

(19)



Евразийское
патентное
ведомство

(21) 202091531 (13) A1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки
2020.10.22

(51) Int. Cl. *B01J 8/04* (2006.01)
C01C 1/04 (2006.01)

(22) Дата подачи заявки
2018.12.19

(54) СПОСОБ И РЕАКТОР ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

(31) PA 2017 00733

(32) 2017.12.20

(33) DK

(86) PCT/EP2018/085895

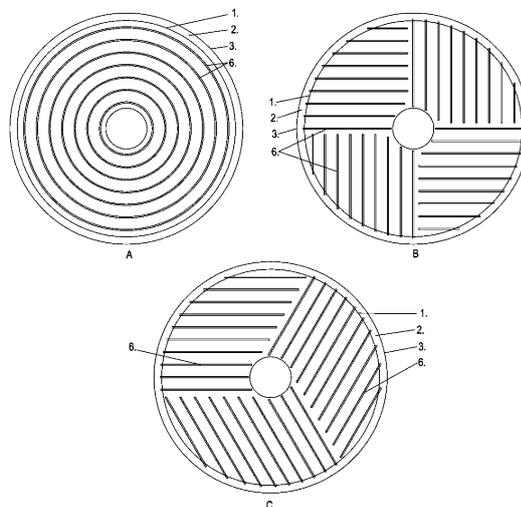
(87) WO 2019/121949 2019.06.27

(71) Заявитель:
ХАЛЬДОР ТОПСЁЭ А/С (DK)

(72) Изобретатель:
Шпет Кристиан Хенрик, Винд Томми
Ликке, Томзен Уффе Бах, Хансен
Андерс Хельбо (DK)

(74) Представитель:
Беляева Е.Н. (BY)

(57) Настоящее изобретение касается способа и реактора для осуществления экзотермических реакций, при которых функционирующие параллельно каталитические модули уложены в штабель внутри силовой оболочки и которые предназначены для осевого течения технологического газа через один или более слоев катализатора, при этом по меньшей мере один слой катализатора охлаждается с помощью внутрислойного теплообменника.



202091531
A1

202091531
A1

Способ и реактор для осуществления экзотермических реакций

ПРЕДПОСЫЛКИ К СОЗДАНИЮ ИЗОБРЕТЕНИЯ

В контексте увеличения роста мирового населения аммиак имеет существенное значение для пищевой отрасли благодаря тому, что он может применяться в качестве сырья при производстве удобрений. Исторически, конвертер системы TVA (англ.: Tennessi Valley Authority, русск.: Администрация долины реки Теннесси) в течение десятилетий был предпочтительным типом реактора для синтеза аммиака и получил распространение уже в 1930-х годах. Он характеризуется использованием осевого потока в одном слое катализатора с газовым охлаждением. Охлаждение катализатора осуществляют с помощью нескольких труб, расположенных в слое катализатора вертикально, обеспечивая благоприятные условия для конверсии при экзотермической реакции. Несмотря на большое количество документов, в которых описан этот тип конвертера, его конструкция имеет три важных ограничения: I) увеличение перепада давления в одиночном конвертере при повышении производительности установки и, как следствие, высокое энергопотребление; II) высокая стоимость монтажа параллельных конвертеров в отдельных силовых оболочках для устранения проблемы высокого перепада давления; и III) обычно требуется высокий объем рециркуляции (и высокое давление контура), чтобы компенсировать низкую степень конверсии водорода и азота за один цикл.

В соответствии с общей тенденцией к строительству крупных установок с одной линией после второй мировой войны была предложена идея использования адиабатического радиального потока в неподвижных слоях катализатора. В частности, начиная с 1960-х годов, конвертер с радиальным потоком становился все более распространенным на рынке за счет конвертера системы TVA. Общим признаком реакторов с радиальным потоком является то, что, как правило, они обеспечивают большую площадь поперечного сечения для потока и, тем самым, более низкую среднюю скорость газа по сравнению с площадью поперечного сечения и скоростью газа при осевом потоке через одну и ту же массу катализатора. Такая конструкция позволила значительно повысить производительность аммиака в одиночном конвертере и силовой оболочке, при этом перепад давления в

конвертере сохранялся в пределах 3 бар. Кроме того, для повышения степени конверсии и понижения необходимых объемов рециркуляции в контуре, в 1960-х годах с помощью конвертера фирмы Haldor Topsoe S-100 начали осуществлять резкое охлаждение газообразного продукта из первого адиабатического слоя с помощью свежего технологического газа. Затем осуществляли дальнейшую конверсию объединенного потока, прошедшего этап резкого охлаждения, во втором адиабатическом слое, соединенном последовательно с первым слоем. В обоих слоях катализатора использовали радиальный поток.

Дальнейшие усовершенствования конвертера с радиальным потоком появились в конвертере S-200 в 1980-х годах и конвертере S-300 около 2000 года. Вместо резкого охлаждения эти реакторы оборудованы одним или двумя внутрислойными теплообменниками, соответственно, для обеспечения охлаждения между двумя или тремя последовательно функционирующими слоями катализатора, причем каждый слой является адиабатическим, и в нем используются преимущества принципа радиального потока. Аналогичные конструкции включают в себя конвертер с осевым-радиальным потоком системы Casale, в котором также используют адиабатические последовательно функционирующие неподвижные слои катализатора с промежуточным теплообменом. Вышеупомянутый промежуточный теплообменник (теплообменники) служит для генерирования термодинамического потенциала для того, чтобы обеспечить более высокую конверсию в ходе экзотермической реакции после каждого слоя катализатора с одновременным предварительным нагревом поступающего в конвертер свежего технологического газа перед первым слоем катализатора.

При любом усовершенствовании, связанном с реакторами синтеза аммиака, необходимо сопоставлять производительность конвертера с адиабатическим конвертером с двумя или тремя слоями с радиальным потоком и внутренним теплообменом, поскольку этот тип конвертера все еще является предпочтительным для промышленных установок синтеза аммиака.

Несмотря на то, что на рынке все еще доминируют последовательные адиабатические конвертеры с радиальным потоком и внутренним теплообменом, могут быть сделаны дальнейшие шаги по усовершенствованию. Известно, что эффективность катализатора для любой экзотермической реакции может быть улучшена путем охлаждения катализатора до такой степени, при которой кривая

рабочей температуры соответствует кривой максимальной скорости реакции. Адиабатический реактор, в котором отсутствует охлаждение, имеет тот недостаток, что часть массы катализатора работает при температурах ниже оптимальной, в то время как другие части слоя катализатора работают при температурах выше оптимальной. Соответственно, системой Casale предлагается очевидное усовершенствование, при котором в конвертере потока охлаждение слоя катализатора обеспечивается за счет охлаждающих пластин, в которых происходит нагрев охлаждающей жидкости какого-либо типа. Такой тип конвертера может, в принципе, обеспечивать более высокую конверсию на объем катализатора из-за улучшенных условий реакции катализатора по сравнению с условиями, полученными в адиабатическом слое. Эта концепция описана в ряде патентов, например, в US 6,946,494 и US 9,028,766. Во всех этих патентах описаны охлаждающие пластины, которые расположены радиально внутри цилиндрического корпуса конвертера, и использование радиального потока в слое катализатора для обеспечения низкого перепада давления в слое катализатора.

Несмотря на то, что указанный выше уровень техники, в котором используется радиальный поток и радиальное расположение охлаждающих пластин, обеспечивает улучшение каталитической эффективности экзотермической реакции, это решение имеет четыре основных недостатка; I) конфигурация с радиальным расположением охлаждающих пластин подразумевает различное расстояние между охлаждающими пластинами и, следовательно, варьирующуюся толщину слоя катализатора между двумя соседними охлаждающими пластинами, что приводит к нежелательному профилю охлаждения в слое катализатора.

В частности, вблизи внешнего радиуса слоя катализатора обеспечивается слишком слабое охлаждение химической экзотермической реакции, поскольку расстояние между охлаждающими пластинами здесь больше оптимального, в то время как вблизи внутреннего радиуса слоя катализатора обеспечивается слишком сильное охлаждение химической экзотермической реакции из-за минимального расстояния между охлаждающими пластинами. Соответствующий профиль потока обеспечивает неоптимальную кривую рабочих температур и ограниченную удельную производительность катализатора. Кроме того, II) сохранение принципа радиального потока подразумевает необходимость высоких вертикальных слоев

катализатора, что приводит к воздействию высоких каталитических сил на механические части конвертера и опасности возникновения неисправностей, III) большой объем катализатора, используемый в каждом слое конвертера с радиальным потоком, требует загрузки катализатора внутри конвертера после установки оборудования, что приводит к увеличению времени установки; и IV) выгрузка катализатора, размещенного между охлаждающими пластинами, является особенно проблематичной в нижней части охлаждаемого конвертера с радиальным потоком из-за использования длинных охлаждающих пластин.

КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ СУЩНОСТИ ИЗОБРЕТЕНИЯ

Настоящее изобретение относится к высокоэффективному способу осуществления экзотермических каталитических реакций, например, помимо прочего, реакций синтеза аммиака или метанола. В настоящем изобретении описан новый способ улучшения условий реакции используемого катализатора. Кроме того, изобретением предусматривается конфигурация, когда модули уложены в штабель, для быстрой установки, простоты загрузки и выгрузки катализатора, изобретение обеспечивает высокие степени конверсии в химических установках большой производительности при низких инвестиционных затратах и высокой энергоэффективности с устранением недостатков предшествующего уровня техники. В соответствии с настоящим изобретением вышеупомянутые технические проблемы предшествующего уровня техники решаются следующим способом:

Способ для осуществления экзотермических каталитических реакций, включающий этапы подачи свежего технологического газа в, по меньшей мере, два параллельных цилиндрических каталитических модуля, каждый из которых содержит охлаждаемую каталитическую зону, содержащую слой катализатора и внутрислойный теплообменник.

Осуществляют экзотермическую конверсию свежего технологического газа с получением газообразного продукта, когда поток технологического газа подают в осевом направлении через слой катализатора в каждой из каталитических зон.

В каждом из параллельно функционирующих цилиндрических каталитических модулей осуществляют охлаждение экзотермической реакции путем подачи свежего технологического газа из внешнего кольцевого пространства, образованного вокруг каждого из цилиндрических каталитических

модулей, во внутрислойный теплообменник и подачи свежего технологического газа через внутрислойный теплообменник при непрямом теплообмене с реагирующим технологическим газом, который поступает в осевом направлении через охлаждаемую каталитическую зону. Охлаждаемая каталитическая зона каждого модуля, при необходимости, может быть соединена последовательно с одной или более адиабатическими каталитическими зонами выше и/или ниже охлаждаемой каталитической зоны.

Внутрислойный теплообменник каждого модуля состоит из множества теплообменных блоков, выровненных по вертикали, которые образуют проточные секции для свежего технологического газа во внутреннем теплообменнике. Каждый теплообменный блок содержит горизонтально расположенное устройство подачи, предназначенное для транспортировки свежего технологического газа от внешнего кольцевого пространства, образованного вокруг каждого из цилиндрических модулей, в теплообменный блок, где осуществляют нагревание свежего технологического газа при прохождении через теплообменный блок вследствие поглощения тепла экзотермической реакции в охлаждаемой каталитической зоне. Предварительно нагретый свежий технологический газ покидает теплообменный блок с противоположного конца указанного устройства подачи, после чего он транспортируется в верхнюю каталитическую зону, которая является адиабатической или охлаждаемой. Поток в каждом теплообменном блоке внутрислойного теплообменника предпочтительно проходит в осевом направлении, противоположном или параллельном направлению потока в каталитических зонах.

В одном из вариантов осуществления изобретения указанные теплообменные блоки каждого внутрислойного теплообменника состоят из удлиненных пластинчатых конструкций, которые именуется охлаждающими пластинами, например, из охлаждающих пластин подушкообразной формы. Охлаждающую пластину, как правило, изготавливают из двух тонких стальных листов, расположенных на расстоянии друг от друга, при этом пространство между двумя стальными листами внутри охлаждающей пластины образует канал, по которому проходит свежий технологический газ. Катализатор расположен между охлаждающими пластинами. Газообразный продукт из каждого цилиндрического каталитического модуля предпочтительно подают из самой нижней

каталитической зоны в центральное пространство, образованное по центру внутри двух или более каталитических модулей, когда модули уложены в штабель внутри силовой оболочки.

В соответствии с изобретением также описывается возможность применения параллельного расположения охлаждающих пластин, при котором расстояние между двумя соседними охлаждающими пластинами одинаково в пределах $\pm 10\%$, и при этом каждая охлаждающая пластина предпочтительно является по существу плоской и имеет подушкообразную форму.

В соответствии с еще одним вариантом осуществления изобретения используют дополнительное устройство для подачи предварительно нагретого технологического газа, поступающего, например, из внутреннего или внешнего пускового нагревателя, к катализатору, загруженному в цилиндрические каталитические модули. Такое устройство, именуемое газовой системой с прямым впуском, может эффективно обеспечивать восстановление активности катализатора в ходе запуска конвертера. Указанная газовая система с прямым впуском выполнена с возможностью обхода внешнего кольцевого пространства, расположенного между внешней силовой оболочкой и цилиндрическими каталитическими модулями. Это позволяет подавать предварительно нагретый технологический газ во время восстановления активности катализатора, в противном случае расчетная температура или давление были бы превышены. Без системы прямого впуска газа возможный уровень температуры катализатора во многих случаях будет ограничен из-за вышеупомянутой расчетной температуры, что приведет к длительному и неэффективному периоду восстановления.

В соответствии с еще одним вариантом осуществления изобретения газовую систему с прямым впуском также используют для подачи свежего, предварительно не нагретого технологического газа в катализатор, содержащийся в цилиндрических каталитических модулях при нормальном эксплуатационном режиме конвертера, то есть после первоначального восстановления активности катализатора. Поток технологического газа через систему прямого впуска газа может контролироваться с помощью одного или более клапанов, расположенных снаружи конвертера. Эта система позволяет контролировать уровень температуры катализатора в нормальном эксплуатационном режиме. Например, в течение начального периода срока службы катализатора, когда активность катализатора

максимальна, или в течение периодов пониженной нагрузки (с уменьшенным потоком подачи) в конвертере, доля исходного газа, подаваемого через систему прямого впуска газа, может быть увеличена для охлаждения катализатора, который нагревается теплотой экзотермической реакции. Аналогичным образом, если катализатор дезактивируется и/или повышается нагрузка конвертера, доля подаваемого газа, направляемого через систему прямого впуска газа, может быть уменьшена, чтобы обеспечить улучшенный предварительный нагрев оставшейся части подаваемого газа, который проходит через внутрислойный теплообменник каждого каталитического модуля. Использование упомянутой системы прямого впуска газа для обоих сценариев, нагревание в течение периода восстановления активности катализатора и регулирование температуры во время нормального режима эксплуатации, обеспечивает оптимальное использование доступного объема преобразователя вместо проектирования внутренних частей преобразователя с двумя отдельными устройствами/системами для подачи предварительно нагретого и свежего не нагретого технологического газа соответственно.

В отличие от предшествующего уровня техники, неожиданно было обнаружено, что изобретение, в котором используют осевой поток в каталитической зоне (зонах) параллельно функционирующих модулей, позволяет предпочтительно размещать охлаждающие пластины параллельно внутри охлаждаемой каталитической зоны. Это важное решение обеспечивает одинаковую толщину слоя катализатора, расположенного между двумя соседними охлаждающими пластинами из-за предпочтительной конфигурации параллельных охлаждающих пластин. Это обеспечивает равномерное охлаждение катализатора в охлаждаемой каталитической зоне и, следовательно, улучшенные условия реакции и каталитическую эффективность по сравнению с условиями реакции в соответствии с известным уровнем техники.

Еще одно усовершенствование, предоставляемое настоящим изобретением, относится к тому, что описанная комбинация I) параллельно функционирующих каталитических модулей, II) осевого потока через зоны катализатора и III) предварительного нагрева исходного газа с помощью внутреннего теплообмена в охлаждаемой каталитической зоне, обеспечивает возможность загрузки значительно большего количества катализатора в силовую оболочку данной

химической установки. Таким образом, новое изобретение обеспечивает более эффективное использование доступного объема силовой оболочки. Сочетание улучшенной каталитической эффективности, обеспечиваемой при постоянной толщине слоя катализатора из-за параллельных охлаждающих пластин, и большего объема загрузки катализатора позволяет достигнуть дополнительного синергетического эффекта в отношении максимальной производительности, возможной в силовой оболочке фиксированного размера. Это имеет первостепенное значение при реконструкции, когда важнее всего увеличить производительность при замене конвертера и одновременно при сохранении существующей силовой оболочки.

Другое преимущество изобретения состоит в том, что, несмотря на осевой поток через все зоны катализатора, общий перепад давления в конвертере может поддерживаться на уровне 1 кг/см² или менее. Это возможно из-за того, что при такой выбранной параллельной конфигурации потока в модулях скорость газа в каталитических зонах снижается.

Кроме того, описанный способ, при котором свежий технологический газ подают из наружного кольцевого пространства, расположенного между внешней силовой оболочкой и цилиндрическими каталитическими модулями, во внутрислойный теплообменник, является эффективным и целесообразным решением для охлаждения силовой оболочки, расчетная температура для которой зачастую является низкой, и поэтому силовая оболочка должна быть защищена от тепла экзотермической реакции, происходящей в каталитических зонах параллельно функционирующих каталитических модулей.

Другим важным признаком изобретения является то, что размер модулей, функционирующих параллельно, может с легкостью быть изменен просто путем изменения количества модулей для данной химической установки в соответствии с необходимой производительностью. Изобретение позволяет осуществлять загрузку катализатора вне силовой оболочки и устанавливать модули меньшей массы с предварительно загруженным катализатором непосредственно в силовую оболочку. Это объясняет необычайную ценность предлагаемых преимуществ, касающихся сокращения времени простоя в результате сокращения времени, необходимого для загрузки катализатора, и времени установки оборудования, что

обеспечивается расположением каталитических модулей, которые находятся один над другим.

Наконец, изобретение обеспечивает меньшую вертикальную высоту слоя катализатора за счет увеличения количества каталитических модулей, что значительно уменьшает воздействие каталитических сил на механические элементы и уменьшает опасность возникновения неисправностей.

Еще одним важным преимуществом меньшей высоты слоя катализатора является упрощение выгрузки катализатора.

В общих словах, настоящее изобретение имеет следующие аспекты и признаки:

1. Способ осуществления экзотермических реакций, включающий этапы подачи свежего технологического газа параллельно, по меньшей мере, двум цилиндрическим каталитическим модулям, уложенным в штабель, каждый из которых содержит одну или более расположенных последовательно каталитических зон, причем, по меньшей мере, одну из каталитических зон охлаждают с помощью внутрислойного теплообменника;

экзотермической реакции свежего технологического газа, протекающего в осевом направлении через все каталитические зоны, с получением газообразного продукта;

охлаждения в каждом из цилиндрических каталитических модулей технологического газа, участвующего в экзотермической реакции, с помощью свежего технологического газа, тем самым осуществляя предварительный нагрев свежего технологического газа путем подачи свежего технологического газа из внешнего кольцевого пространства, образованного вокруг каждого из цилиндрических каталитических модулей, во внутрислойный теплообменник и подачи свежего технологического газа через внутрислойный теплообменник при непрямом теплообмене с предварительно нагретым технологическим газом, участвующим в экзотермической реакции, который поступает в осевом направлении через охлаждаемую каталитическую зону; и

сбора газообразного продукта, отведенного из, по меньшей мере, двух каталитических модулей в центральном пространстве, образованном по центру внутри, по меньшей мере, двух уложенных в штабель каталитических модулей.

2. Способ по признаку 1, отличающийся тем, что, по меньшей мере, одна из соединенных последовательно каталитических зон представляет собой адиабатическую каталитическую зону.

3. Способ по признаку 1, отличающийся тем, что технологический газ из одиночной охлаждаемой каталитической зоны последовательно подают через одиночную адиабатическую каталитическую зону.

4. Способ по любому из признаков 1 - 3, отличающийся тем, что внутрислойный теплообменник содержит множество охлаждающих пластин, образующих проточные секции для свежего технологического газа во внутрислойном теплообменнике.

5. Способ по признаку 4, отличающийся тем, что толщина охлаждаемого слоя катализатора между двумя соседними охлаждающими пластинами варьируется в пределах $\pm 10\%$.

6. Способ по признаку 5, отличающийся тем, что толщина охлаждаемого слоя катализатора между двумя соседними охлаждающими пластинами составляет 10 - 300 мм.

7. Способ по признаку 6, отличающийся тем, что толщина охлаждаемого слоя катализатора между двумя соседними охлаждающими пластинами составляет 20 - 150 мм.

8. Способ по любому из признаков 5 - 7, отличающийся тем, что каждая из охлаждающих пластин является практически плоской.

9. Способ по любому из признаков 5 - 8, отличающийся тем, что охлаждающие пластины расположены в трех секциях с температурой 120° в цилиндрических каталитических модулях, и при этом все охлаждающие пластины в каждой секции с температурой 120° являются практически плоскими и параллельными.

10. Способ по признаку 9, отличающийся тем, что практически плоские охлаждающие пластины в любой из трех секций с температурой 120° не являются параллельными практически плоским охлаждающим пластинам в другой секции.

11. Способ по любому из признаков 1 - 10, отличающийся тем, что свежий технологический газ подают через внутрислойный теплообменник в

противоположном направлении или параллельно направлению потока технологического газа, подаваемого через каталитические зоны в каждом из цилиндрических каталитических модулей.

12. Способ по любому из признаков 1 - 11, отличающийся тем, что свежий технологический газ подают через внутрислойный теплообменник противоположно направлению потока технологического газа, подаваемого через каталитические зоны в каждом из цилиндрических каталитических модулей.

13. Способ по любому из признаков 1 - 12, отличающийся тем, что цилиндрические каталитические модули имеют одинаковый размер.

14. Реактор для осуществления экзотермических реакций, содержащий внутри цилиндрической силовой оболочки,

по меньшей мере, два функционирующих параллельно цилиндрических каталитических модуля, уложенных в штабель, каждый из которых содержит одну или более расположенных последовательно каталитических зон со слоем катализатора, предназначенных для осевого течения, причем слой катализатора в, по меньшей мере, одной из каталитических зон охлаждается с помощью внутрислойного теплообменника;

внешнее кольцевое пространство между цилиндрическими каталитическими модулями и цилиндрической силовой оболочкой, находящееся в жидкостном соединении с, по меньшей мере, двумя параллельными цилиндрическими каталитическими модулями;

устройство подачи для подачи свежего технологического газа во входное отверстие внутрислойного теплообменника в, по меньшей мере, одной охлаждаемой зоне катализатора, находящееся в жидкостном соединении с внешним кольцевым пространством;

выходное отверстие внутрислойного теплообменника, образованное открытыми концами внутрислойного теплообменника в, по меньшей мере, одной охлаждаемой зоне катализатора;

крышки, закрывающие, по меньшей мере, два параллельных цилиндрических каталитических модуля; и

выпускное устройство из, по меньшей мере, двух параллельных цилиндрических каталитических модулей.

15. Реактор по признаку 14, отличающийся тем, что выпускное устройство из, по меньшей мере, двух параллельных цилиндрических каталитических модулей расположено в центральном пространстве, образованном по центру внутри, по меньшей мере, двух уложенных в штабель каталитических модулей.

16. Реактор по признаку 14 или 15, отличающийся тем, что, по меньшей мере, одна из расположенных последовательно каталитических зон представляет собой адиабатическую каталитическую зону.

17. Реактор по любому из признаков 14 - 16, имеющий одиночную охлаждаемую каталитическую зону, последовательно соединенную с одиночной адиабатической каталитической зоной.

18. Реактор по любому из признаков 14 - 17, отличающийся тем, что внутрислойный теплообменник представляет собой пластинчатый теплообменник с множеством охлаждающих пластин, образующих проточные секции для свежего технологического газа во внутрислойном теплообменнике.

19. Реактор по признаку 17, отличающийся тем, что толщина охлаждаемого слоя катализатора между двумя соседними охлаждающими пластинами варьируется в пределах $\pm 10\%$.

20. Реактор по признаку 19, отличающийся тем, что толщина охлаждаемого слоя катализатора между двумя соседними охлаждающими пластинами составляет 10 - 300 мм.

21. Реактор по признаку 19, отличающийся тем, что толщина охлаждаемого слоя катализатора между двумя соседними охлаждающими пластинами составляет 20 - 150 мм.

22. Реактор по любому из признаков 18 - 21, отличающийся тем, что каждая из охлаждающих пластин является практически плоской.

23. Реактор по любому из признаков 18 - 22, отличающийся тем, что охлаждающие пластины расположены в трех секциях с температурой 120° в цилиндрических каталитических модулях, и при этом все охлаждающие пластины в каждой секции с температурой 120° являются практически плоскими и параллельными.

24. Реактор по признакам 18 - 22, отличающийся тем, что охлаждающие пластины расположены в трех секциях с температурой 120° в цилиндрических каталитических модулях, и при этом практически плоские охлаждающие пластины в любой из трех секций с температурой 120° не являются параллельными практически плоским охлаждающим пластинам в другой секции.

25. Реактор по любому из признаков 14 - 24, отличающийся тем, что цилиндрические каталитические модули имеют одинаковый размер.

26. Реактор по любому из признаков 17 - 25, отличающийся тем, что охлаждающие пластины имеют подушкообразную форму.

27. Реактор по любому из признаков 14 - 26, отличающийся тем, что входное отверстие внутрислойного теплообменника снабжено устройством подачи газа, находящимся в жидкостном соединении с внешним кольцевым пространством.

28. Реактор по любому из признаков 14 - 27, отличающийся тем, что выпускное устройство из самой нижней каталитической зоны в каждом из, по меньшей мере, двух функционирующих параллельно цилиндрических каталитических модулей находится в жидкостном соединении с центральным пространством, образованным по центру внутри, по меньшей мере, двух уложенных в штабель каталитических модулей.

29. Реактор по любому из признаков 14 - 28, отличающийся тем, что реактор содержит дополнительное входное устройство подачи для подачи дополнительного потока предварительно нагретого технологического газа.

30. Реактор по признаку 29, отличающийся тем, что устройство для подачи дополнительного потока предварительно нагретого технологического газа выполнено с возможностью подачи газа в обвод внешнего кольцевого пространства и внутрислойного теплообменника.

31. Реактор по любому из признаков 14 - 30, отличающийся тем, что реактор содержит устройство для подачи дополнительного потока свежего технологического газа.

32. Реактор по признаку 30, отличающийся тем, что устройство для подачи дополнительного потока свежего технологического газа выполнено с

возможностью подачи газа в обвод внешнего кольцевого пространства и внутрислойного теплообменника.

Признаки и преимущества изобретения более понятны из описания чертежей и частных вариантов осуществления, приведенного ниже.

ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ

На Фиг. 1 приведен вид в разрезе каталитического конвертера с тремя расположенными друг над другом цилиндрическими каталитическими модулями, функционирующими параллельно в общей силовой оболочке.

На Фиг. 2А – С приведены три примера теплообменных блоков, из которых может быть составлен внутрислойный теплообменник.

На Фиг. 2D и E показаны примеры типов охлаждающих пластин, из которых может быть составлен теплообменный блок.

На Фиг. 3А приведен пример вида в разрезе цилиндрического каталитического модуля, содержащего охлаждаемую каталитическую зону и внутрислойный теплообменник. Изображенный на этой фигуре внутрислойный теплообменник состоит из выровненных по вертикали параллельных охлаждающих пластин, расположенных внутри охлаждаемой каталитической зоны.

На Фиг. 3В приведен вид в разрезе цилиндрического каталитического модуля в соответствии с разрезом А-А на Фиг. 3А. Аналогично, на Фиг. 3С приведен вид в разрезе двух цилиндрических каталитических модулей в соответствии с разрезом В-В на Фиг. 3А.

На Фиг. 4 показан вид в разрезе еще одного примера цилиндрического каталитического модуля, в котором расположены две адиабатические каталитические зоны, которые последовательно соединены с одиночной охлаждаемой каталитической зоной.

На Фиг. 5А – С показаны примеры возможных конфигураций охлаждающих пластин цилиндрических каталитических модулей, при которых внутрислойный теплообменник каждого модуля состоит из множества охлаждающих пластин.

ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

В соответствии с настоящим изобретением описывается способ осуществления экзотермических реакций, при котором технологический газ подают параллельно в, по меньшей мере, два цилиндрических каталитических модуля, которые уложены в штабель. На Фиг. 1 приведен пример конфигурации сечения каталитического конвертера с тремя расположенными друг над другом цилиндрическими каталитическими модулями 1, функционирующими параллельно в общей силовой оболочке 3. На этой фигуре, свежий технологический газ 9 поступает в нижнюю часть силовой оболочки, затем идет вверх в осевом направлении и поступает во внешнее кольцевое пространство 2, расположенное между внешней силовой оболочкой 3 и цилиндрическими каталитическими модулями 1. Свежий технологический газ поступает в каждый из цилиндрических каталитических модулей, проходя в каждом модуле внутрислойный теплообменник (не показан), где осуществляют предварительное нагревание свежего технологического газа, а затем газ поступает в осевом направлении вниз через охлаждаемую каталитическую зону и, при необходимости, через одну или более адиабатических каталитических зон (зоны не показаны подробно). Газообразный продукт из самой нижней каталитической зоны каждого цилиндрического каталитического модуля подают в центральное пространство 4, образованное по центру внутри двух или более каталитических модулей, когда модули уложены в штабель внутри силовой оболочки. На этой фигуре комбинированный газообразный продукт 10 выводят из нижней части силовой оболочки конвертера.

На Фиг. 2 приведены три примера теплообменных блоков 11, из которых может быть составлен внутрислойный теплообменник. На Фиг. 2А представлен один пример, где каждый теплообменный блок 11 состоит из устройства 5 подачи и охлаждающей пластины 6. На Фиг. 2В показан тот же принцип, что и на Фиг. 2А, с устройством 5 подачи, однако в этом случае теплообменный блок 11 содержит охлаждающую пластину 12 в виде ряда более узких частей. На Фиг. 2С представлен третий пример теплообменного блока 11, в котором устройство 5 подачи соединено с охлаждающими трубами 13. В каждом случае, изображенном на Фиг. 2А – С, устройство 5 подачи, расположенное в нижней части каждого теплообменного блока 11, обеспечивает равномерное распределение свежего технологического газа

по ширине охлаждающей пластины 6, после чего свежий технологический газ поступает через теплообменник 11 вверх в осевом направлении.

Изобретение не ограничено приведенными выше примерами теплообменных блоков, изображенных на Фиг. 2А – С. Могут также использоваться и другие конфигурации, помимо охлаждающих пластин 6, охлаждающих пластин 12 в виде ряда более узких частей или охлаждающих труб 13, а устройство 5 подачи в качестве альтернативы может размещаться над ними, чтобы внутри каждого теплообменного блока 11 поток свежего технологического газа поступал вниз в осевом направлении. На Фиг. 2D и Е показаны примеры типов охлаждающих пластин, из которых может быть составлен теплообменный блок. Охлаждающая пластина 6, изображенная на Фиг. 2D и Е, относится к типу подушечной пластины. На Фиг. 2D указана линия 19 симметрии.

На Фиг. 3А приведен вид в разрезе цилиндрических каталитических модулей 1, содержащих охлаждаемую каталитическую зону 14. Внешнее кольцевое пространство 2 расположено между внешней силовой оболочкой 3 и цилиндрическим каталитическим модулем 1. Внутрислойный теплообменник, состоящий из выровненных по вертикали параллельных охлаждающих пластин 6 и устройства подачи (не показано), расположен внутри охлаждаемой каталитической зоны 14. На Фиг. 3А стрелки, направленные внутрь на охлаждающих пластинах, обозначают поток свежего технологического газа из наружного кольцевого пространства 2 во внутрислойный теплообменник.

На Фиг. 3В приведен вид в разрезе цилиндрического каталитического модуля в соответствии с разрезом А-А на Фиг. 3А. На этом виде показано, что модуль состоит из охлаждаемой каталитической зоны 14, соединенной последовательно с адиабатической каталитической зоной 15, расположенной ниже охлаждаемой каталитической зоны. Свежий технологический газ подают во внутрислойный теплообменник через устройство 5 подачи. В этом примере по изобретению свежий технологический газ поступает в осевом направлении вверх через охлаждающие пластины, при этом этот поток поступает в направлении, противоположном направлению осевого нисходящего потока в охлаждаемой каталитической зоне 14. Каталитическую зону 14 охлаждают за счет теплообмена со свежим технологическим газом, проходящим через охлаждающие пластины 6. Технологический газ из охлаждаемой каталитической зоны, прошедший

частичную конверсию, последовательно поступает в адиабатическую каталитическую зону 15 каталитического модуля 1, где осуществляют его дальнейшую конверсию с получением газообразного продукта.

На Фиг. 3С приведен вид в разрезе двух цилиндрических каталитических модулей в соответствии с разрезом В-В на Фиг. 3А. Свежий технологический газ подают из внешнего кольцевого пространства 2 в теплообменные блоки 11, каждый из которых состоит из устройства 5 подачи и охлаждающей пластины 6. При прохождении через устройство 5 подачи свежий технологический газ равномерно распределяется по ширине охлаждающей пластины 6. Затем свежий технологический газ поступает в осевом направлении вверх через охлаждающие пластины, при этом происходит предварительное нагревание технологического газа вследствие того, что газ поглощает часть теплоты экзотермической реакции, которая проходит в охлаждаемой каталитической зоне 14, которая расположена между охлаждающими пластинами 6. В этом примере предварительно нагретый свежий технологический газ покидает охлаждающие пластины в верхней части, поворачивает и поступает в осевом направлении вниз через первую зону 14 с газовым охлаждением, а затем адиабатическую каталитическую зону 15 до подачи в центральное пространство 4, откуда он течет к выходу конвертера (не показан). Также показана газовая система 7 с прямым впуском, которая служит для подачи предварительно нагретого технологического газа к катализатору, загруженному в каталитические модули 1 во время восстановления активности катализатора, и/или для подачи свежего, не нагретого технологического газа в верхнюю зону катализатора 14, что позволяет контролировать уровень температуры катализатора при нормальном режиме эксплуатации. Эта газовая система 7 с прямым впуском выполнена с возможностью подачи газа в обвод внешнего кольцевого пространства 2 и, таким образом, это позволяет избежать превышения расчетной температуры силовой оболочки 3 во время восстановления активности катализатора.

На Фиг. 4 показана другая конфигурация, которая входит в объем изобретения. В этом случае каталитический модуль 1 помещают внутри силовой оболочки 3, причем этот каталитический модуль содержит верхнюю адиабатическую каталитическую зону 16, соединенную последовательно с охлаждаемой каталитической зоной 17, с которой последовательно соединена еще одна нижняя адиабатическая каталитическая зона 18. Из внешнего кольцевого

пространства 2 свежий технологический газ поступает в устройство 5 подачи, где он равномерно распределяется по ширине охлаждающей пластины 6. В отличие от Фиг. 3, свежий технологический газ на Фиг. 4 нагревают, когда его подают в осевом направлении вниз через охлаждающую пластину 6. Для подачи газа к катализатору предусмотрено транспортное устройство 8 с возможностью подачи предварительно нагретого свежего технологического газа из выходного отверстия охлаждающей пластины в верхнюю адиабатическую каталитическую зону 16. В настоящем примере поток свежего технологического газа внутри охлаждающей пластины 6 направляется в том же направлении, что и поток технологического газа в охлаждаемой каталитической зоне 17.

Наконец, на Фиг. 5А – С показаны частные варианты осуществления изобретения. На каждой фигуре показан цилиндрический каталитический модуль 1, включающий охлаждаемую каталитическую зону и внутрислойный теплообменник, состоящий из выровненных по вертикали параллельных охлаждающих пластин 6 и устройства подачи (не показано). Внешнее кольцевое пространство 2 расположено между внешней силовой оболочкой 3 и цилиндрическим каталитическим модулем 1. Более подробно, на Фиг. 5А показаны охлаждающие пластины, которые имеют форму цилиндра, с равным расстоянием между находящимися рядом пластинами. На Фиг. 5В охлаждающие пластины расположены в четырех секциях с температурой 90° в цилиндрическом каталитическом модуле 1, при этом все охлаждающие пластины в каждой секции с температурой 90° являются плоскими и параллельными. На Фиг. 5С охлаждающие пластины расположены в трех секциях с температурой 120° в цилиндрическом каталитическом модуле 1, при этом все охлаждающие пластины в каждой секции с температурой 120° являются плоскими и параллельными. Во всех трех случаях толщина слоя катализатора, расположенного между двумя соседними охлаждающими пластинами, является постоянной, что обеспечивается предпочтительным вариантом конфигурации параллельных охлаждающих пластин. Это обеспечивает более равномерное охлаждение катализатора в охлаждаемой каталитической зоне и, следовательно, улучшенные условия реакции и каталитическую эффективность по сравнению с условиями реакции в соответствии с известным уровнем техники.

ПРИМЕР

Было проведено исследование предлагаемой идеи изобретения в ходе синтеза аммиака в сопоставлении с известным уровнем техники, т. е. с конвертером радиальным потоком, поскольку в настоящее время такой конвертер является предпочтительным вариантом для промышленных установок по производству аммиака. В частности, способы изобретения сравнивались с трехслойным конвертером с радиальным потоком с двумя промежуточными теплообменниками для предварительного нагрева свежего технологического газа и для охлаждения между слоями катализатора.

Конвертер по настоящему изобретению был оборудован несколькими цилиндрическими каталитическими модулями, функционирующими параллельно, отрегулированными так, чтобы общий перепад давления в конвертере составлял менее 1 кг/см². Каждый каталитический модуль состоял из охлаждаемой каталитической зоны, внутри которой был расположен внутрислойный теплообменник, при этом каталитическая зона была соединена последовательно с адиабатической каталитической зоной. В обеих каталитических зонах каждого каталитического модуля использовали осевой поток. Внутрислойный теплообменник каждого каталитического модуля состоял из параллельных охлаждающих пластин, обеспечивающих постоянную толщину слоя катализатора в охлаждаемой зоне катализатора. Оба типа конвертеров имели силовую оболочку одинакового размера. Кроме того, использовалось одинаковое давление в контуре, и в обоих случаях рассматривался один и тот же катализатор синтеза аммиака.

Основные результаты представлены в Таблице ниже.

ТАБЛИЦА

	Тип конвертера	
Параметр	Конвертер с радиальным потоком в соответствии с известным уровнем техники	Конвертер согласно изобретению
Дополнительный объем загрузки катализатора	-	24%

Повышение удельной производительности катализатора	-	4,5%
Дополнительная мощность (производительность) конвертера	-	30%
Снижение перепада давления	-	64%
Уменьшение максимальной высоты каталитической зоны	-	75%
Снижение массы слоя катализатора	-	53%

Исследование показывает, что способы по настоящему изобретению обеспечивают ряд предлагаемых преимуществ по сравнению с известным уровнем техники:

- Обеспечивается более эффективное использование доступного объема силовой оболочки, при этом в силовую оболочку такого же объема можно загрузить объем катализатора больший на 24%.

- Удельная производительность катализатора, в метрических тоннах произведенного аммиака за сутки на объем катализатора повышена на 4,5%, что достигается параллельным размещением охлаждающих пластин в цилиндрических модулях, за счет чего обеспечивается постоянная толщина слоя катализатора и улучшенные условия реакции для катализатора в охлаждаемой каталитической зоне.

- Синергетический эффект, который обеспечивается двумя пунктами выше, позволяет производить на 30% больше аммиака в силовой оболочке того же размера. Это является значительным преимуществом как в сценариях реконструкции, так и при строительстве новых установок. Из-за этого можно сократить инвестиционные затраты на силовую оболочку.

- В настоящем исследовании перепад давления в конвертере снижен не менее чем на 64%, что позволило снизить эксплуатационные расходы и повысить энергоэффективность.

- Максимальная высота слоя катализатора уменьшена на 75%, что значительно уменьшает воздействие каталитических сил на механические элементы и уменьшает опасность возникновения неисправностей.

- Масса слоя катализатора была снижена на 53%, что достигается за счет параллельной конфигурации каталитических модулей. Это позволяет загружать катализатор вне реактора и одновременно устанавливать и катализатор, и оборудование (предварительно загруженные модули) непосредственно в силовую оболочку для сокращения времени установки.

Формула изобретения

1. Способ осуществления экзотермических реакций, включающий этапы подачи свежего технологического газа параллельно, по меньшей мере, двум цилиндрическим каталитическим модулям, уложенным в штабель, каждый из которых содержит одну или более расположенных последовательно каталитических зон, причем, по меньшей мере, одну из каталитических зон охлаждают с помощью внутрислойного теплообменника;

экзотермической реакции свежего технологического газа, протекающего в осевом направлении через все каталитические зоны, с получением газообразного продукта;

охлаждения в каждом из цилиндрических каталитических модулей технологического газа, участвующего в экзотермической реакции, с помощью свежего технологического газа, тем самым осуществляя предварительный нагрев свежего технологического газа путем подачи свежего технологического газа из внешнего кольцевого пространства, образованного вокруг каждого из цилиндрических каталитических модулей, во внутрислойный теплообменник и подачи свежего технологического газа через внутрислойный теплообменник при непрямом теплообмене с предварительно нагретым технологическим газом, участвующим в экзотермической реакции, который поступает в осевом направлении через охлаждаемую каталитическую зону; и

сбора газообразного продукта, отведенного из, по меньшей мере, двух каталитических модулей в центральном пространстве, образованном по центру внутри, по меньшей мере, двух уложенных в штабель каталитических модулей.

2. Способ по п. 1, **отличающийся тем**, что, по меньшей мере, одна из соединенных последовательно каталитических зон представляет собой адиабатическую каталитическую зону.

3. Способ по п. 1, **отличающийся тем**, что технологический газ из одиночной охлаждаемой каталитической зоны последовательно подают через одиночную адиабатическую каталитическую зону.

4. Способ по любому из пп. 1 - 3, **отличающийся тем**, что внутрислойный теплообменник содержит множество охлаждающих пластин, образующих проточные секции для свежего технологического газа во внутрислойном теплообменнике.

5. Способ по п. 4, **отличающийся тем**, что толщина охлаждаемого слоя катализатора между двумя соседними охлаждающими пластинами варьируется в пределах $\pm 10\%$.

6. Способ по п. 5, **отличающийся тем**, что толщина охлаждаемого слоя катализатора между двумя соседними охлаждающими пластинами составляет 10 - 300 мм.

7. Способ по п. 6, **отличающийся тем**, что толщина охлаждаемого слоя катализатора между двумя соседними охлаждающими пластинами составляет 20 - 150 мм.

8. Способ по любому из пп. 5 - 7, **отличающийся тем**, что каждая из охлаждающих пластин является практически плоской.

9. Способ по любому из пп. 5 - 8, **отличающийся тем**, что охлаждающие пластины расположены в трех секциях с температурой 120° в цилиндрических каталитических модулях, и при этом все охлаждающие пластины в каждой секции с температурой 120° являются практически плоскими и параллельными.

10. Способ по п. 9, **отличающийся тем**, что практически плоские охлаждающие пластины в любой из трех секций с температурой 120° не являются параллельными практически плоским охлаждающим пластинам в другой секции.

11. Способ по любому из пп. 1 - 10, **отличающийся тем**, что свежий технологический газ подают через внутрислойный теплообменник в противоположном направлении или параллельно направлению потока технологического газа, подаваемого через каталитические зоны в каждом из цилиндрических каталитических модулей.

12. Способ по любому из пп. 1 - 11, **отличающийся тем**, что свежий технологический газ подают через внутрислойный теплообменник

противоположно направлению потока технологического газа, подаваемого через каталитические зоны в каждом из цилиндрических каталитических модулей.

13. Способ по любому из пп. 1 - 12, **отличающийся тем**, что цилиндрические каталитические модули имеют одинаковый размер.

14. Реактор для осуществления экзотермических реакций, содержащий внутри цилиндрической силовой оболочки,

по меньшей мере, два функционирующих параллельно цилиндрических каталитических модуля, уложенных в штабель, каждый из которых содержит одну или более расположенных последовательно каталитических зон со слоем катализатора, предназначенных для осевого течения, причем слой катализатора в, по меньшей мере, одной из каталитических зон охлаждается с помощью внутрислойного теплообменника;

внешнее кольцевое пространство между цилиндрическими каталитическими модулями и цилиндрической силовой оболочкой, находящееся в жидкостном соединении с, по меньшей мере, двумя параллельными цилиндрическими каталитическими модулями;

устройство подачи для подачи свежего технологического газа во входное отверстие внутрислойного теплообменника в, по меньшей мере, одной охлаждаемой зоне катализатора, находящееся в жидкостном соединении с внешним кольцевым пространством;

выходное отверстие внутрислойного теплообменника, образованное открытыми концами внутрислойного теплообменника в, по меньшей мере, одной охлаждаемой зоне катализатора;

крышки, закрывающие, по меньшей мере, два параллельных цилиндрических каталитических модуля; и

выпускное устройство из, по меньшей мере, двух параллельных цилиндрических каталитических модулей.

15. Реактор по п. 14, **отличающийся тем**, что выпускное устройство из, по меньшей мере, двух параллельных цилиндрических каталитических модулей расположено в центральном пространстве, образованном по центру внутри, по меньшей мере, двух уложенных в штабель каталитических модулей.

16. Реактор по п. 14 или 15, **отличающийся тем**, что, по меньшей мере, одна из расположенных последовательно каталитических зон представляет собой адиабатическую каталитическую зону.

17. Реактор по любому из пп. 14 - 16, имеющий одиночную охлаждаемую каталитическую зону, последовательно соединенную с одиночной адиабатической каталитической зоной.

18. Реактор по любому из пп. 14 - 17, **отличающийся тем**, что внутрислойный теплообменник представляет собой пластинчатый теплообменник с множеством охлаждающих пластин, образующих проточные секции для свежего технологического газа во внутрислойном теплообменнике.

19. Реактор по п. 17, **отличающийся тем**, что толщина охлаждаемого слоя катализатора между двумя соседними охлаждающими пластинами варьируется в пределах $\pm 10\%$.

20. Реактор по п. 19, **отличающийся тем**, что толщина охлаждаемого слоя катализатора между двумя соседними охлаждающими пластинами составляет 10 - 300 мм.

21. Реактор по п. 19, **отличающийся тем**, что толщина охлаждаемого слоя катализатора между двумя соседними охлаждающими пластинами составляет 20 - 150 мм.

22. Реактор по любому из пп. 18 - 21, **отличающийся тем**, что каждая из охлаждающих пластин является практически плоской.

23. Реактор по любому из пп. 18 - 22, **отличающийся тем**, что охлаждающие пластины расположены в трех секциях с температурой 120° в цилиндрических каталитических модулях, и при этом все охлаждающие пластины в каждой секции с температурой 120° являются практически плоскими и параллельными.

24. Реактор по пп. 18 - 22, **отличающийся тем**, что охлаждающие пластины расположены в трех секциях с температурой 120° в цилиндрических каталитических модулях, и при этом практически плоские охлаждающие пластины

в любой из трех секций с температурой 120° не являются параллельными практически плоским охлаждающим пластинам в другой секции.

25. Реактор по любому из пп. 14 - 24, **отличающийся тем**, что цилиндрические каталитические модули имеют одинаковый размер.

26. Реактор по любому из пп. 17 - 25, **отличающийся тем**, что охлаждающие пластины имеют подушкообразную форму.

27. Реактор по любому из пп. 14 - 26, **отличающийся тем**, что входное отверстие внутрислойного теплообменника снабжено устройством подачи газа, находящимся в жидкостном соединении с внешним кольцевым пространством.

28. Реактор по любому из пп. 14 - 27, **отличающийся тем**, что выпускное устройство из самой нижней каталитической зоны в каждом из, по меньшей мере, двух функционирующих параллельно цилиндрических каталитических модулей находится в жидкостном соединении с центральным пространством, образованным по центру внутри, по меньшей мере, двух уложенных в штабель каталитических модулей.

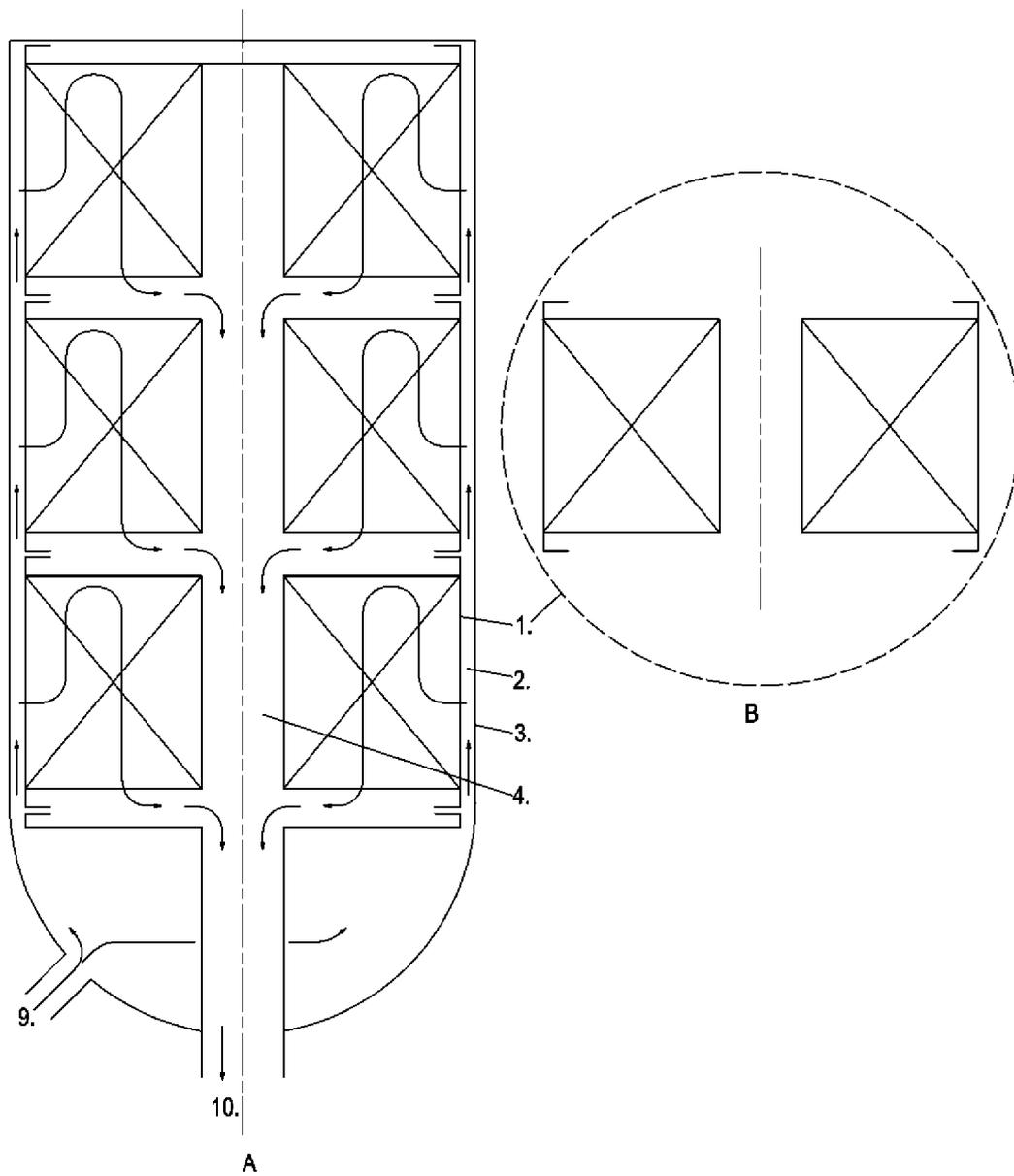
29. Реактор по любому из пп. 14 - 28, **отличающийся тем**, что реактор содержит дополнительное входное устройство подачи для подачи дополнительного потока предварительно нагретого технологического газа.

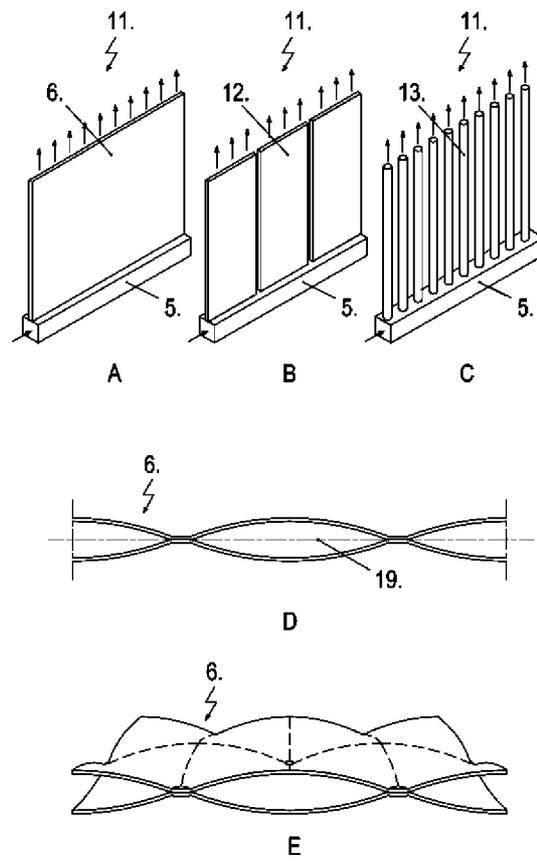
30. Реактор по п. 29, **отличающийся тем**, что устройство для подачи дополнительного потока предварительно нагретого технологического газа выполнено с возможностью подачи газа в обвод внешнего кольцевого пространства и внутрислойного теплообменника.

31. Реактор по любому из пп. 14 - 30, **отличающийся тем**, что реактор содержит устройство для подачи дополнительного потока свежего технологического газа.

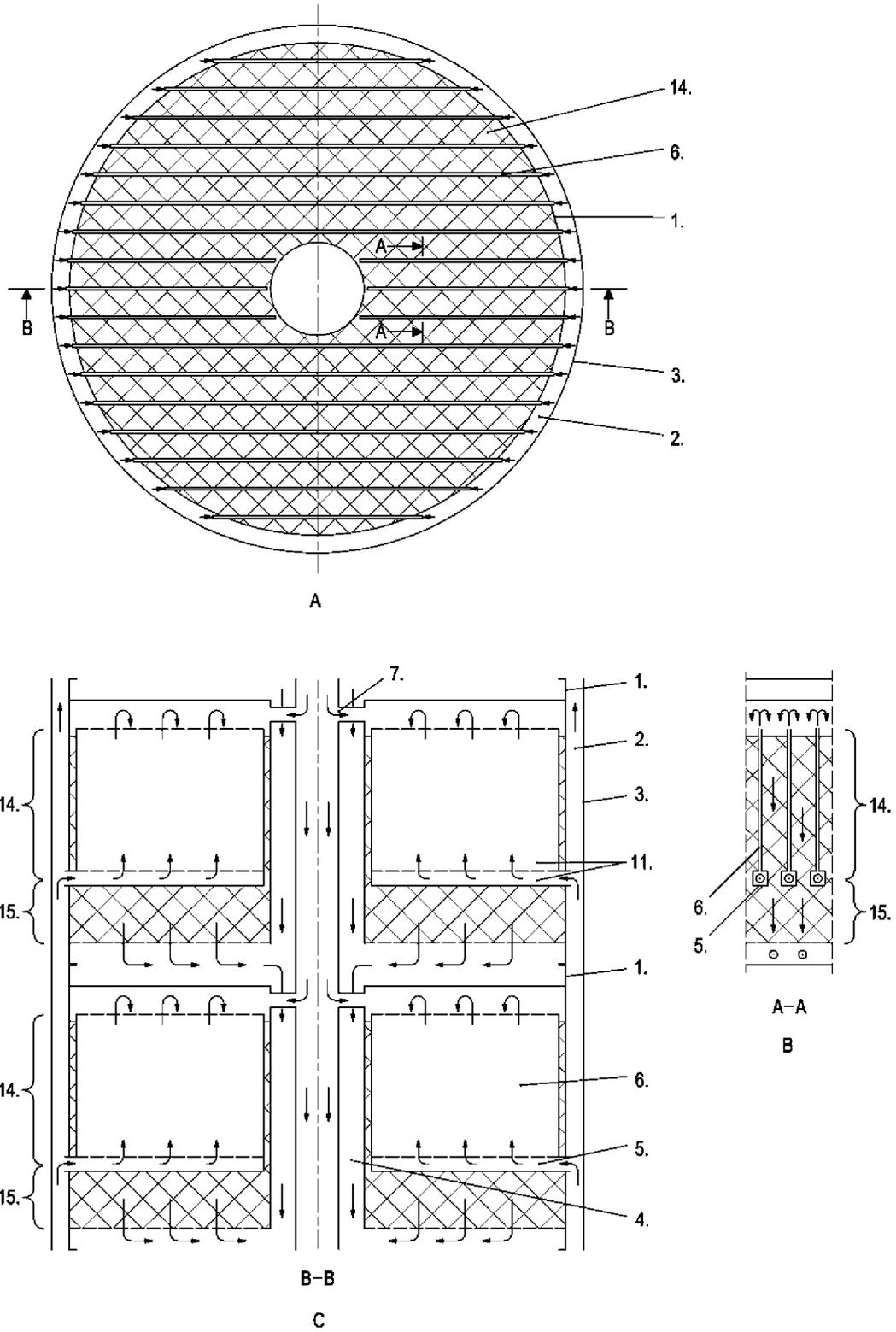
32. Реактор по п. 30, **отличающийся тем**, что устройство для подачи дополнительного потока свежего технологического газа выполнено с возможностью подачи газа в обвод внешнего кольцевого пространства и внутрислойного теплообменника.

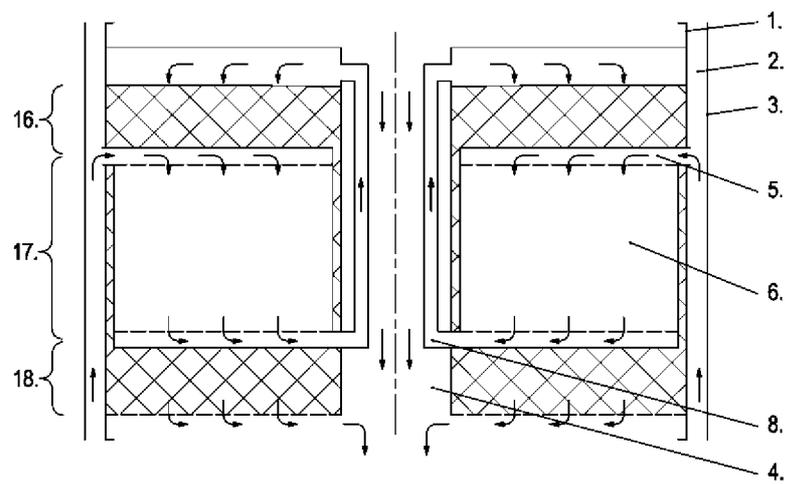
Фигура 1



Фигура 2

Фигура 3



Фигура 4

Фигура 5

