

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **035548**

(13) **B1**

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

(45) Дата публикации и выдачи патента
2020.07.06

(21) Номер заявки
201892171

(22) Дата подачи заявки
2017.04.12

(51) Int. Cl. **C10G 9/20** (2006.01)
B01J 19/00 (2006.01)
B21C 37/15 (2006.01)
F28F 1/40 (2006.01)

(54) **РЕАКТОР ДЛЯ КРЕКИНГОВОЙ ПЕЧИ**

(31) **16164921.5**

(32) **2016.04.12**

(33) **EP**

(43) **2019.03.29**

(86) **PCT/EP2017/058850**

(87) **WO 2017/178551 2017.10.19**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**БАСФ СЕ (DE); БАСФ АНТВЕРПЕН
НВ; УНИВЕРСИТЕЙТ ГЕНТ (BE)**

(72) Изобретатель:
**Ван Каувенберге Давид Ё., Ван Геем
Кевин М., Флоре Енс, Марин Гуй Б.
(BE), Лайб Хайнрих (DE)**

(74) Представитель:
Юрчак Л.С. (KZ)

(56) GB-A-969796

US-A1-2007028860

US-A1-2014166252

US-A-3231014

US-A1-2007163757

OFFICE OF INDUSTRIAL
TECHNOLOGIES ENERGY EFFICIENCY AND
RENEWABLE ENERGY: "ENHANCED HEAT
EXCHANGERS FOR PROCESS HEATERS",
Internet November 2001 (2001-11), pages 1-2,
XP055301977, Retrieved from the Internet:
URL: [http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/
resources/chemicals/pdfs/processheaters.pdf](http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/resources/chemicals/pdfs/processheaters.pdf) [retrievd
on 2016-09-13] the whole document

US-A-5950718

(57) Настоящее изобретение относится к реактору для крекинга углеводородов, при этом реактор имеет внутреннюю стенку и характеризуется тем, что внутренняя стенка содержит множество вогнутых впадин, образованных на поверхности вышеупомянутой внутренней стенки.

B1

035548

**035548
B1**

Область техники

В настоящем документе предложены реактор для крекинга углеводородов, печь, содержащая реактор для крекинга углеводородов, и способ получения легких олефинов из углеводородного исходного материала.

Уровень техники

В нефтехимической промышленности легкие олефины часто получают из предшествующего исходного материала способом термического крекинга. Этот способ крекинга предусматривает нагревание предшествующего исходного материала, содержащего более тяжелые углеводороды. Вследствие увеличения тепловой энергии разрываются углеродные связи, присутствующие в предшествующем исходном материале, и в результате этого тяжелые углеводороды, имеющие длинные молекулярные цепи, превращаются в легкие углеводороды, имеющие цепи меньшей длины. Необходимые температуры для инициирования процесса крекинга могут достигать тысячи градусов в зависимости от исходного углеводорода и желательного конечного продукта крекинга. Как правило, другие условия процесса крекинга, такие как продолжительность выдерживания, разбавление, поток, давление и т.д., можно регулировать для достижения наиболее высокого возможного выхода.

Обычный процесс парового крекинга происходит внутри реактора, подвешенного в большой газовой печи, которая нагревает реактор снаружи. Часто от десятков до сотен указанных реакторов устанавливают рядом друг с другом в общей печи для увеличения производственных мощностей вплоть до нескольких миллионов тонн в год (млн т/год). Указанные реакторы, иногда называемые термином "крекинговые трубы", изготавливают в многочисленных различных формах и размерах в попытке увеличения мощности, повышения селективности, выхода и/или термического коэффициента полезного действия процесса.

В течение парового крекинга предшествующий исходный материал, вводимый в газообразном состоянии, при высокой скорости поступает в реактор, где его разбавляют паром и нагревают при отсутствии кислорода. Однако в результате этого процесса осажденный кокс, т.е. твердый остаток, состоящий из углерода, может накапливаться на внутренней стенке реактора. Это осаждение кокса производит несколько неблагоприятных эффектов на производительность указанных реакторов.

(1) Кокс имеет низкую теплопроводность, и, следовательно, осаждение кокса может снижать термический коэффициент полезного действия системы, что, в свою очередь, потребует увеличения скорости потока топлива для поддержания одинакового уровня производительности и, таким образом, дополнительно увеличит скорости осаждения кокса. Кроме того, различие скорости осаждения кокса по ряду реакторов, подвешенных в общей печи, будет препятствовать надлежащему регулированию температуры, требуемому для поддержания желательной селективности процесса. Низкая теплопроводность слоя кокса также приводит к повышению температуры металлических труб, которая может достигать расчетных пределов для используемого сплава.

(2) Постоянное осаждение кокса может уменьшать площадь поперечного сечения реактора, доступную для газообразного исходного материала, приводя к повышению скорости технологического газа и повышению перепада давления в реакторе. Для компенсации этого перепада давления должно быть увеличено суммарное давление внутри реактора, что неизбежно приводит к снижению селективности процесса по отношению к легким олефинам вследствие увеличения скорости вторичных реакций между указанными олефинами.

(3) Присутствие кокса уменьшает выход по углероду процесса крекинга, поскольку все атомы углерода в противном случае были бы собраны в форме легких олефинов вместо введения в кокс, и, следовательно, вызывает потери.

Для ограничения неблагоприятных эффектов осаждения кокса с течением времени требуются периодические остановки реакторов для удаления кокса. Процесс удаления кокса, как правило, предусматривает отключение всей печи в течение суток или более продолжительного срока для окисления отложений кокса и их удаления с внутренней стенки всех реакторов. Следовательно, процесс удаления кокса резко уменьшает производительность печи посредством прерывания периода эксплуатации и увеличивает производственные расходы за счет дополнительных затрат материалов и энергии, требуемых для осуществления процесса удаления кокса и последующего возобновления процесса крекинга. Кроме того, учитывая экзотермическую природу удаления кокса, могут возникать термические повреждения реакторов в течение удаления кокса.

Внутренние ребра, такие как ребра, раскрытые в документе GB 969796, могут обеспечивать улучшенную теплопередачу посредством увеличения площади внутренней поверхности. Однако при увеличении открытой площади поверхности реактора увеличивается также слой ламинарного потока в контакте со стенкой реактора. В этом слое сочетаются большая продолжительность выдерживания и высокая температура, приводя к значительным потерям выхода ценных продуктов. Кроме того, увеличивается площадь стенки реактора, которая открыта для образования отложений кокса. Следовательно, хотя термические эксплуатационные характеристики труб могут улучшаться, воздействие на образование кокса и продолжительность эксплуатации может даже оказаться отрицательным.

В документе US 5950718 поставлена цель решения указанных проблем посредством расположения

выпуклых элементов на стенке реактора для разрушения ламинарного слоя и усиления турбулентного перемешивания. Хотя такие устройства могут повышать коэффициент теплопередачи, они обычно страдают от избыточного торможения, когда потенциальная энергия в форме давления переходит в турбулентную кинетическую энергию. Кроме того, такие препятствия потока вызывают картины рециркуляции потока с локально высокими значениями продолжительности выдерживания, при которых становится вероятным образование кокса. Раздельная сварка каждого из элементов также вносит дополнительный риск обслуживания, поскольку элементы могут разрушаться вследствие высоких локальных термических и сдвиговых напряжений, которые на них воздействуют.

Соответственно существует потребность в новых технологиях, которые обеспечивают увеличение продолжительности эксплуатации реакторов и печей парового крекинга. Существует также потребность в технологиях, которые предназначены для повышения селективности по отношению к олефинам в течение термохимического процесса. Кроме того, существует потребность в технологиях, которые предназначены для улучшения теплопередачи. Существует также потребность в технологиях, которые предназначены для уменьшения термического напряжения. Кроме того, существует потребность в технологиях, которые предназначены для эксплуатации в более тяжелых условиях, посредством увеличения максимальной температуры технологического газа. Существует также потребность в технологиях, которые предназначены для эксплуатации при повышенной производительности, посредством увеличения максимальной нагрузки. Кроме того, существует потребность в технологиях, которые предназначены для ограничения возникновения и/или величины перепада давления.

Сущность изобретения

Изобретение, которое раскрыто в настоящем документе, удовлетворяет одну или несколько из вышеупомянутых потребностей. Предпочтительные варианты осуществления настоящего изобретения, которые раскрыты в настоящем документе, удовлетворяют одну или несколько из вышеупомянутых потребностей.

Согласно первому аспекту настоящее изобретение относится к реактору для крекинга углеводородов, при этом реактор имеет внутреннюю стенку и характеризуется тем, что внутренняя стенка содержит множество вогнутых впадин, образованных на поверхности вышеупомянутой внутренней стенки. Предпочтительно реактор представляет собой реактор пиролиза, термического крекинга или парового крекинга.

Согласно некоторым предпочтительным вариантам осуществления каждая вогнутая впадина из множества вогнутых впадин охарактеризована глубиной e впадины, где e составляет по меньшей мере 0,01 и не более чем 1,0 см, предпочтительно по меньшей мере 0,1 и не более чем 0,5 см.

Согласно некоторым предпочтительным вариантам осуществления каждая вогнутая впадина из множества вогнутых впадин охарактеризована диаметром d впадины, где d составляет по меньшей мере 0,1 и не более чем 5,0 см, предпочтительно по меньшей мере 0,5 и не более чем 2,0 см.

Согласно некоторым предпочтительным вариантам осуществления каждая вогнутая впадина из множества вогнутых впадин дополнительно охарактеризована отношением (DDR) глубины к диаметру, определяемым следующим образом:

$$DDR=e/d;$$

где DDR составляет по меньшей мере 0,01 и не более чем 0,5, предпочтительно по меньшей мере 0,05 и не более чем 0,4, предпочтительнее по меньшей мере 0,1 и не более чем 0,3.

Согласно некоторым предпочтительным вариантам осуществления форма каждой впадины из множества вогнутых впадин охарактеризована геометрическим признаком, предпочтительно гладким или изогнутым краем, например, по меньшей мере, сечением сферической, сфероидной, яйцеобразной или каплевидной формы.

Согласно некоторым предпочтительным вариантам осуществления по меньшей мере одна впадина из множества впадин дополнительно содержит две или более областей вторичной кривизны, имеющих иной радиус кривизны, чем главная впадина, причем области вторичной кривизны расположены на краю или в пределах главной впадины. На фиг. 3 представлен пример таких областей вторичной кривизны.

Согласно некоторым предпочтительным вариантам осуществления, по меньшей мере, некоторые из множества вогнутых впадин расположены в одном или нескольких рисунках, где рисунок предпочтительно является линейным, шахматным и/или перекрестным.

Согласно некоторым предпочтительным вариантам осуществления по меньшей мере часть внутренней стенки является гладкой, т.е. не покрытой какими-либо вогнутыми впадинами, и дополнительно характеризуется площадью покрытия (АС), определяемой следующим образом:

$AC(\%) = \text{полная площадь внутренней стенки, покрытая впадинами} / \text{полная площадь внутренней стенки} \times 100;$
где АС составляет по меньшей мере 1 и не более чем 99%, предпочтительно по меньшей мере 20 и не более чем 90%.

Согласно некоторым предпочтительным вариантам осуществления реактор имеет трубчатую форму и его характеризуют

полная длина реактора, составляющая по меньшей мере от 10 до не более чем 400 м;

внутренний диаметр, составляющий по меньшей мере от 2 до не более чем 20 см, предпочтительно по меньшей мере 3 и не более чем 15 см;

наружный диаметр, превышающий внутренний диаметр и составляющий по меньшей мере 3,0 и не более чем 22,0 см, предпочтительно по меньшей мере 5,0 и не более чем 17,0 см; и

толщина стенки, определяемая как полуразность между наружным диаметром и внутренним диаметром и составляющая по меньшей мере 0,3 и не более чем 2,0 см, предпочтительно по меньшей мере 0,5 и не более чем 1 см.

Согласно некоторым предпочтительным вариантам осуществления толщина стенки составляет более чем двойная глубина e впадины ($2 \times e$), причем толщина стенки предпочтительно составляет более чем $3 \times e$. Как правило, толщина стенки всегда составляет более чем глубина e впадины.

Согласно некоторым предпочтительным вариантам осуществления внутренняя стенка содержит металл, металлический сплав, керамический материал и/или их комбинацию.

Согласно некоторым предпочтительным вариантам осуществления каждая впадина из множества вогнутых впадин содержит такой же материал, как реактор.

Согласно второму аспекту настоящее изобретение относится к печи, содержащей реактор согласно первому аспекту настоящего изобретения и соответствующим предпочтительным вариантам осуществления.

Согласно третьему аспекту настоящее изобретение относится к способу изготовления реактора согласно первому аспекту настоящего изобретения и соответствующим предпочтительным вариантам осуществления, при этом способ предусматривает одну из следующих стадий:

- формование;
- центробежное литье;
- выемка; и/или
- осаждение.

Согласно четвертому аспекту настоящее изобретение относится к способу получения легких олефинов в реакторе согласно первому аспекту настоящего изобретения и соответствующим предпочтительным вариантам осуществления или в печи согласно второму аспекту настоящего изобретения и соответствующим предпочтительным вариантам осуществления, при этом способ предусматривает стадию крекинга углеводородного исходного материала с образованием легких олефинов при температуре, составляющей по меньшей мере 700 и не более чем 900°C.

Краткое описание чертежей

Условные номера имеют следующие значения: (100) - реактор пиролиза термического крекинга или парового крекинга; (150) - поверхность внутренней стенки реактора; (200) - вогнутая впадина.

На фиг. 1 представлена развертка внутренней поверхности трубы согласно настоящему изобретению для иллюстрации варианта осуществления расположения впадин, образованных на внутренней поверхности реактора. На данной фигуре параметр d представляет собой диаметр впадины (измеряемый в направлении потока). Параметр t_2 представляет собой расстояние между последовательными рядами впадин в направлении потока, расположенными под углом сдвига γ по отношению друг к другу. Параметр t_1 представляет собой азимутальное расстояние между соседними впадинами и может быть вычислен по числу n впадин на поперечном сечении и диаметру D трубы как $\pi D/n$.

На фиг. 2 представлено изображение поперечного сечения впадины на изогнутой цилиндрической поверхности для иллюстрации различных параметров индивидуальной впадины, что далее описано в примере 1. На данной фигуре представлена труба с радиусом R и толщиной t стенки, на которой вытиснена впадина сферической формы с радиусом r . Углы α и β представляют собой противоположные углы дуги впадины от центра впадины и центра трубы соответственно. Вследствие изогнутой поверхности цилиндрической трубы диаметр d впадины в направлении вдоль потока отличается от кажущегося диаметра d' в азимутальном направлении. Кроме того, вследствие кривизны трубы, кажущаяся глубина $e + e$ может быть больше, чем действительная глубина e впадины.

На фиг. 3 представлена форма впадины с потенциально уменьшенной потерей давления посредством образования трех концентрических областей S_1 , S_2 и S_3 с кривизной, которая составляет соответственно $1/r_1$, $-1/r_2$ и $-1/r_3$. В данном случае глубина e и диаметр d впадины могут быть вычислены как предельные значения конечной формы впадины.

На фиг. 4 представлена развертка (верхний чертеж) и радиальное сечение (нижний чертеж) внутренней поверхности трубы согласно настоящему изобретению для иллюстрации впадин различных форм, включая сферические (а), каплевидные (b), сфероидные (c) и наклонные сфероидные (d) формы впадин. Для наклонной сфероидной впадины угол δ определен как угол между направлением потока и большой осью сфероида.

На фиг. 5 представлен график, иллюстрирующий потерю давления и увеличение теплопередачи в сопоставлении со сравнительной гладкой трубой для разнообразных комбинаций параметров впадин и трубы предшествующего уровня техники, что далее описано в примере 2.

На фиг. 6 представлен график, иллюстрирующий зависимость числа Рейнольдса для относительно увеличения теплопередачи и потери давления согласно двум вариантам осуществления настоящего изобретения по сравнению с трубой предшествующего уровня техники, что далее описано в примере 3.

На фиг. 7(a) представлен график линий потока на вогнутой поверхности с отношением глубины к диаметру впадины, составляющим 0,45, полученный с использованием усредненных по времени данных моделирования методом крупных вихрей между $t=1,8$ с и $t=2,0$ с, что далее описано в примере 5.

На фиг. 7(b) представлен график, иллюстрирующий мгновенную скорость в направлении потока в местах "слева" и "справа", которые указаны на фиг. 7(a), что далее описано в примере 5.

Подробное описание изобретения

Перед раскрытием системы и способа согласно настоящему изобретению следует отметить, что настоящее изобретение не ограничено конкретными описанными системами и способами или комбинациями, поскольку такие системы, способы и комбинации могут, разумеется, варьироваться. Кроме того, следует понимать, что не предусмотрено ограничение терминологии, используемой в настоящем документе, поскольку объем настоящего изобретения будет ограничен только прилагаемой формулой изобретения.

При использовании в настоящем документе формы единственного числа, которым предшествуют неопределенные и определенные артикли в английском тексте, означают как единственное, так и множественное число, если иное условие четко не определено. Термины "включающий в себя", "включает в себя" и "включенный" при использовании в настоящем документе представляют собой синонимы терминов "содержащий", "содержит" и "содержащийся" и являются включительными или неограничительными и не исключают не перечисленных дополнительных компонентов, элементов или технологических стадий. Следует понимать, что термины "включающий в себя", "включает в себя" и "включенный" при использовании в настоящем документе охватывают термины "состоящий из", "состоит" и "состоит из".

Численные диапазоны, представленные посредством конечных точек, включают в себя все целые и дробные числа, находящиеся в пределах соответствующих диапазонов, а также представленные конечные точки. Термин "приблизительно" или "примерно" при использовании в настоящем документе в отношении измеримого значения, такого как параметр, количество, продолжительность времени и т.д., предназначен для описания отклонений, составляющих $\pm 10\%$ или менее, предпочтительно $\pm 5\%$ или менее, предпочтительнее $\pm 1\%$ или менее и еще предпочтительнее $\pm 0,1\%$ или менее от указанного значения, при том условии, что данные отклонения являются допустимыми для осуществления настоящего изобретения. Следует понимать, что значение, которому предшествует термин "приблизительно" или "примерно", также является описанным как конкретное и предпочтительное.

Хотя термины "один или несколько" или "по меньшей мере один" в отношении, например, одного или нескольких элементов или по меньшей мере одного элемента из группы элементов являются очевидными сами по себе, посредством последующих примеров данные термины представляют собой, помимо прочего, ссылку на любой из указанных элементов или на любые два или более из указанных элементов, такую как, например, ссылка на любое число, составляющее не менее 3, 4, 5, 6 или 7 и т.д. из указанных элементов и вплоть до всех из указанных элементов.

Вся литература, цитируемая в данном описании, настоящим включена в него посредством ссылки во всей своей полноте. В частности, сведения из всей литературы, конкретно цитируемой в настоящем документе, включены в него посредством ссылки.

Если не определено иное условие, все термины, используемые для раскрытия настоящего изобретения, включая технические и научные термины, имеют значения, которые, как правило, являются понятными для обычного специалиста в области техники, к которой относится настоящее изобретение. В целях дополнительного разъяснения определения терминов представлены для лучшего понимания описания настоящего изобретения.

В следующих разделах различные аспекты настоящего изобретения определены более подробно. Каждый аспект, определяемый таким способом, может быть объединен с любым другим аспектом или аспектами, если четко не определено иное условие. В частности, любой признак или вариант осуществления, указанный как предпочтительный или преимущественный, может быть объединен с любым другим признаком или вариантом осуществления, указанным как предпочтительный или преимущественный.

Используемые в настоящем описании термины "один вариант осуществления" или "вариант осуществления" означают, что конкретные признаки, структуры или характеристики, описанные в сочетании с вариантом осуществления, включены по меньшей мере в один вариант осуществления настоящего изобретения. Таким образом, выражения "согласно одному варианту осуществления" или "согласно варианту осуществления", приведенные в различных разделах настоящего описания, не должны, но могут относиться к одному и тому же варианту осуществления. Кроме того, конкретные признаки, структуры или характеристики могут быть объединены любым подходящим образом в одном или нескольких вариантах осуществления, что должно быть очевидным для специалиста в данной области техники из настоящего описания. Кроме того, хотя некоторые варианты осуществления, описанные в настоящем документе, включают в себя некоторые, но не другие признаки, включенные в другие варианты осуществления, комбинации признаков различных вариантов осуществления считаются находящимися в пределах объема настоящего изобретения и образуют различные варианты осуществления, как должны понимать специалисты в данной области техники. Например, в прилагаемой формуле изобретения любые из заявленных вариантов осуществления могут быть использованы в любой комбинации.

В данном описании настоящего изобретения приведены ссылки на сопровождающие фигуры, которые составляют его часть и в которых представлены исключительно в качестве иллюстрации конкретные варианты осуществления, в которых настоящее изобретение может быть практически реализовано. Заключенные в скобки или приведенные жирным шрифтом условные номера, присвоенные соответствующим элементам, просто перечисляют элементы в качестве примера, что не предназначено для ограничения соответствующих элементов. Следует понимать, что могут быть использованы другие варианты осуществления и могут быть произведены структурные или логические изменения без выхода за пределы объема настоящего изобретения. Таким образом, следующее подробное описание не следует рассматривать в ограничительном смысле, и объем настоящего изобретения определен прилагаемой формулой изобретения.

Термин "процесс парового крекинга" означает химическую реакцию, в которой одна или несколько углеродных связей, содержащихся в предшествующем исходном материале, разрываются за счет тепловой энергии с разложением крупных молекул предшествующего исходного материала на мелкие, предпочтительно ненасыщенные молекулы продуктов. Термин "пиролиз" означает термохимическое разложение органического материала при повышенных температурах и отсутствии кислорода (или любого галогена); он представляет собой форму термоллиза и включает в себя любые термины, которые могут считать родственными или синонимичными специалисты в данной области техники. Подробное описание парового крекинга можно найти в статье Zimmermann, H. и Walzl, R. "Ethylene" книги "Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry", Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: 2000 на страницах 469-493, которые во всей своей полноте включены в настоящий документ посредством ссылки.

Термин "предшествующий исходный материал" означает группу органических соединений, которые вводят в реактор, где они претерпевают термохимическое разложение с превращением в продукт; предпочтительно предшествующий исходный материал содержит углеводороды, которые разлагаются на (легкие) олефины в процессе парового крекинга. Примеры подходящего предшествующего исходного материала могут быть выбраны из группы, включающей в себя этан, пропан, бутан, сжиженный нефтяной газ (СНГ), (возобновляемый) лигроин, легкий газойль, вакуумный газойль, низшие газовые конденсаты, (гидрообработанную) сырую нефть и т.д., и/или может быть осуществлен совместный крекинг соответствующих комбинаций. Для любого исходного материала, проявляющего образование (отложение) кокса, будет достигнута конкретная польза согласно настоящему изобретению.

Термин "продукт" означает группу органических соединений, которые получают из реактора после того, как термохимическая реакция преобразует предшествующий исходный материал. Предпочтительно продукт содержит (легкие) олефины, получаемые из углеводородов, разлагающихся в процессе парового крекинга. Примеры желательного продукта могут быть выбраны из группы, включающей в себя этилен, пропилен, бензол, бутадиев и т.д. и/или соответствующие комбинации.

Термин "реактор" при использовании в настоящем документе означает устройство или конструкцию согласно настоящему изобретению для осуществления химической реакции; предпочтительно вышеупомянутая химическая реакция включает в себя паровой крекинг для получения олефинов. Термин "внутренняя стенка" при использовании в настоящем документе означает площадь поверхности, которая находится в пределах конструкции реактора; предпочтительно в контакте с пространством, в котором происходит химическая реакция. Термин "наружная стенка" при использовании в настоящем документе означает площадь поверхности, которая находится в конструкции за пределами реактора; предпочтительно в пространстве, из которого тепловая энергия поступает в реактор. Примеры разнообразных форм труб реактора можно найти в работе van Goethem, M.W.M. и Jelsma, E. "Numerical and experimental study of enhanced heat transfer and pressure drop for high temperature applications", Chem. Eng. Res. Des. 2014, 92 (4), 663-671, которая во всей своей полноте включена в настоящий документ посредством ссылки.

Термин "печь", также известный как "нагревательная камера", при использовании в настоящем документе означает устройство или конструкцию, содержащую один или несколько реакторов согласно настоящему изобретению для осуществления химической реакции; предпочтительно вышеупомянутая химическая реакция включает в себя паровой крекинг для получения олефинов. Печь выполнена с возможностью нагревания до (очень) высокой температуры. Общая конструкция печи известна в технике и может дополнительно содержать одно или несколько устройств, выполненных с возможностью нагревания и распределения тепла, таких как, например, топка или горн, дымоход, соединительные трубы и т.д. Подробное описание конструкций печи, подходящих для парового крекинга, можно найти в статье Zimmermann, H. и Walzl, R. "Ethylene" книги "Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry", Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: 2000 на страницах 482-491, которые во всей своей полноте включены в настоящий документ посредством ссылки.

Термин "впадина" при использовании в настоящем документе означает вогнутое углубление на поверхности внутренней стенки реактора; при этом впадина предпочтительно представляет собой вогнутое углубление; причем впадина предпочтительно является полой по отношению к внутреннему пространству реактора. Термин "вогнутый" при использовании в настоящем документе означает площадь поверхности, которая изогнута внутрь, например во внутреннее пространство сферы или сфероида; он включает в себя термины "углубленный", "вдавленный", "направленный внутрь" и т.д. Термин "рисунок" при ис-

пользовании в настоящем документе означает упорядоченное расположение впадин в регулярном и повторяющемся формате, который различается в зависимости от модели или конструкции.

Число Рейнольдса (Re) определено как отношение мгновенных (или инерциальных) сил к вязким силам и, таким образом, представляет собой количественную оценку относительной важности сил двух указанных типов для данных условий потока. Мгновенные силы могут относиться к скорости потока и шкале длины. В случае цилиндрической трубы это приводит к следующему определению: $Re = uD/\nu$, где ν представляет собой кинематическую вязкость.

Согласно первому аспекту настоящее изобретение относится к реактору для крекинга углеводородов, причем реактор имеет внутреннюю стенку и охарактеризован тем, что внутренняя стенка содержит множество вогнутых впадин, образованных на поверхности вышеупомянутой внутренней стенки. Предпочтительно все впадины являются вогнутыми. Предпочтительно реактор представляет собой реактор пиролиза, термического крекинга или парового крекинга. Согласно некоторым вариантам осуществления реактор представляет собой термохимический реактор. Согласно некоторым вариантам осуществления реактор представляет собой реактор для термоллиза, предпочтительнее реактор для пиролиза. Согласно наиболее предпочтительным вариантам осуществления реактор представляет собой реактор парового крекинга.

Предпочтительно на стенке реактора практически отсутствует катализатор, предпочтительно катализатор не помещают внутрь реактора. Например, в случае реактора риформинга реактор обычно содержит катализатор, помещенный внутри реактора. В случае реактора пиролиза, термического крекинга или парового крекинга внутри реактора обычно отсутствует катализатор. Однако сама стенка может содержать элементы, которые обладают каталитической активностью.

Предпочтительно реактор выполнен с возможностью выдерживания температур от 700 до 1200°C. Реактор пиролиза, термического крекинга или парового крекинга обычно выполнен с возможностью выдерживания таких температур. Например, реактор может быть изготовлен из хромоникелевого сплава и стали, хрома и стали или алюминиевых сплавов.

Предпочтительно реактор содержит систему удаления кокса. Подходящие системы удаления кокса можно найти в параграфах [0008] и [0009] документа US 20130239999 A1. Указанные параграфы включены в настоящий документ посредством ссылки. Подходящие системы удаления кокса можно также найти в параграфе [0006] документа WO 2016032730 A. Указанный параграф включен в настоящий документ посредством ссылки.

Согласно некоторым вариантам осуществления система удаления кокса содержит впуск и/или выпуск воздуха. Согласно некоторым вариантам осуществления система удаления кокса содержит впуск и/или выпуск пара. Согласно некоторым вариантам осуществления системы удаления кокса содержат впуск воздуха и впуск пара, предпочтительно также выпуск воздуха и выпуск пара. Выпуск может высвобождать воздух и/или пар в атмосферу.

Реактор содержит стенку реактора, которая частично герметически разделяет "внутреннее пространство" и "внешнее пространство"; стенка реактора предпочтительно имеет, по меньшей мере, точку входа и точку выхода, которые позволяют потоку молекул проходить через реактор. Точка входа, через которую предшествующий исходный материал вводят в реактор, называется в настоящем документе термином "вход", и точка выхода, через которую продукт извлекают и/или собирают, называется в настоящем документе термином "выход". Реактор может содержать множество точек входа для каждой точки выхода. Стенки реактора, присоединенные к указанным точкам входа, затем соединяются посредством одной или нескольких коллекторных конструкций в одном или нескольких местах, расположенных ниже по потоку относительно точек входа.

Согласно некоторым вариантам осуществления реактор имеет внутреннюю стенку, которая соединена в пространстве с внутренней областью реактора; предпочтительно внутренняя область представляет собой пространство, где происходит термохимическая реакция; предпочтительнее она представляет собой пространство, где происходит паровой крекинг. Согласно некоторым вариантам осуществления реактор имеет наружную стенку, которая соединена в пространстве с наружной областью реактора; предпочтительно наружная область представляет собой пространство, из которого энергию вводят в реактор; предпочтительнее энергию вводят в форме тепла; наиболее предпочтительно энергию вводят в форме тепла посредством печи.

Предпочтительно внутренняя стенка содержит множество вогнутых впадин. Согласно некоторым вариантам осуществления внутренняя стенка реактора содержит множество полых впадин; предпочтительно впадины углублены внутрь внутренней стенки; наиболее предпочтительно впадины являются вогнутыми. Согласно некоторым вариантам осуществления внутренняя стенка реактора характеризуется тем, что внутренняя стенка содержит множество вогнутых впадин, образованных на поверхности вышеупомянутой внутренней стенки; предпочтительно впадины образуют часть поверхности внутренней стенки.

Согласно некоторым вариантам осуществления реактор характеризуется тем, что внутренняя стенка содержит множество вогнутых впадин, образованных на поверхности вышеупомянутой внутренней стенки.

Наличие впадин внутри внутренней стенки реактора обеспечивает несколько преимуществ, таких как улучшенная теплопередача и уменьшенная скорость осаждения. Улучшение теплопередачи в реакторе может обеспечить эксплуатацию в более жестких условиях, т.е. при температуре, которая может обеспечить повышение селективности в отношении этилена и суммы олефинов при одновременном сохранении такой же пропускной способности и продолжительности эксплуатации; и/или эксплуатацию при повышенной нагрузке, которая может обеспечить увеличение пропускной способности при такой же продолжительности эксплуатации и жесткости условий. Кроме того, уменьшение скорости осаждения кокса может допустить увеличение продолжительности эксплуатации реактора и в результате этого увеличение производительности реактора, увеличение экономической и энергетической эффективности парового крекинга и получение повышенного выхода посредством снижения потери углерода в форме отложений кокса. Кроме того, улучшение теплопередачи в реакторе может допускать эксплуатацию при уменьшении температуры стенки реактора и в результате этого уменьшение науглероживания и увеличение срока службы материала реактора.

Как продемонстрировано в примерах, вторичный рисунок потока образуют впадины, что способствует удалению кокса. Этот рисунок потока характеризуется внедрением технологического газа во впадину под действием всасывающей силы вследствие образования зоны низкого давления внутри полости. Кроме того, внутри полости создается вращающийся поток, после чего горячий технологический газ снова выпускают по направлению к центральной зоне трубы. Эта выпускаемая текучая среда может выходить из впадины в тангенциальном направлении по отношению к основному потоку, одновременно усиливая радиальное и тангенциальное перемешивание технологического газа (фиг. 7). Таким способом может быть предотвращено существование зон с высокими значениями локальной продолжительностью выдерживания и температуры, поскольку осуществляют непрерывный выпуск текучей среды. Можно предполагать, что это улучшенное распределение продолжительности выдерживания приведет к повышению выхода продуктов, как продемонстрировано примером 4.

Описанный рисунок может также проявлять колебательное движение. Это подразумевает, что, хотя средний поток следует в аксиальном направлении, текучая среда вблизи стенки реактора имеет тангенциальный компонент, который сдвигает направление с постоянными интервалами самоподдерживающимся образом. Сдвиг направления потока может иметь большое значение для засорения в указанных реакторах. Когда направление сдвига на поверхности будет непрерывно изменяться, предполагается, что любой кокс, образующийся на стенках, будет легче удаляться вследствие впадин. Таким образом, предполагается, что предусматривающий впадины вариант будет проявлять эффект "самоочистки". Это было продемонстрировано в примере 5, из которого можно видеть, что параметры поверхности играют важную роль в получении этого предпочтительного рисунка потока.

Согласно некоторым вариантам осуществления реактор представляет собой термохимический реактор. Согласно некоторым вариантам осуществления реактор представляет собой реактор для термоллиза, предпочтительнее реактор для пиролиза. Согласно наиболее предпочтительным вариантам осуществления реактор представляет собой реактор парового крекинга.

Согласно некоторым вариантам осуществления каждая впадина охарактеризована глубиной e впадины и диаметром d впадины. Предпочтительно каждая впадина из множества вогнутых впадин охарактеризована глубиной e впадины и диаметром d впадины. Подмножество впадин из множества впадин, которые имеют одинаковую глубину e впадины, упомянуто в настоящем документе как впадины с "одинаковой глубиной впадины". Подмножество впадин из множества впадин, которые имеют одинаковый диаметр d впадины, упомянуто в настоящем документе как впадины с "одинаковым диаметром впадины".

Глубина e впадины измеряется как расстояние между цилиндрической поверхностью внутренней стенки и наиболее глубокой точкой внутри вышеупомянутой впадины на наибольшем удалении от цилиндрической поверхности; наиболее глубокая точка предпочтительно, но не обязательно совпадает с центром впадины, если любая вторичная структура расположена в пределах впадины. Согласно некоторым вариантам осуществления глубина e впадины составляет по меньшей мере 0,01 и не более чем 1,0 см, предпочтительно по меньшей мере 0,05 и не более чем 0,8 см, наиболее предпочтительно по меньшей мере 0,1 и не более чем 0,5 см.

Диаметр d впадины измеряется как максимальное расстояние между двумя антиподальными точками впадины, т.е. точками, находящимися на краю впадины на противоположных концах диаметра, представляющего собой прямолинейный отрезок, который проходит через центр впадины. Согласно некоторым вариантам осуществления диаметр d впадины составляет по меньшей мере 0,1 и не более чем 5,0 см, предпочтительно составляет по меньшей мере 0,2 и не более чем 3,0 см, наиболее предпочтительно составляет по меньшей мере 0,5 и не более чем 2,0 см.

Согласно некоторым вариантам осуществления, по меньшей мере, некоторые из множества впадин имеют одинаковую глубину впадины и одинаковый диаметр впадины; согласно некоторым вариантам осуществления каждая впадина из множества впадин имеет одинаковую глубину впадины и одинаковый диаметр впадины. Согласно некоторым вариантам осуществления, по меньшей мере, некоторые из множества впадин имеют одинаковую глубину впадины, но могут иметь различные диаметры впадины; согласно некоторым вариантам осуществления каждая впадина из множества впадин имеет одинаковую

глубину впадины, но, по меньшей мере, некоторые из множества вышеупомянутых впадин имеют различные диаметры впадины. Согласно некоторым вариантам осуществления, по меньшей мере, некоторые из множества впадин имеют одинаковый диаметр впадины, но могут иметь различную глубину впадины; согласно некоторым вариантам осуществления каждая впадина из множества впадин имеет одинаковый диаметр впадины, но, по меньшей мере, некоторые из множества вышеупомянутых впадин имеют различную глубину впадины. Согласно некоторым вариантам осуществления, по меньшей мере, некоторые из множества впадин имеют различную глубину впадины и различный диаметр впадины; согласно некоторым вариантам осуществления все впадины из множества впадин имеют различную глубину впадины и различный диаметр впадины.

Согласно некоторым вариантам осуществления два или более подмножества впадин, которые образуют множество впадин, имеют одинаковую глубину впадины и одинаковый диаметр впадины. Предпочтительно два или более подмножества впадин, которые образуют множество впадин и имеют одинаковую глубину впадины и одинаковый диаметр впадины, сконфигурированы таким образом, что они содержатся в различных областях внутренней стенки реактора, что обеспечивает преимущество за счет различных параметров впадин. Посредством изготовления подмножеств впадин, имеющих различные значения диаметра и/или глубины, пропорции впадин можно регулировать в определенных областях реактора; например, определенные горячие точки вокруг изгибов или дуг реактора, где существуют наиболее высокая скорость парового крекинга, осаждение кокса, более высокие значения скорости потока молекул и/или перепада давления, могут быть более полезными за счет большей глубины и/или ширины впадин, чем области вблизи выхода реактора, где скорость ниже. Например, неглубокие впадины, т.е. впадины с глубиной, составляющей 0,1 см, могут быть расположены в тех областях, где реактор образует изгибы, в то время как более глубокие впадины, т.е. впадины с глубиной, составляющей 0,3 см, могут быть расположены в тех областях, где реактор является прямолинейным. Например, неглубокие впадины могут быть расположены во впускных трубах реактора (снижая технологическую температуру и уменьшая перепад давления), в то время как более глубокие впадины могут быть расположены в горячих точках или в выпускных трубах. Такое регулирование параметров впадин может иметь преимущества в отношении продолжительности эксплуатации, селективности, теплопередачи, перепада давления, пропускной способности и срока службы реактора.

Согласно некоторым вариантам осуществления некоторые впадины из множества вогнутых впадин дополнительно охарактеризованы отношением (DDR) глубины к диаметру, определяемым следующим образом:

$$\text{DDR} = \text{глубина } e \text{ впадины} / \text{диаметр } d \text{ впадины (или } \text{DDR} = e/d).$$

Согласно следующему варианту осуществления каждая впадина, образующая множество впадин, характеризуется значением DDR.

DDR составляет предпочтительно по меньшей мере 0,01 и не более чем 0,5, предпочтительно по меньшей мере 0,05 и не более чем 0,3; предпочтительнее по меньшей мере 0,1 и не более чем 0,2; предпочтительнее по меньшей мере 0,15 и не более чем 0,25, например, приблизительно 0,20. Согласно некоторым вариантам осуществления DDR составляет по меньшей мере 0,01 и не более чем 0,5, предпочтительно по меньшей мере 0,05 и не более чем 0,4; предпочтительнее по меньшей мере 0,1 и не более чем 0,3. Каждое подмножество впадин из множества впадин, которые имеют одинаковую глубину впадины и одинаковый диаметр впадины, упомянуто в настоящем документе как "имеющие одинаковое отношение DDR впадины".

Величина DDR для впадины связана со степенью вогнутости внутренней поверхности и впадины. Степень вогнутости может оказывать влияние на взаимодействие впадины с молекулами, присутствующими во внутреннем сегменте реактора. Изменение степени вогнутости может иметь преимущества в отношении продолжительности эксплуатации, теплопередачи и пропускной способности реактора.

Согласно некоторым вариантам осуществления форма одной или нескольких впадин охарактеризована геометрическим признаком; согласно следующему варианту осуществления форма каждой впадины из множества впадин охарактеризована геометрическим признаком. Предпочтительно геометрические признаки дополнительно охарактеризованы нелинейным краем, таким как гладкий, закругленный или изогнутый край, предпочтительно как, по меньшей мере, в сечении сферической, сферической, овоидной или каплевидной формы или их комбинации. Согласно некоторым вариантам осуществления, по меньшей мере, некоторые из впадин, которые образуют множество впадин, охарактеризованы аналогичным геометрическим признаком. Согласно некоторым вариантам осуществления каждая впадина, образующая множество впадин, охарактеризована аналогичным геометрическим признаком.

Согласно некоторым вариантам осуществления каплевидная форма в проекции на аксиальное сечение может быть охарактеризована параметрическим уравнением

$$\begin{aligned} x(t) &= a \cos(t), \\ y(t) &= b \sin(t) \times \sin^m(t/2), \end{aligned}$$

где m составляет по меньшей мере 0,5 и не более чем 5.

Другие предпочтительные формы содержат грушевидную кривую

$$x(t)=a \times (1+\sin(t)), y(t)=b \times \cos(t) \times (1+\sin(t))$$

или гантелевидную кривую

$$x(t)=a \times t, y(t)=a \times t^2 \times (1-t^2)^{-1/2}.$$

Согласно некоторым предпочтительным вариантам осуществления два или более подмножеств впадин, которые образуют множество впадин, охарактеризованы аналогичным геометрическим признаком. Предпочтительно два или более подмножеств впадин, образующих множество впадин, которые охарактеризованы аналогичным геометрическим признаком, сконфигурированы таким образом, что они содержатся в различных областях внутренней стенки реактора, что может оказаться полезным вследствие различных геометрических форм впадин. Посредством реализации подмножеств впадин с различными геометрическими признаками можно регулировать геометрию впадин в определенных областях реактора, например в определенных горячих точках вокруг изгибов или дуг реактора, где существуют наиболее высокая скорость парового крекинга, осаждение кокса, более высокие значения скорости потока молекул и/или перепада давления, может потребоваться больше сферических впадин, чем в областях вблизи выхода реактора, где существует менее высокая скорость. Например, сферические впадины могут быть расположены в тех областях, где реактор образует изгибы, в то время как каплевидные или овальные впадины могут быть расположены в тех областях, где реактор является прямолинейным. Такое регулирование геометрических признаков может иметь преимущества в отношении продолжительности эксплуатации, теплопередачи, пропускной способности и срока службы реактора.

Согласно некоторым вариантам осуществления одна или несколько впадин, предпочтительно одна или несколько вогнутых впадин, содержат две или более областей вторичной кривизны, причем области вторичной кривизны имеют иной радиус кривизны, чем одна или несколько других вогнутых впадин, где области вторичной кривизны расположены вокруг или поверх одной или нескольких вогнутых впадин. Согласно примерному варианту осуществления дополнительные выступающие полуокружности могут окружать впадину, предпочтительно указанные полуокружности ориентированы параллельно краям впадины, причем их закругленный край является выпуклым по отношению к газовому потоку. Согласно другому примерному варианту осуществления дополнительная плоская или выпуклая область может быть расположена в пределах впадины, предпочтительно не выступая за пределы площади поверхности впадины.

Введение двух или более областей кривизны вокруг или внутри впадины может приводить к дополнительным преимуществам в отношении продолжительности эксплуатации, теплопередачи, пропускной способности реактора, помимо преимуществ, обнаруженных для реализации множества впадин без областей вторичной кривизны, при аналогичной потере давления.

Согласно некоторым вариантам осуществления, по меньшей мере, некоторые из множества впадин расположены в форме рисунка. Согласно некоторым вариантам осуществления все впадины из множества впадин расположены в форме рисунка.

Согласно некоторым вариантам осуществления по меньшей мере некоторые из множества впадин расположены в форме двух или более рисунков. Применение множества рисунков может быть ограничено определенными областями в пределах реактора, например различные рисунки могут быть использованы для входа, центральной области или выхода реактора; или, в качестве альтернативы, на противоположных сторонах в пределах реактора, например в течение изгиба или скручивания рисунка реактора может быть использован на длинном изгибе и другой рисунок может быть использован на противоположном коротком изгибе. Согласно некоторым вариантам осуществления можно объединять друг с другом два или более рисунков и в результате этого получать новые формы рисунков. Согласно некоторым вариантам осуществления для направления газового потока внутри трубы реактора могут быть также использованы рисунки, такие как линейные рисунки вдоль стенки реактора.

Примеры подходящих рисунков включают в себя линейные, шахматные, перекрестные и другие рисунки. Определенные рисунки могут производить в большей или меньшей степени воздействие на теплопередачу, перепад давления или скорость осаждения. Расположение впадин в форме рисунков вдоль внутренней стенки может приводить к дополнительным преимуществам в отношении продолжительности эксплуатации, селективности, теплопередачи и пропускной способности реактора.

Части внутренней стенки реактора, не покрытые какими-либо впадинами, далее в настоящем документе называются термином "гладкие". Согласно некоторым вариантам осуществления по меньшей мере часть внутренней стенки является гладкой. Для определенных областей в пределах реактора введение впадин может производить незначительные или нулевые благоприятные эффекты, такие области могут представлять низкую концентрацию предшественников отложений или скорость осаждения. Введение впадин в указанных областях могло бы только сделать реактор более дорогостоящим, и, таким образом, образование гладких областей может иметь преимущества в отношении производства и производственных расходов. Кроме того, определенные области реактора могут страдать от уменьшения структурной целостности вследствие уменьшения толщины внутренней стенки, и, таким образом, указанные области могут быть стратегически оставлены гладкими для уменьшения вероятности какого-либо повреждения реактора и увеличения срока службы вышеупомянутого реактора.

Согласно некоторым вариантам осуществления определенные области могут быть оставлены гладкими для улучшенной реализации определенных преимуществ впадин и рисунков впадин. Например, определенные направления потока могут быть изменены посредством использования впадин в рисунке для отклонения потока от определенной области стенки реактора и направления потока в сторону гладких областей. Согласно некоторым вариантам осуществления в определенных местах, такие как углы, изгибы или скручивания, могут потребоваться гладкие области в целях улучшения потока технологического газа.

Термин "площадь покрытия", используемый в настоящем документе, представляет собой процентную долю полной площади внутренней стенки, покрытой впадинами, определяемую следующим образом:

$$AC(\%) = \frac{\text{полная площадь внутренней стенки, покрытая впадинами}}{\text{полная площадь внутренней стенки}} \times 100$$

Согласно некоторым предпочтительным вариантам осуществления АС составляет по меньшей мере 1 и не более чем 99%, предпочтительнее по меньшей мере 20 и не более чем 90%. АС может не быть обязательным определяющим параметром конструкции, но может представлять собой результат расстояний между последовательными впадинами, связанный с диаметром впадин и рисунком и/или вышеупомянутыми формами впадин и гладких областей в зависимости от частей реактора, таких как вход, выход, изгибы, скручивания, углы и т.д.

Согласно некоторым вариантам осуществления реактор имеет трубчатую форму с определенной длиной, внутренним диаметром, наружным диаметром и толщиной стенки реактора. Согласно предпочтительному варианту осуществления для максимальной селективности по отношению к продукту трубчатый реактор имеет линейную форму. Однако согласно другим вариантам осуществления существуют также такие трубчатые реакторы с множеством проходов, которые соединены посредством изгибов, скручиваний и т.д. по соображениям термического коэффициента полезного действия и срока службы реактора.

Реактор может быть охарактеризован длиной реактора, причем длина составляет по меньшей мере 10 и не более чем 400 м, например не более чем 100 м. Реактор может быть дополнительно охарактеризован внутренним диаметром, соответствующим диаметру, проведенному через две антиподальные точки вдоль внутренней стенки реактора. Внутренний диаметр составляет предпочтительно по меньшей мере 2 и не более чем 49 см; предпочтительнее по меньшей мере 2,5 и не более чем 29 см; наиболее предпочтительно по меньшей мере 3 и не более чем 15 см. Реактор может быть дополнительно охарактеризован наружным диаметром, соответствующим диаметру, проведенному через две антиподальные точки вдоль наружной стенки реактора. Наружный диаметр составляет предпочтительно по меньшей мере 3 и не более чем 50 см; предпочтительнее по меньшей мере 4 и не более чем 30 см; наиболее предпочтительно по меньшей мере 5 и не более чем 17 см. Реактор может быть дополнительно охарактеризован толщиной стенки, соответствующей полуразности между наружным диаметром и внутренним диаметром, причем толщина стенки составляет предпочтительно по меньшей мере 0,3 и не более чем 2,0 см; предпочтительнее по меньшей мере 0,4 и не более чем 1,5 см; наиболее предпочтительно по меньшей мере 0,5 и не более чем 1 см. Длину, внутренний и наружный диаметр, а также посредством расширения толщину стенки можно регулировать по соображениям оптимизации процесса, продолжительности эксплуатации, селективности и термического коэффициента полезного действия.

Согласно некоторым вариантам осуществления толщина внутренней стенки составляет значительно более, чем глубина впадины; в противном случае целостность структуры и материала может пострадать в результате интенсивной тепловой энергии, присутствующей в течение процесса термического крекинга.

Увеличение толщины стенки реактора может приводить к снижению термического коэффициента полезного действия и, кроме того, может увеличивать стоимость и сложность производства, транспортировки и установки. Таким образом, для оптимальной конструкции потребуется оптимизация толщины стенки до максимальной или средней глубины впадины.

Авторы настоящего изобретения обнаружили, что поддержание постоянства минимальной толщины стенки по отношению к толщине стенки первоначальной конструкции, т.е. $t_e \approx t_0$, представляет наилучший компромисс между структурной целостностью и термическим коэффициентом полезного действия.

Согласно некоторым вариантам осуществления внутренняя стенка реактора может содержать металл, металлический сплав, керамический материал и/или их комбинацию.

Согласно предпочтительному варианту осуществления внутренняя стенка реактора может содержать сплавы Ni-Cr-Fe-Al или керамические материалы.

Согласно некоторым вариантам осуществления после изготовления внутренняя стенка может быть подвергнута дополнительной обработке в форме нанесения оксидных покровных слоев для уменьшения осаждения твердого материала на внутренней стенке и одновременного увеличения продолжительности эксплуатации и срока службы реактора. Защитные покровные слои могут способствовать пассивации каталитических центров и торможению процесса каталитического осаждения. Каталитические покровные слои могут также вносить свой вклад посредством газификации уже нанесенных слоев. В качестве альтернативы подходящие покровные материалы могут быть также приобретены у химических компа-

ний, таких как BASF Qtech или GE (General Electric).

Согласно некоторым вариантам осуществления внутренняя стенка реактора содержит такой же материал, как реактор, стенка реактора и/или наружная стенка реактора.

Согласно некоторым вариантам осуществления впадина и/или множество впадин могут содержать металл, металлический сплав, керамический материал и/или их комбинацию. Согласно некоторым предпочтительным вариантам осуществления множество впадин содержат такой же материал, как реактор; предпочтительнее сплавы Ni-Cr-Fe-Al или керамические материалы.

Согласно некоторым предпочтительным вариантам осуществления впадины расположены рядами, предпочтительно в гексагональном рисунке. Гексагональный рисунок может быть определен расстоянием t_1 между двумя впадинами в пределах одного ряда (представлено на фиг. 1) или расстоянием t_2 между расположенными в шахматном порядке рядами впадин (представлено на фиг. 1). Согласно конкретному варианту осуществления параметр t_1 представляет собой азимутальное расстояние между соседними впадинами и может быть вычислен по числу n впадин в поперечном сечении и диаметру D трубы как $\pi D/n$; t_2 представляет собой расстояние между последовательными рядами впадин в направлении потока, расположенными с углом сдвига γ по отношению друг к другу.

Согласно некоторым вариантам осуществления глубина e впадин (представлено на фиг. 2) составляет по меньшей мере 0,5 мм, предпочтительно по меньшей мере 1,0 мм, предпочтительно по меньшей мере 1,5 мм, предпочтительно по меньшей мере 2,0 мм, например по меньшей мере 2,5 мм. Согласно некоторым вариантам осуществления диаметр d впадин (представлено на фиг. 1, 2, и 3) составляет по меньшей мере 5,0 мм, предпочтительно по меньшей мере 7,5 мм, предпочтительно по меньшей мере 10,0 мм, предпочтительно по меньшей мере 12,5 мм, например, по меньшей мере 15,0 мм. Согласно некоторым вариантам осуществления расстояние t_1 составляет по меньшей мере 5,0 мм, предпочтительно по меньшей мере 10,0 мм, предпочтительно по меньшей мере 15,0 мм, предпочтительно по меньшей мере 20,0 мм, предпочтительно по меньшей мере 25,0 мм, например, по меньшей мере 30,0 мм, например, по меньшей мере 35,0 мм. Согласно некоторым вариантам осуществления число впадин в поперечном сечении составляет по меньшей мере 3, предпочтительно по меньшей мере 5, например, по меньшей мере 8. Согласно некоторым вариантам осуществления расстояние t_2 составляет по меньшей мере 5,0 и не более чем 30 мм, предпочтительно по меньшей мере 10,0 и не более чем 20 мм, например, приблизительно 15,0 мм. Такие варианты осуществления обеспечивают улучшенные характеристики теплопередачи.

Согласно некоторым вариантам осуществления глубина e впадин (представлено на фиг. 2) составляет не более чем 2,5 мм, предпочтительно не более чем 2,0 мм, предпочтительно не более чем 1,5 мм, предпочтительно не более чем 1,0 мм, например, не более чем 0,5 мм. Согласно некоторым вариантам осуществления диаметр d впадин (представлено на фиг. 1, 2 и 3) составляет не более чем 15,0 мм, предпочтительно не более чем 12,5 мм, предпочтительно не более чем 10,0 мм, предпочтительно не более чем 7,5 мм, например, не более чем 5,0 мм. Согласно некоторым вариантам осуществления число впадин в поперечном сечении составляет не более чем 64, предпочтительно не более чем 16, например, не более чем 8. Согласно некоторым вариантам осуществления расстояние t_1 составляет не более чем 35,0 мм, предпочтительно не более чем 30,0 мм, предпочтительно не более чем 25,0 мм, предпочтительно не более чем 20,0 мм, предпочтительно не более чем 15,0 мм, например, не более чем 10,0 мм, например, не более чем 5,0 мм. Согласно некоторым вариантам осуществления расстояние t_2 составляет не более чем 15,0 мм, предпочтительно не более чем 10,0 мм, например, не более чем 5,0 мм. Такие варианты осуществления сохраняют достаточный коэффициент трения.

Согласно некоторым вариантам осуществления глубина e впадин (представлено на фиг. 2) составляет по меньшей мере 1,0 мм, предпочтительно по меньшей мере 1,5 мм, предпочтительно по меньшей мере 2,0 мм, например, по меньшей мере 2,5 мм. Согласно некоторым вариантам осуществления диаметр d впадин (представлено на фиг. 1, 2, и 3) составляет по меньшей мере 5,0 мм, предпочтительно по меньшей мере 7,5 мм, предпочтительно по меньшей мере 10,0 мм, предпочтительно по меньшей мере 12,5 мм, например, по меньшей мере 15,0 мм. Согласно некоторым вариантам осуществления число впадин в поперечном сечении составляет по меньшей мере 3, предпочтительно по меньшей мере 5, например, по меньшей мере 8. Согласно некоторым вариантам осуществления расстояние t_2 составляет по меньшей мере 5,0 и не более чем 30 мм, предпочтительно по меньшей мере 10,0 и не более чем 20 мм, например, приблизительно 15,0 мм. Согласно некоторым вариантам осуществления расстояние t_1 составляет по меньшей мере 5,0 мм, предпочтительно по меньшей мере 10,0 мм, предпочтительно по меньшей мере 15,0 мм, предпочтительно по меньшей мере 20,0 мм, предпочтительно по меньшей мере 25,0 мм, например, по меньшей мере 30,0 мм, например, по меньшей мере 35,0 мм. Согласно некоторым вариантам осуществления впадины имеют отношение АС, составляющее по меньшей мере 10 и не более чем 90%. Согласно некоторым вариантам осуществления впадины имеют отношение АС, составляющее по меньшей мере 15 и не более чем 40%. Согласно некоторым вариантам осуществления впадины имеют отношение АС, составляющее по меньшей мере 50 и не более чем 90%. Такие варианты осуществления обеспечивают улучшенный коэффициент теплового расширения.

Согласно второму аспекту настоящее изобретение относится к печи, содержащей реактор согласно

первому аспекту и соответствующим предпочтительным вариантам осуществления. Согласно некоторым вариантам осуществления один или несколько реакторов, содержащих на своих соответствующих внутренних стенках множество впадин, которые раскрыты в настоящем изобретении, подвешены в общей печи.

Совместное размещение десятков или сотен вышеупомянутых реакторов в одной печи позволяет увеличивать производительность вплоть до нескольких десятков миллионов тонн в год (млн т/год), сохраняя при этом тепловые расходы, т.е. расходы на нагревание реакторов, на достаточно низком уровне для обеспечения надлежащего термического коэффициента полезного действия. Большие печи могут быть способными производить в сутки от 500 до 700 т имеющих высокую ценность химических веществ. Увеличение продолжительности эксплуатации может обеспечивать в год от 10 до 30 дополнительных рабочих дней посредством исключения от 5 до 10 циклов удаления кокса, что соответствует увеличению производства на 5-20 тысяч т/год.

Согласно третьему аспекту настоящего изобретения относится к способу изготовления реактора согласно первому аспекту настоящего изобретения и соответствующим предпочтительным вариантам осуществления. Согласно некоторым вариантам осуществления можно изготавливать множество впадин на внутренней стенке реактора следующими способами:

- формование;
- центробежное литье;
- выемка и/или
- осаждение.

Способ изготовления путем формования может иметь преимущества в отношении продолжительности изготовления, поскольку реактор может быть изготовлен вместе с впадинами. На первой стадии реактор может быть сначала изготовлен путем литья предпочтительного материала в форму реактора, содержащую обратные впадины, затем на следующей стадии реактор может быть свернут с образованием трубчатой формы, характерной для трубчатого реактора, используемого для термического крекинга.

Способ изготовления путем центробежного литья может иметь дополнительные преимущества в отношении продолжительности изготовления, поскольку он позволяет изготавливать внутренний реактор отдельно во вращающемся контейнере и прижимать его к наружной стенке контейнера под действием центробежных сил. Этот способ является особенно эффективным для получения реактора, имеющего низкий уровень примесей и, следовательно, улучшенную структурную целостность.

Способ изготовления путем выемки может иметь преимущества простоты изготовления, поскольку он позволяет сначала изготавливать стенку реактора, а затем осуществлять выемку впадин с использованием автоматического оборудования. Этот способ может быть более подходящим для создания вогнутых впадин.

Способ изготовления путем осаждения может обеспечивать изготовление стенки реактора отдельно от слоя, содержащего множество вогнутых впадин. Стенку реактора и отдельный слой можно затем объединять с образованием единой конструкции, возможно, посредством термического соединения. В результате этого отдельный слой может образовывать внутреннюю стенку реактора после соединения. Этот способ может иметь преимущества в отношении простоты и скорости изготовления, поскольку он позволяет изготавливать обе конструкции одновременно. Согласно предпочтительному варианту осуществления реактор и отдельный слой содержат одинаковый материал для предотвращения различных степеней теплового расширения, что могло бы угрожать структурной целостности трубы реактора в течение термического крекинга.

Выбор между описанными выше способами может быть связан с выбором материалов реактора (например, сплавов Ni-Cr-Fe-Al или керамических материалов). Например, способ центробежного литья является особенно подходящим для изготовления металлических реакторов, но не керамических реакторов. Однако для определенных способов может потребоваться комбинация из материалов в течение процесса изготовления. Например, литье в керамические формы представляет собой способ, который предусматривает ряд процессов литья металлов с использованием керамических материалов в качестве материалов литейных форм.

Выбор между описанными выше способами может быть также связан с желательными размерами и конструкционными свойствами реактора. Например, способы центробежного литья или формования могут быть подходящими для изготовления реакторов, у которых длина составляет по меньшей мере 10 и не более чем 400 м; однако способ выемки может быть менее подходящим для изготовления очень длинных (более 300 м) реакторов вследствие увеличения сроков изготовления.

Согласно четвертому аспекту настоящее изобретение относится к способу получения легких олефинов в реакторе согласно первому аспекту настоящего изобретения и соответствующим предпочтительным вариантам осуществления или в печи согласно второму аспекту настоящего изобретения и соответствующим предпочтительным вариантам осуществления. Предпочтительно способ предусматривает стадию крекинга углеводородного исходного материала с образованием легких олефинов при температуре, составляющей по меньшей мере 700 и не более чем 900°C. Посредством использования повышенных температур может быть достигнута селективность по отношению к легким олефинам. Осущест-

вление способа в присутствии пара при низких давлениях (приблизительно от 2 до 4 бар) дополнительно способствует уменьшению нежелательных побочных реакций и повышению селективности в отношении продукта. Этому могут способствовать в еще большей степени дополнительные добавки в форме соединений, содержащих фосфор, серу или кремний. Подробное описание условий парового крекинга можно найти в статье Zimmermann, H. и Walzl, R. "Ethylene" книги "Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry", Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: 2000 на страницах 469-482, которые во всей своей полноте включены в настоящий документ посредством ссылки.

Согласно некоторым вариантам осуществления способ предусматривает стадию удаления кокса. Подходящие стадии удаления кокса можно найти в параграфах [0008] и [0009] документа US 20130239999 A1. Указанные параграфы включены в настоящий документ посредством ссылки. Подходящие стадии удаления кокса можно также найти в параграфе [0006] документа WO 2016032730 A. Указанный параграф включен в настоящий документ посредством ссылки.

Согласно некоторым вариантам осуществления стадия удаления кокса предусматривает введение воздуха в реактор. Согласно некоторым вариантам осуществления стадия удаления кокса предусматривает введение пара в реактор.

Согласно некоторым вариантам осуществления стадия удаления кокса предусматривает введение воздуха и пара в реактор.

Согласно некоторым вариантам осуществления способ предназначен для получения пропилена.

Варианты осуществления настоящего изобретения могут допускать использование повышенных рабочих температур в целях увеличения пропускной способности реактора или селективности в отношении продукта. Согласно предположениям увеличение рабочего давления должно оставаться минимальным при тщательном выборе параметров конструкции с равным потенциалом для уменьшения давления на поздних стадиях эксплуатации вследствие уменьшения скорости осаждения.

Примеры

Пример 1. Свойства и размеры впадин.

Чтобы лучше проиллюстрировать пример, приведены фиг. 2 и 3, которые демонстрируют свойства и размеры конструкции с впадинами. В частности, на фиг. 6 представлено поперечное сечение впадины на изогнутой цилиндрической поверхности; на фиг. 3 представлена конструкция с впадинами с образованием трех концентрических изогнутых областей S1, S2 и S3 с соответствующей кривизной $1/r_1$, $-1/r_2$ и $-1/r_3$.

Радиус (r) окружности, образующей сферическую впадину (200), вычисляют согласно теории круглого сегмента:

$$r = (e^2 + d^2/4)/2e.$$

Пересечения в тангенциальном направлении можно вычислить посредством решения системы уравнений, состоящей соответственно из сферической поверхности и цилиндрической трубы:

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 + (z - z_c)^2 = r^2,$$

$$x^2 + y^2 = R^2, \forall z.$$

В плоскости поперечного сечения, не влияя на общность решения, можно сделать следующие подстановки:

$$x_c = R + e - r, y_c = 0, x = R \cdot \cos(\beta/2), y = R \cdot \sin(\beta/2),$$

откуда легко можно получить угол β и ширину (d) впадины:

$$\Rightarrow \beta/2 = 2\cos^{-1}\{1 - (e \cdot r - e^2/2)/(R^2 + e \cdot R - r \cdot R)\},$$

$$d' = 2R \cdot \sin(\beta/2).$$

Процентную долю покрытой впадинами поверхности можно аппроксимировать, допуская пересечение в форме эллипса, как произведение круглой дуги большой оси на цилиндрической поверхности βR и диаметра (d) малой оси впадины, умноженное на число впадин и деленное на площадь немодифицированной цилиндрической поверхности.

$$\text{Площадь покрытия (AC) [\%]} \cong \{(100 \cdot \text{число впадин} \cdot (d\beta R/4))\}/2LR$$

Пример 2. Примерные варианты осуществления впадин.

Конструкция с впадинами согласно примерному варианту осуществления настоящего изобретения представлена на фиг. 4, который иллюстрирует развертку (верхнее изображение) и радиальное сечение (нижнее изображение) внутренней поверхности внутренней стенки реактора с впадинами четырех форм, включая сферическую (a), каплевидную (b), сфероидную (c) и наклонную сфероидную (d) формы впадин.

Табл. 1 представляет обзор основных физических свойства исследованных конструкций с впадинами. Труба уровня техники в табл. 1 представляет собой имеющую спиральные ребра трубу, в которой ребро имеет полукруглую выпуклую форму с максимальной высотой 0,04 по отношению к диаметру трубы и в которой ребро дополнительно прикреплено к внутренней поверхности трубы под углом 65° по отношению к аксиальному направлению потока, аналогично технологии теплообменной трубы Kubota, известной из уровня техники и раскрытой в документе US 5950718, также называемом "документ 1", ко-

торая предназначена для периодического нарушения ламинарного потока за счет присутствия ориентированных внутрь спиральных ребер.

Таблица 1. Свойства исследованных конструкций с впадинами

Исследованные трубы									
Номер	Внутренний диаметр [мм]	Форма	e [мм]	d [мм]	# [-]	γ [°]	t ₁ [мм]	t ₂ [мм]	AC [%]
CP1	50	Сфера	0,2	4	32	30	4,9	4	80,3
CP2	50	Сфера	0,4	4	32	30	4,9	4	75,4
CP3	50	Сфера	0,75	7,5	16	11,25	9,8	7,5	75,1
CP4	50	Сфера	1,5	15	8	22,5	19,6	15	90,4
CP5	50	Сфера	2,25	15	8	22,5	19,6	15	80,0
CP6	50	Сфера	3,0	15	8	22,5	19,6	15	71,7
N1/P1	50	Сфера	1,5	15	8	0	19,6	15	90,2
N2	50	Сфера	1,5	15	6	0	26,2	15	82,5
N3/X1/W5	50	Сфера	1,5	15	4	0	39,3	15	56,9
P2	50	Сфера	1,5	15	8	0	19,6	16	85,3
P3	50	Сфера	1,5	15	8	0	19,6	20	67,6
P4	50	Сфера	1,5	15	8	0	19,6	30	45,1
P5	50	Сфера	1,5	15	8	0	19,6	60	22,5
X2	50	Сфера	1,5	15	4	30	39,3	15	56,9
X3	50	Сфера	1,5	15	4	45	39,3	15	56,9
X4	50	Сфера	2,5	15	6	0	26,2	30	29,6
X5	50	Сфера	2,5	15	6	45	26,2	30	29,6
W1	50	Сфера	1,5	5	4	0	39,3	5	10,3
W2	50	Сфера	1,5	8	4	0	39,3	8	17,6
W3	50	Сфера	1,5	10	4	0	39,3	10	23,4
W4	50	Сфера	1,5	12	4	0	39,3	12	31,8
R1	30,2	Сфера	0,9	6	8	45	11,9	4,1	65,8
R2	30,2	Сфера	1,9	7,5	8	0	11,9	12,5	39,4
R3	30,2	Сфера	3,9	8,5	4	0	23,7	12,5	31,9
Контроль	50	-	-	-	-	-	-	-	0,0
Документ 1	50	Спиральное выпуклое ребро	2	11,2	-	64,5	-	75	15,0
Документ 2	30,2	Продольное закругленное ребро	3,6	-	8	0	-	-	100
Документ 3	30,2	Перпендикулярное выпуклое ребро	1	3	-	90	-	24	12,5

Пример 3. Результаты исследованных конструкций с впадинами.

Разнообразные конструкции с впадинами, представленные в примере 2, см. табл. 1, исследовали при числе Рейнольдса (Re) 11000 для определения характеристик теплопередачи и трения, и результаты представлены ниже в табл. 2. Чтобы лучше проиллюстрировать результаты, на фиг. 5 приведен график, представляющий потерю давления и увеличение теплопередачи по сравнению с контрольной трубой (т.е. гладкой трубой без впадин) и трубами предшествующего уровня техники. Кроме того, на фиг. 6 проиллюстрирована зависимость Re для относительного увеличения теплопередачи и потери давления согласно двум вариантам осуществления настоящего изобретения по сравнению с предшествующим уровнем техники, как описано в примере 2.

Снижение чувствительности к Re может приводить к оптимальным эксплуатационным характеристикам в более широком диапазоне условий потока по сравнению с предшествующим уровнем техники, в частности в области повышенных значений чисел Рейнольдса.

Nu/Nu_0 представляет собой характеристику улучшения теплопередачи, $C_f/C_{f,0}$ представляет собой коэффициент увеличения трения, $(Nu/Nu_0)/(C_f/C_{f,0})^{1/3}$ представляет собой коэффициент теплового расширения модифицированной поверхности при равной мощности перекачивания.

Таблица 2. Результаты исследованных конструкций с впадинами

Исследованные трубы	Re = 11000		
Номер	Nu/Nu ₀	C _f /C _{f,0}	(Nu/Nu ₀)/(C _f /C _{f,0}) ^{1/3}
CP1	1,06	1,06	1,04
CP2	1,06	1,13	1,02
CP3	1,10	1,22	1,03
CP4	1,44	1,90	1,16
CP5	1,56	2,26	1,19
CP6	1,62	2,53	1,19й
N1/P1	1,35	1,57	1,16
N2	1,42	1,80	1,16
N3/X1/W5	1,48	1,97	1,18
P2	1,46	1,89	1,18
P3	1,37	1,66	1,16
P4	1,24	1,39	1,11
P5	1,12	1,18	1,06
X2	1,21	1,38	1,09
X3	1,20	1,35	1,08
X4	1,30	1,47	1,14
X5	1,22	1,38	1,10
W1	1,16	1,31	1,06
W2	1,21	1,31	1,11
W3	1,32	1,46	1,16
W4	1,32	1,48	1,16
Контроль	1,00	1,00	1,00
Документ 1	1,38	1,71	1,15

Пример 4. Влияние на выходы олефинов в реакторе парового крекинга.

Моделирование реакций методами вычислительной гидродинамики (CFD) осуществляли для набора различных конфигураций впадин вместе с существующими конфигурациями предшествующего уровня техники. Геометрические формы R1, R2, R3 сравнивали с традиционным гладким трубчатый реактором, а также содержащим продольные ребра реактором (его раскрывает патент GB 969796, также называемый "документ 2") и реактором с выпуклыми ребрами, расположенными перпендикулярно к направлению потока (аналогичную конструкцию раскрывает патент US 5950718, также называемый "документ 3"). Параметры указанных конструкций перечислены в табл. 1.

Моделирование осуществляли с использованием общедоступного пакета CFD OpenFOAM, применяя хорошо проверенную модель турбулентности k- ω SST (перенос с напряжением сдвига) и сеть свободнорадикальной реакции, которая подходит для крекинга пропана. Смоделированная промышленная геометрическая форма представляет собой прямоточный реактор миллисекундного типа, имеющий диаметр 30,2 мм и длину 10,56 м.

Табл. 3 представляет полученные результаты, иллюстрируя преимущества по сравнению с использованием предшествующего уровня техники. Очевидно, что положительное воздействие на температуру металлической трубы и скорости образования кокса может быть достигнуто при значительно меньшем ущербе от потери давления, чем для реберной конструкции. Хотя реберная конструкция обеспечивает хорошую теплопередачу, увеличение площади открытой поверхности делает скорость загрязнения почти такой же, как для контрольной геометрической формы. Кроме того, потеря выхода обусловлена большой высокотемпературной зоной между ребрами, где происходят нежелательные реакции.

Таблица 3. Результаты исследованных конструкций с впадинами

	Контроль	R1	R2	R3	Документ 2	Документ 3
ΔP [%]	-	+87	+59	+261	+29	+297
$\Delta T_{\text{стенка, макс.}}$ [K]	-	-45	-35	-35	-27	-53
$\Delta T_{\text{кокс, макс.}}$ [%]	-	-39	-30	-31	-6	-50
Превращение [%]	75	75	75	75	75	75
Выход $C_2H_4 + C_3H_6$ [%]	50,53	50,70	50,60	50,65	50,37	50,73

Пример 5. Эффект самоочистки конструкций с впадинами.

В течение моделирования методом крупных вихрей (LES) потока над единственной впадиной наблюдали возникновение рисунка потока, который вызывает выход текучей среды из впадины под углом 45° к среднему потоку, усиливая тангенциальное перемешивание в трубе (фиг. 7(a)). Гораздо важнее, что данное явление является неустойчивым, но самоподдерживающимся, вызывая автоматическое переключение направления потока с определенной частотой. Колебательное поведение возникает в течение времени, которое находится между временем протекания через реактор (миллисекунды) и временем образования кокса (часы). По этой причине предполагается, что мелкие частицы кокса могут непрерывно откалываться, достигая таким путем своеобразного эффекта самоочистки поверхности. Такое поведение будет желательным в процессе удаления кокса, поскольку усиление откалывания позволит быстрее возобновлять эксплуатацию и сократить время простоя. Усиленное откалывание в течение эксплуатации может быть также желательным при том условии, что находящееся ниже по потоку оборудование способно обрабатывать фрагменты отколовшегося кокса. В таком случае может значительно увеличиваться время между остановками реактора для удаления кокса, и производительность будет повышаться.

Моделирование осуществляли с использованием условий моделирования методом крупных вихрей, где одинаковые зависимые от времени условия впуска были применены в моделировании для трех впадин с различными отношениями глубины к диаметру (DDR). Поток над единственной впадиной с фиксированным диаметром рассматривали в канале с высотой $h/d=0,33$. Зависимые от времени скорости измеряли одновременно на левом и правом задних краях вогнутой впадины под углом 45° по отношению к среднему потоку, как проиллюстрировано на фиг. 7(a) вместе с графическим представлением потока, с усреднением по времени в течение менее продолжительного периода, чем период колебаний. Фиг. 7(b) представляет скорости для наиболее высокого отношения DDR, четко иллюстрируя направление сдвига текучей среды, выпускаемой из впадины. Табл. 4 представляет количественные результаты для четырех исследованных конструкций, полученные при равном числе Рейнольдса, составляющем 20000. При увеличении DDR можно наблюдать положительное воздействие как на частоту, так и на амплитуду колебательных потоков. Для конфигураций с впадинами наименьшей глубины поток все же выходит из впадины тангенциально, но всегда остается симметричным, и никакие крупномасштабные колебания не были отмечены.

Таблица 4. Эффект самоочистки конструкций с впадинами

	Частота [1/с]	Отношение амплитуды к средней скорости [-]
DDR = 0,26	1,9	0,34
DDR = 0,45	4,5	0,53

Кроме того, поток переключает направления налево и направо с определенной частотой. Такое переключение улучшает теплопередачу и удаляет загрязнения. Глубокие впадины имеют увеличенные колебания при повышении частоты.

Фиг. 7 иллюстрирует данное переключение для отношения DDR глубины к диаметру, составляющему 0,26, при частоте 2 Гц.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Реактор пиролиза, термического крекинга или парового крекинга для крекинга углеводородов, при этом реактор имеет внутреннюю стенку и характеризуется тем, что внутренняя стенка содержит множество вогнутых впадин, образованных на поверхности вышеупомянутой внутренней стенки, характеризуемый площадью покрытия (АС), определяемой следующим образом:

$AC(\%) = \text{полная площадь внутренней стенки, покрытая впадинами} / \text{полная площадь внутренней стенки} \times 100$;

где АС составляет по меньшей мере 20 и не более чем 90%;

причем каждая вогнутая впадина из множества вогнутых впадин охарактеризована диаметром d впадины, где d составляет по меньшей мере 0,1 и не более чем 5,0 см.

2. Реактор по п. 1, при этом реактор представляет собой реактор парового крекинга.

3. Реактор по п. 1 или 2, в котором каждая вогнутая впадина из множества вогнутых впадин охарактеризована глубиной e впадины, где e составляет по меньшей мере 0,01 и не более чем 1,0 см, предпочтительно по меньшей мере 0,1 и не более чем 0,5 см.

4. Реактор по любому из пп.1-3, в котором каждая вогнутая впадина из множества вогнутых впадин охарактеризована диаметром d впадины, где d составляет по меньшей мере 0,5 и не более чем 2,0 см.

5. Реактор по п.3 и 4, в котором каждая вогнутая впадина из множества вогнутых впадин дополнительно охарактеризована отношением (DDR) глубины к диаметру, определяемым следующим образом:

$$DDR=e/d;$$

где DDR составляет по меньшей мере 0,01 и не более чем 0,5; предпочтительно по меньшей мере 0,05 и не более чем 0,4; предпочтительнее по меньшей мере 0,1 и не более чем 0,3.

6. Реактор по любому из предшествующих пунктов, в котором форма каждой впадины из множества вогнутых впадин охарактеризована геометрическим признаком, предпочтительно гладким или изогнутым краем, например, по меньшей мере, сечением сферической, сфероидной, овоидной или каплевидной формы.

7. Реактор по п.6, в котором по меньшей мере одна впадина из множества впадин дополнительно содержит две или более областей вторичной кривизны, имеющих иной радиус кривизны, чем главная впадина, причем области вторичной кривизны расположены на краю или в пределах главной впадины.

8. Реактор по любому из предшествующих пунктов, в котором, по меньшей мере, некоторые из множества вогнутых впадин расположены в одном или нескольких рисунках, где рисунок предпочтительно является линейным, шахматным и/или перекрестным.

9. Реактор по любому из предшествующих пунктов, где AC составляет по меньшей мере 50 и не более чем 90%.

10. Реактор по любому из предшествующих пунктов, при этом реактор имеет трубчатую форму, и его характеризуют

полная длина реактора, составляющая от по меньшей мере 10 до не более чем 400 м;

внутренний диаметр, составляющий от по меньшей мере 2 до не более чем 20 см, предпочтительно по меньшей мере 3 и не более чем 15 см;

наружный диаметр, превышающий внутренний диаметр и составляющий по меньшей мере 3,0 и не более чем 22,0 см, предпочтительно по меньшей мере 5,0 и не более чем 17,0 см; и

толщина стенки, определяемая как полуразность между наружным диаметром и внутренним диаметром и составляющая по меньшей мере 0,3 и не более чем 2,0 см, предпочтительно по меньшей мере 0,5 и не более чем 1 см.

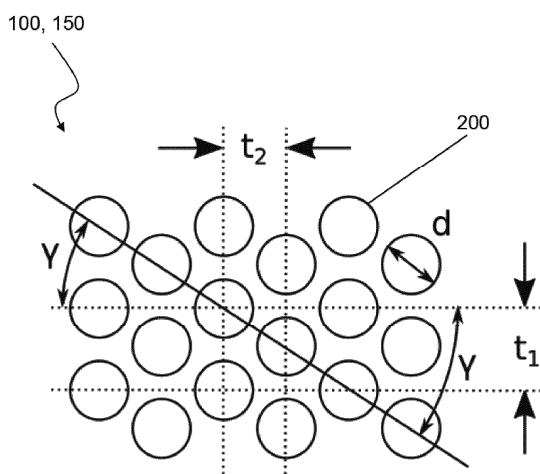
11. Реактор по п.10, в котором толщина стенки составляет более чем двойная глубина e впадины, причем толщина стенки предпочтительно составляет более чем $3 \times e$.

12. Реактор по любому из предшествующих пунктов, в котором внутренняя стенка содержит металл, металлический сплав, керамический материал и/или их комбинацию.

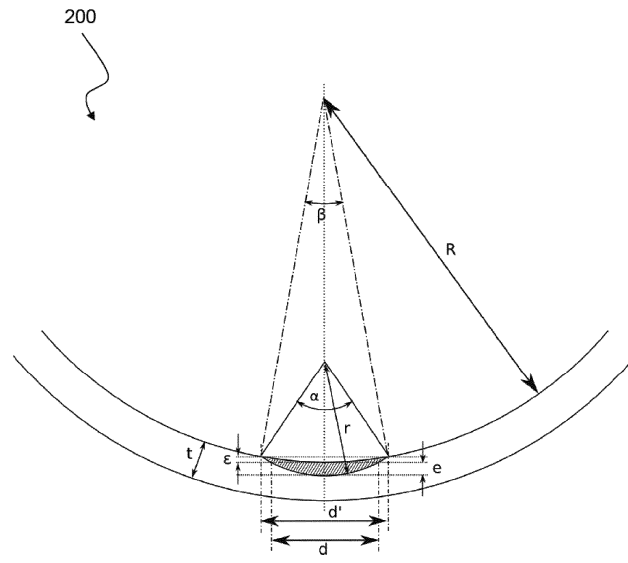
13. Реактор по п.12, в котором каждая впадина из множества вогнутых впадин содержит такой же материал, как реактор.

14. Печь, содержащая один или несколько реакторов по любому из предшествующих пунктов.

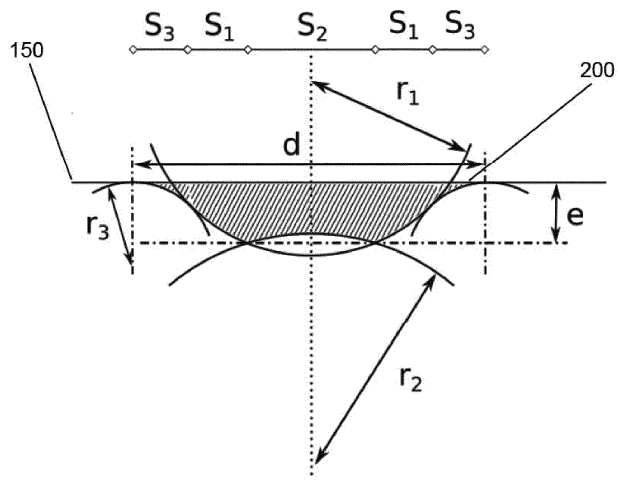
15. Способ получения легких олефинов в реакторе по любому из пп.1-13 или в печи по п.14, при этом способ предусматривает стадию крекинга углеводородного исходного материала с образованием легких олефинов при температуре, составляющей по меньшей мере 700 и не более чем 900°C.



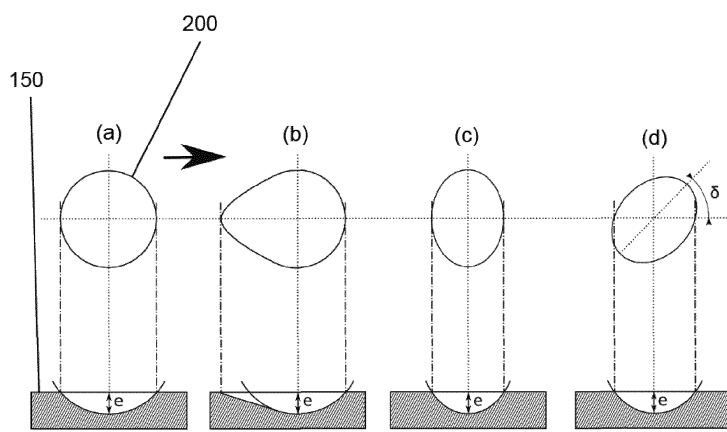
Фиг. 1



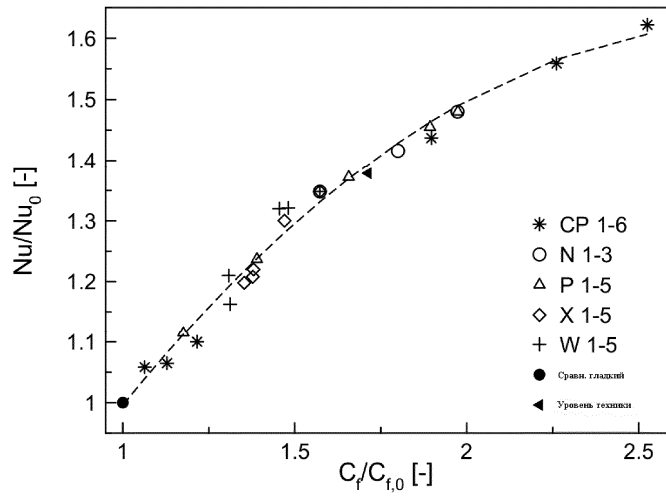
Фиг. 2



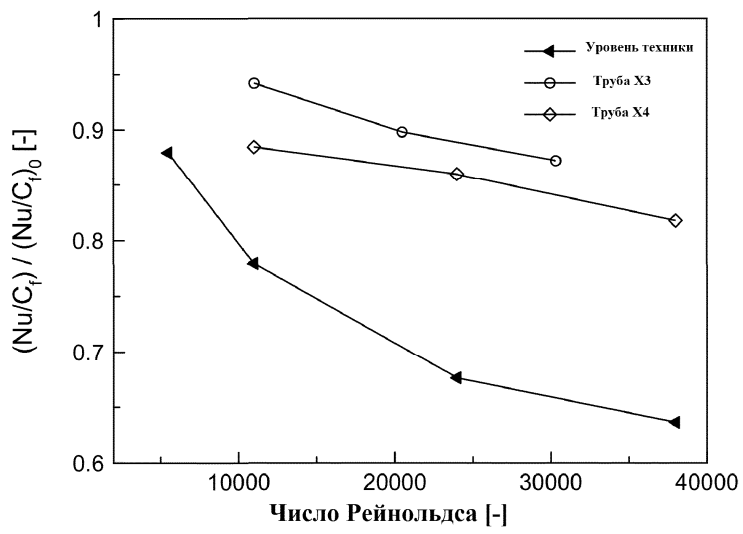
Фиг. 3



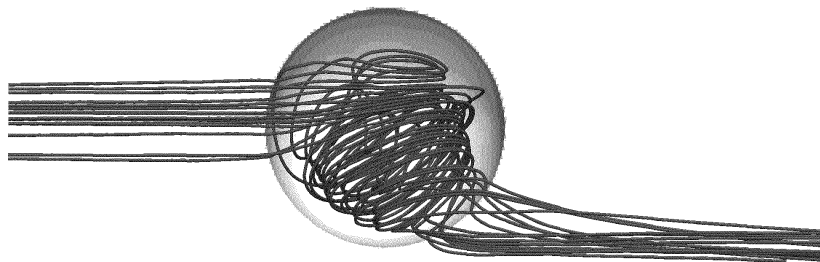
Фиг. 4



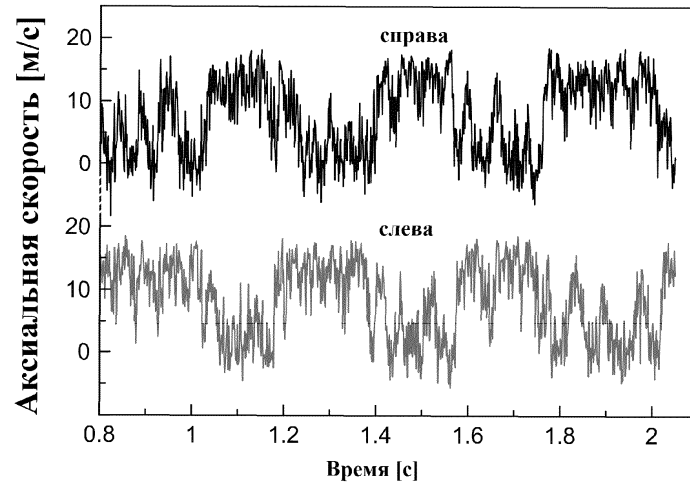
Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7(a)



Фиг. 7(b)

