$ составляют более 0,75 и менее 1,75;

способом по п.9, в котором соотношения $T2T/T2W$ и $T2T/T2S$ равны;

способом по любому из пп.7-10, в котором печь представляет собой печь с верхним обогревом;

способом по любому из пп.7-10, в котором печь представляет собой печь с нижним обогревом.

Печь согласно настоящему изобретению и ее преимущества будут описаны более подробно в следующих примерах и на основании графических материалов, где

на фиг. 1 изображена конфигурация горелок для типичных конструктивных исполнений печи;

на фиг. 2 изображена типичная схема расположения с помощью 3D-представления печи с верхним обогревом, применяемой для синтеза синтез-газа;

на фиг. 3 изображен вид сверху печи с верхним обогревом, демонстрирующий группировку трубок и горелок;

на фиг. 4 изображен вид сверху той же печи, демонстрирующий "иллюстративные отсеки" в масштабе печи;

на фиг. 5 изображен профиль максимальной температуры поверхностного слоя 16 трубок, расположенных в данном "иллюстративном отсеке", который оканчивается с двух сторон стенками;

на фиг. 6 изображены ключевые параметры согласно настоящему изобретению для распределения трубок в иллюстративном отсеке с 16 расположенными на одной линии трубками с 2 расположенными по бокам рядами по 5 половин горелок, причем один конец является торцевой стенкой, а второй конец является плоскостью симметрии;

на фиг. 7 представлены 3 различных варианта распределения трубок в иллюстративном отсеке по фиг. 5, причем 16 трубок расположены на одной линии в одном ряду и по бокам от них расположено 2 ряда по 5 половин горелок, которые с двух сторон оканчиваются стенками;

на фиг. 8 изображены различия между периферийной температурой трубки на высоте 6 м (высота трубки составляет 12 м) и средней температурой внутренней и внешней трубок на той же высоте для 3-х случаев, представленных на фиг. 7;

на фиг. 9 изображены максимальные значения температур поверхностного слоя трубок для 16 трубок иллюстративного отсека для тех же 3-х случаев, представленных на фиг. 8;

на фиг. 10. представлена таблица с результатами и анализом моделирования, применяемого к ряду иллюстративных отсеков.

Как указано выше, настоящее изобретение направлено на предоставление улучшенного конструктивного исполнения печи типа печи с верхним обогревом или печи с нижним обогревом, как проиллюстрировано на фиг. 1, для осуществления эндотермического способа. Цель состоит в уменьшении темпера-

турных колебаний вдоль ряда трубок, параллельного оси X, благодаря улучшенному распределению трубок вдоль указанного ряда.

Для того чтобы иметь возможность определять и предлагать наилучшие варианты схемы расположения трубок вдоль ряда, были осуществлены численные моделирования различных значений T2T, T2W и T2S для нескольких SMR-установок.

Средство, применяемое для определения наилучших вариантов распределения трубок в "иллюстративном отсеке", представляет собой средство, применяемое в соответствии с данным документом выше для определения различий в показателях температуры трубок, обусловленных существующим конструктивным исполнением.

Выполнены численные моделирования для "иллюстративных отсеков" SMR-печей с верхним обогревом с применением алгоритма вычислительной динамики жидкости и газа 3-D (CFD), предназначенного для расчета теплопередачи между камерой сгорания и трубчатыми каталитическими реакторами.

Для данной печи выбраны "иллюстративные отсеки"; причем определенные "иллюстративные отсеки" должны быть иллюстративными для повторяющихся секций, а также должны учитывать наличие стенок, а также полостей между секциями для печей с двумя или более секциями. Затем может быть составлен модульный стандартный риформер с необходимой производительностью посредством сборки подходящего количества иллюстративных отсеков.

Прочтение следующего более подробного описания графических материалов поможет в понимании настоящего изобретения.

На фиг. 2 показан трехмерный вид в перспективе печи; точнее, на нем показана типичная схема печи 1 с верхним обогревом, применяемой для получения синтез-газа из сырья, содержащего метан и пар. Катализаторные трубки 2 расположены рядами внутри печи 1. Сырье подают через трубки 2, высота которых, как правило, достигает 12 м, из верхней части в нижнюю; полученный синтез-газ, содержащий водород и монооксид углерода в качестве основных компонентов и остаточные примеси, извлекают из нижней части трубок 2. Горелки 3 расположены рядами между рядами трубок и между рядами трубок и стенками. Полученные дымовые газы отводят через выхлопные каналы 4.

На фиг. 3 показан вид сверху печи 1 с верхним обогревом с 8 рядами 5 по 48 трубок в каждом, причем каждый ряд упорядочен в 3-х секциях 10 по 16 трубок в каждой, и 9 рядами 6 по 15 горелок 9, параллельных рядам трубок и упорядоченных в тех же 3-х секциях 10 по 5 горелок в каждой. Ряды 5 трубок заканчиваются стенкой 7 (стенками вдоль оси Y, также обозначаемыми как "торцевые стенки"). Для всех рядов 5 трубок крайние трубки 8a, обращенные к стенке 7, обозначают как "пристеночные трубки". Внутри ряда пристеночные трубки окружены стенкой 7 с одной стороны и трубкой с противоположной стороны. Внутри ряда трубки 8с внутренней секции окружены двумя трубками, по одной на каждую сторону. Эндотермическая реакция риформинга происходит в трубках и поэтому поверхностный слой трубок холоднее, чем огнеупорные стенки и газообразные продукты сгорания. Наличие торцевой стенки и более горячих газообразных продуктов сгорания приводит к перегреву горелок, расположенных рядом с пристеночными трубками.

Как уже упоминалось, существенное количество трубок и горелок делает необходимым добавление опорных балок для обеспечения безопасности печи; причем указанные опоры разделяют ряды на несколько частей (также известных как секции или отсеки 10). Секции 10 заканчиваются либо стенкой 7, либо плоскостью 11 симметрии, разделяющей две смежные секции. Крайние трубки 8b, расположенные наиболее близко к плоскостям 11 симметрии, обозначены как "крайние относительно плоскости симметрии трубки". Расстояние или промежутки между двумя крайними относительно плоскости симметрии трубками 8b двух смежных отсеков имеет более важное значение, чем расстояние между двумя трубками в одном и том же отсеке, и, следовательно, более высокий коэффициент видимости с торцевыми стенками печи, чем у трубок внутренней секции, а также окружены более крупным объемом газообразных продуктов сгорания, что приводит к перегреву, по сравнению с внутренними трубками 8с.

На фиг. 4 изображен вид сверху печи, демонстрирующий "иллюстративные отсеки" в масштабе печи см. серые прямоугольники. В качестве примера "иллюстративный отсек" 12 состоит из подгруппы из 16 находящихся на одной линии трубок, нагреваемых 2 рядами по 5 горелок одинаковой мощности, причем один конец W представляет собой торцевую стенку 7, а второй конец S представляет собой плоскость 11 симметрии, находящуюся посередине полости (промежутка) между 2 смежными секциями.

На фиг. 5 представлен профиль максимальной температуры трубки, рассчитанный с помощью модели 3-D CFD, для "иллюстративного отсека" с 16 трубками и 5 горелками, который заканчивается с каждого конца стенками со значениями T2T = 0,35 м, T2W = 0,52 м, T2T/T2W = 0,67. Данное явно иллюстрирует то, что теплопередача к трубкам не является однородной. Наблюдается более высокая температура поверхностного слоя у внешних трубок по сравнению с внутренними трубками; разница температур достигает 5°C.

Как указано выше, настоящее изобретение направлено на регулирование неоднородностей теплового потока в иллюстративном отсеке с тем, чтобы регулировать тепловой поток на всем протяжении ряда и, наконец, улучшить контроль теплового потока во всей печи. Для достижения данного результата настоящее изобретение направлено на ограничение теплопередачи к внешним трубкам благодаря конст-

руктивному исполнению с улучшенной схемой расположения трубок вдоль рядов. Для оптимизации схем расположения трубок были выполнены численные моделирования динамических характеристик различных SMR-установок.

Иллюстративный отсек 12 будут применять для отображения важных конкретных вариантов расстояния, предназначенных для описания настоящего изобретения. Как уже упоминалось, схема расположения трубок вдоль ряда может быть определена с помощью трех значений расстояния T2T, T2W и T2S. Обозначенные на фиг. 6 расстояния соответствуют следующему:

T2T представляет собой расстояние между двумя смежными трубками в иллюстративном отсеке;

T2W представляет собой расстояние между торцевой стенкой 7 и пристеночной трубкой 8а в иллюстративном отсеке;

T2S представляет собой промежуточное расстояние между двумя крайними относительно плоскости симметрии трубками.

Три значения расстояния, перечисленные выше, имеют большое значение и характерны для ряда, точнее, в виде двух соотношений T2T/T2S и T2T/T2W.

Примечание: отсек может быть охарактеризован парой следующих соотношений:

(T2T/T2W и T2T/T2S) для отсека, находящегося вблизи торцевой стенки 7 с одной стороны и плоскости симметрии с другой стороны;

(T2T/T2S и T2T/T2S) для средней секции с плоскостями 11 симметрии с обоих концов;

(T2T/T2W и T2T/T2W) для секции с торцевыми стенками 7 с обоих концов в случае небольшого риформера лишь с одной секцией. Данную конфигурацию будут применять для вариантов моделирования, представленных далее, и для графических материалов в соответствии с вариантами моделирования, предназначенными для описания настоящего изобретения.

На следующих фигурах представлены различные варианты распределения трубок, в отношении которых были применены моделирования и получены результаты.

На фиг. 7 изображены 3 различных варианта распределения 16 трубок в отсеке по фиг. 5, характеризующиеся соотношениями (T2T/T2W и T2T/T2W), которые являются одинаковыми; для каждого случая указаны соотношения T2T/T2W, а трубки представлены в виде черного круга, серого круга или белого круга в соответствии с распределением. Пристеночные трубки 8а-1, 8а-2 и 8а-3 расположены на разных расстояниях от торцевой стенки. Внутренние трубки 6-1, 6-2 и 6-3 характеризуются одинаковыми промежутками между ними, а также от пристеночных трубок. Те же самые формы будут использоваться для дифференциации 3 случаев в следующих связанных фигурах. Для трех случаев было установлено распределение 5 горелок с целью обеспечения схожих вариантов строения потока в соответствии с ЕР 15307007.3.

На фиг. 8 для тех же 3 случаев изображено различие между периферийной температурой трубки на высоте в 6 м и средней температурой трубки на той же высоте. Для каждого случая изображены пристеночная трубка и внутренняя трубка: 8а-1 и 6-1, 8а-2 и 6-2, и, наконец, внешняя трубка 8а-3 и внутренняя трубка 6-3.

Результаты численного моделирования показывают, что пристеночные трубки будут больше или меньше нагреваться в зависимости от распределения трубок. Когда расстояние между стенкой и пристеночной трубкой превышает шаг трубок (расстояние между двумя внутренними трубками), пристеночная трубка перегревается, при этом эффект наблюдается для упоминаемого случая в виде черного круга при соотношениях T2T/T2W ~ 0,7. Профиль температур по периферии пристеночной трубки, ближайшей к внутренней трубке, соответствует для упоминаемого случая с серым кругом при соотношениях T2T/T2W = 1 (т.е. расстояние между пристеночной трубкой и ближайшей торцевой стенкой соответствует расстоянию промежутков между трубками). В упоминаемом случае с белым кругом пристеночная трубка была расположена слишком близко к торцевой стенке, что ведет недостаточному нагреву углового сектора трубки, обращенного к торцевой стенке. Если пристеночная трубка расположена слишком близко к стенке, то это приведет к затруднению теплопередачи от горячих газов. Следовательно, полоса стенки, расположенная в тени трубки, будет выделять меньше излучаемого теплового потока по сравнению с другими областями стенки.

На фиг. 9 изображен профиль максимальной температуры поверхностного слоя трубки для тех же 3 случаев, причем подтверждаются наблюдения, выполненные для периферийного профиля трубки: профиль температуры трубок, упоминаемый в виде серого круга, является более равномерным и правильным, причем диапазон отклонения температуры между самой горячей и самой холодной трубами составляет приблизительно 5°C, тогда как упоминаемый в виде черного круга случай приводит к тому, что разброс температур составляет приблизительно 8°C, а профиль температуры трубок, обозначенный в виде белого круга, показывает значительный недогрев пристеночной трубки, приводя к тому, что максимальный разброс температур составляет приблизительно 19°C.

Для поиска общих правил проектирования было проведено параметрическое исследование на 10 примерах эталонных отсеков с различными значениями расстояний T2T, T2S и T2W. Данное исследование позволило определить наилучшие соотношения T2T/T2W и T2T/T2S, что, таким образом, позволило определить лучшие правила проектирования, а также оценить прирост в отношении обеспечения однородности температуры между трубками.

На фиг. 10 показана таблица, которая представляет влияние схемы расположения трубок на процент нагрузки (теплота, передаваемая трубкам) внешней трубки относительно нагрузки самой ближней внутренней трубки внутри различных эталонных отсеков. Относительная нагрузка внешней трубки по отношению к нагрузке внутренней трубки будет определять величину тепла, полученного внешней трубкой по отношению к внутренней.

Поскольку основной целью настоящего изобретения является решение проблемы неравномерности значений температуры вдоль ряда трубок, это означает, что лучшими примерами являются те, которые предоставляют настолько низкое значение относительной нагрузки, насколько это возможно; причем в показанных примерах самые высокие значения относительной нагрузки составляют приблизительно 3%, в то время как самые низкие близки к -3%. Показатель относительной нагрузки, близкий к 0%, указывает на то, что внутренние и внешние трубки имеют одинаковые показатели температуры, в то время как высокая относительная нагрузка, показатель которой близок к 3% или более, указывает на перегрев внешней трубки, а низкий показатель относительной нагрузки, близкий к -3% или менее, указывает на недостаточный нагрев внешней трубки. Таким образом, чем ближе относительная нагрузка в отсеке к 0%, тем выше эксплуатационные характеристики установки для парового риформинга метана.

Были получены следующие правила для соотношений трубок:

для того чтобы значение относительной нагрузки находилось в интервале между -2% и 2%, соотношения $T2T/T2W$ и $T2T/T2S$ должны составлять более 0,5 и менее 2;

если соотношения $T2T/T2W$ и $T2T/T2S$ составляют более 0,75 и менее 1,25, то ожидаемое значение относительной нагрузки будет находиться в интервале между -1% и 1%.

Наконец, правило для соотношений обычно не зависит от количества трубок (как и от количества горелок) в иллюстративных отсеках.

На основании вышеприведенных результатов предложили правила проектирования, которые необходимо применять в отношении схемы расположения трубок на всем протяжении рядов с целью получения более однородных значений температуры трубок на всем протяжении рядов.

Соблюдение упомянутых выше правил будет способствовать предотвращению перегрева и выхода из строя трубок, благодаря чему случаи замены или неисправностей трубок снизятся.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Печь (1) для осуществления эндотермического способа, содержащая трубки (2), содержащие катализатор для конверсии газообразного сырья, причем трубки расположены рядами (5) внутри печи, при этом горелки (3) установлены между трубками и между трубками и стенками печи параллельно ряду трубок, так что между смежными рядами трубок расположен ряд горелок, и при этом ряды (6) горелок и ряды (5) трубок заканчиваются торцевыми стенками (7) и разделены на секции (10), при этом расстояние от пристеночной трубки (8a) до торцевой стенки в каждом ряду трубок составляет $T2W$, расстояние между двумя смежными внутренними трубками (8c) в секции составляет $T2T$, а расстояние между двумя крайними трубками (8b), расположенными наиболее близко к плоскости симметрии, в двух смежных секциях составляет $T2S$, причем плоскость симметрии является плоскостью, расположенной посередине пространства между двумя смежными секциями (10), причем указанные расстояния $T2W$, $T2T$ и $T2S$ измеряют параллельно рядам трубок, отличающаяся тем, что трубки в рядах расположены таким образом, что соотношения $T2T/T2W$ и $T2T/T2S$ составляют более 0,5 и менее 2.

2. Печь по п.1, отличающаяся тем, что $T2T/T2W$ и $T2T/T2S$ составляют более 0,75 и менее 1,75.

3. Печь по п.2, отличающаяся тем, что $T2T/T2W$ и $T2T/T2S$ равны.

4. Печь по любому из пп.1-3, отличающаяся тем, что горелки установлены на потолке печи.

5. Печь по любому из пп.1-3, отличающаяся тем, что горелки установлены на полу печи и обеспечивают пламя, направленное вертикально вверх.

6. Печь по любому из предыдущих пунктов, отличающаяся тем, что представляет собой печь парового риформинга метана.

7. Эндотермический способ, подлежащий осуществлению в печи (1), содержащей трубки (2) и горелки (3), причем указанный способ включает

введение газообразного сырья и пара в трубки (2), содержащие катализатор для конверсии газообразного сырья, при этом трубки расположены рядами (5) внутри печи,

сжигание топлива с помощью воздуха в горелках, которые установлены между трубками и между трубками и стенками печи параллельно ряду трубок так, что между смежными рядами трубок расположен ряд горелок,

выпуск продуктов, образовавшихся в трубках,

при этом ряды горелок и ряды трубок заканчиваются торцевыми стенками (7) и разделены на секции (10), причем расстояние от пристеночных горелок (8a) до торцевой стенки составляет $T2W$, расстояние между двумя смежными трубками (8c) в секции составляет $T2T$, а расстояние между двумя крайними трубками, расположенными наиболее близко к плоскости симметрии, в двух смежных секциях составляет $T2S$, причем плоскость симметрии является плоскостью, расположенной посередине пространства

между двумя смежными секциями (10), причем указанные расстояния $T2W$, $T2T$ и $T2S$ измеряют параллельно рядам трубок, отличающийся тем, что трубки в рядах расположены таким образом, что соотношения $T2T/T2W$ и $T2T/T2S$ составляют более 0,5 и менее 2.

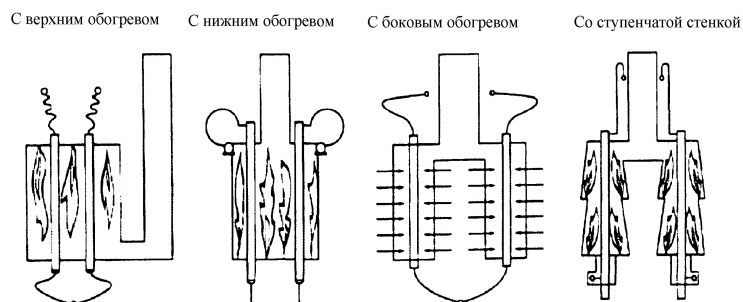
8. Способ по п.7, отличающийся тем, что предназначен для парового риформинга метана.

9. Способ по п.7 или 8, отличающийся тем, что соотношения $T2T/T2W$ и $T2T/T2S$ составляют более 0,75 и менее 1,75.

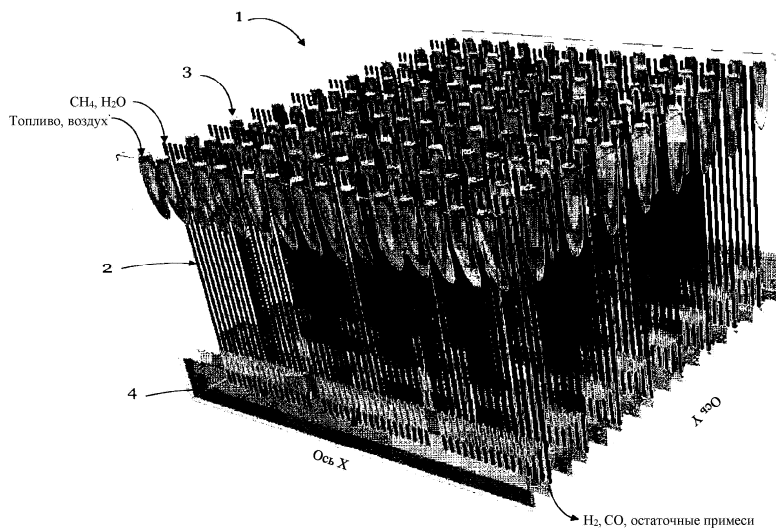
10. Способ по п.9, отличающийся тем, что соотношения $T2T/T2W$ и $T2T/T2S$ равны.

11. Способ по пп.7-10, отличающийся тем, что печь представляет собой печь с верхним обогревом.

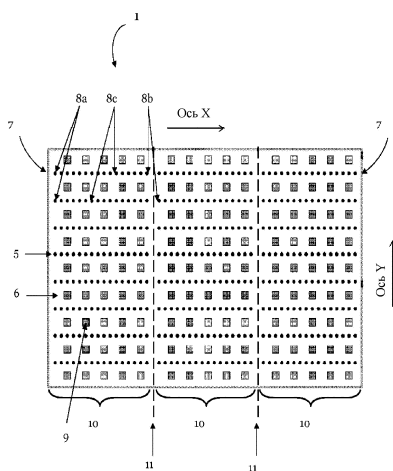
12. Способ по пп.7-10, отличающийся тем, что печь представляет собой печь с нижним обогревом.



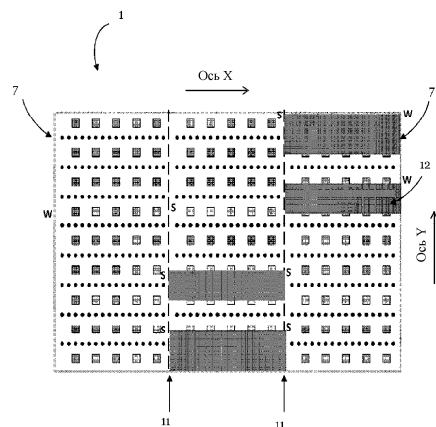
Фиг. 1



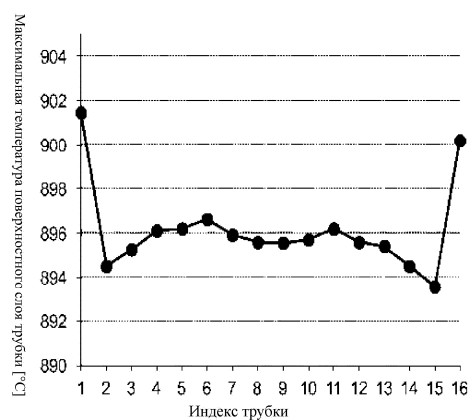
Фиг. 2



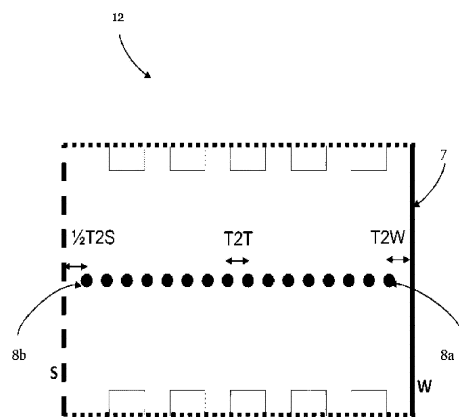
Фиг. 3



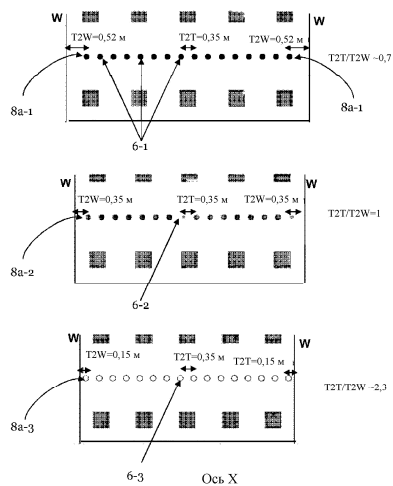
Фиг. 4



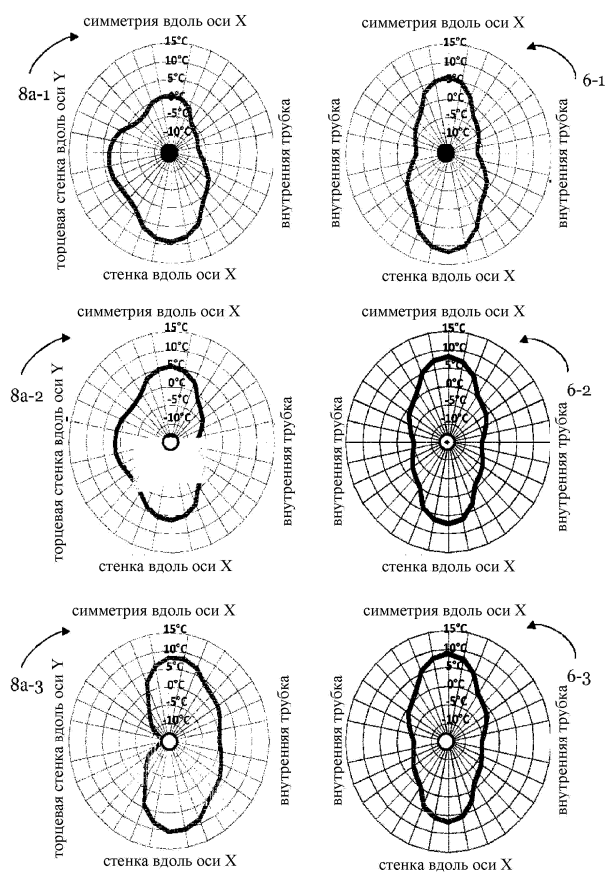
Фиг. 5



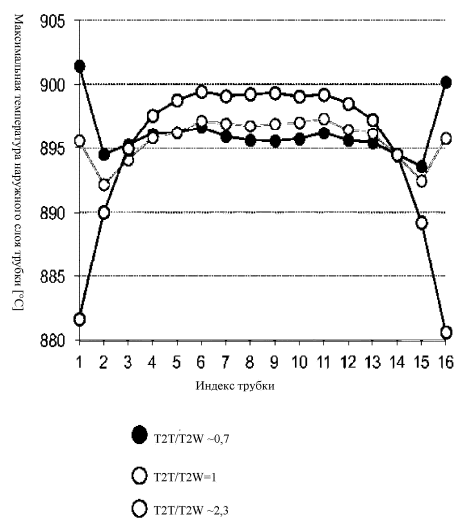
Фиг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8



Фиг. 9

Количество труб на отсек	T2T	T2S	T2T/T2S	Относительная нагрузка [%]
17	300	1400	0,21	2,96 %
18	300	800	0,38	2,48 %
17	300	800	0,38	2,54 %
15	300	400	0,75	1,70 %
16	300	300	1,00	-0,11 %
Количество труб на отсек	T2T	T2W	T2T/T2W	Относительная нагрузка [%]
16	350	520	0,67	1,65 %
15	300	390	0,77	1,20 %
16	300	375	0,80	1,31 %
16	350	350	1,00	1,31 %
16	350	150	2,33	-3,21 %

Фиг. 10

