

(19)



Евразийское
патентное
ведомство

(21) 202490203

(13) A1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки
2024.04.11

(51) Int. Cl. C07C 1/04 (2006.01)
C07C 11/04 (2006.01)
C07C 9/06 (2006.01)

(22) Дата подачи заявки
2022.08.30

(54) СПОСОБЫ И СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ КОНДЕНСАЦИИ
МЕТАНА

(31) 63/238,816

(72) Изобретатель:

(32) 2021.08.31

Подрбарак Гэри, Лю Цзань, Аззам
Халид (US), Розенберг Дэниел (HU)

(33) US

(86) PCT/US2022/041972

(74) Представитель:

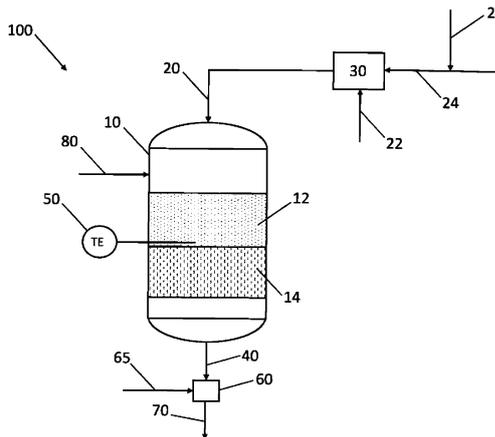
(87) WO 2023/034253 2023.03.09

Нилова М.И. (RU)

(71) Заявитель:

ЛУММУС ТЕКНОЛОДЖИ ЛЛС (US)

(57) Предлагается способ проведения реакции окислительной конденсации метана (ОКМ) с получением соединений C_{2+} с использованием подачи низкотемпературной газовой смеси. Способ включает введение газовой смеси, содержащей метан, кислород, водород и монооксид углерода, с температурой менее или равной $300^{\circ}C$, на вход реактора ОКМ, который содержит катализатор горения и катализатор ОКМ. По меньшей мере часть сырьевой газовой смеси сжигается с использованием катализатора горения с образованием нагретой газовой смеси, имеющей температуру по меньшей мере $450^{\circ}C$. Нагретая газовая смесь приводится в контакт с катализатором ОКМ для инициации реакции ОКМ и получения выходящего потока ОКМ, содержащего соединения C_{2+} . Также предлагается система для проведения реакции ОКМ с использованием низкотемпературной газовой смеси исходного сырья.



202490203

A1

A1

202490203

СПОСОБЫ И СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ КОНДЕНСАЦИИ МЕТАНА

ПЕРЕКРЕСНАЯ ССЫЛКА НА РОДСТВЕННЫЕ ЗАЯВКИ

[0001] Настоящая заявка заявляет приоритет на основе предварительной заявки США № 63/238,816, поданной 31 августа 2021 года, содержание которой включено в настоящей документ посредством ссылки.

ОБЛАСТЬ ТЕХНИКИ

[0002] Настоящее изобретение относится к способам и системам для проведения реакции окислительной конденсации метана с получением соединений C_{2+} . Более конкретно, настоящее изобретение относится к способам и системам проведения реакции окислительной конденсации метана с получением соединений C_{2+} с использованием подачи низкотемпературной газовой смеси.

УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

[0003] Известно, что метан и кислород можно использовать для получения соединений C_{2+} (например, этилена, этана) посредством реакции окислительной конденсации метана (ОКМ). Хотя за последние несколько десятилетий технологии ОКМ были посвящены обширные исследования и разработки, жизнеспособный способ ОКМ еще не был коммерциализирован.

[0004] Одним из основных препятствий, которые необходимо преодолеть для достижения коммерчески жизнеспособного способа ОКМ, были высокие температуры загорания и реакции, необходимые для протекания реакции ОКМ. В традиционных способах проведения реакции ОКМ обычно используется высокотемпературная печь для предварительного нагрева исходного(ых) реагента(ов) до температуры, необходимой для загорания или «воспламенения» катализатора ОКМ для инициирования реакции ОКМ. Эксплуатация высокотемпературной печи может быть довольно дорогостоящей, а также создает источник выбросов, поскольку высокотемпературная печь сжигает топливо (например, природный газ) для выработки необходимого тепла.

[0005] Более того, смешивание реагентного сырья (т.е. метансодержащего сырья и кислородсодержащего сырья) при высоких температурах, необходимых для загорания катализатора ОКМ и проведения реакции ОКМ, может создать потенциальные проблемы безопасности процесса и эксплуатации. Например, смешивание сырьевых реагентов при высоких температурах может привести к возгоранию сырьевой газовой смеси-реагента до того, как он достигнет слоя катализатора ОКМ. Такое преждевременное загорание может привести к повреждению реактора, а также слоя катализатора ОКМ. Повреждение катализатора может препятствовать способности катализатора воспламениться и инициировать реакцию ОКМ. Кроме того, преждевременное загорание сырьевой газовой смеси-реагента может снизить селективность реакции ОКМ из-за превращения метана в диоксид углерода и монооксид углерода вместо желаемых продуктов C_{2+} . Кроме того, самые разнообразные нарушения процесса (например, нарушение расхода, отклонение температуры) могут привести к преждевременному загоранию сырьевой газовой смеси-реагента. Соответственно, смешивание исходных реагентов при высоких температурах, необходимых для загорания катализатора ОКМ и проведения реакции ОКМ, может привести к проблемам безопасности процесса.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

[0006] В настоящем документе раскрыты способы и системы для проведения реакции окислительной конденсации метана с получением соединений C_{2+} с использованием низкотемпературной сырьевой газовой смеси. При обеспечении сырьевой газовой смеси с низкой температурой (т. е. $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ или ниже), безопасность процесса повышается за счет исключения вышеупомянутых проблем, связанных со смешиванием исходных реагентов метана и кислорода при повышенных температурах (например, $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ или более). Кроме того, проведение реакции окислительной конденсации метана с использованием низкотемпературной сырьевой газовой смеси устраняет необходимость в печи с высокотемпературным нагревателем сырья и исключает выбросы воздуха, связанные с печью, в процессе процесса. Кроме того, способы и системы настоящего изобретения могут способствовать селективности по C_{2+} реакции ОКМ, если водород, монооксид углерода или оба изначально предпочтительно сжигаются, а не метан.

[0007] Настоящее изобретение предлагает способ проведения реакции окислительной конденсации метана (ОКМ) с получением соединений C_{2+} , причем способ включает: (а)

введение сырьевой газовой смеси, содержащей метан (CH_4), кислород (O_2), водород (H_2) и монооксид углерода (CO) и имеющей температуру менее или равную $300\text{ }^\circ\text{C}$ на вход в реактор ОКМ, причем реактор ОКМ содержит катализатор горения и катализатор ОКМ; (б) приведение в контакт катализатора горения с сырьевой газовой смесью для сжигания по меньшей мере части сырьевой газовой смеси и образования нагретой газовой смеси, имеющей температуру по меньшей мере $450\text{ }^\circ\text{C}$; и (в) приведение в контакт катализатора ОКМ с нагретой газовой смесью для инициирования реакции ОКМ и получения выходящего потока ОКМ, содержащего (i) соединения C_{2+} , включая этилен и этан, и (ii) примеси, отличные от C_{2+} , содержащие один или несколько из CO , CH_4 , H_2 и диоксида углерода (CO_2).

[0008] Способ согласно абзацу [0007], в котором катализатор горения содержит металл, оксид металла или смешанный оксид металла, содержащий по меньшей мере одно из платины, хрома, меди, палладия, кобальта, железа, марганца, золота, церия, висмута, индия, молибдена, родия, рутения, германия, гадолиния, сурьмы, таллия, теллура, свинца, цинка или олова.

[0009] Способ согласно абзацу [0007] или абзацу [0008], в котором сырьевая газовая смесь имеет температуру от $15\text{ }^\circ\text{C}$ до $250\text{ }^\circ\text{C}$ на входе в реактор ОКМ.

[0010] Способ по любому из абзацев [0007] - [0009], в котором нагретая газовая смесь имеет температуру от $500\text{ }^\circ\text{C}$ до $700\text{ }^\circ\text{C}$.

[0011] Способ по любому из абзацев [0007] - [0010], в котором реактор ОКМ дополнительно содержит по меньшей мере один источник загорания, при этом по меньшей мере один источник загорания способствует загоранию компонентов сырьевой газовой смеси.

[0012] Способ согласно абзацу [0011], в котором по меньшей мере один источник загорания находится в контакте с катализатором горения и содержит по меньшей мере один из: электрический картриджный нагреватель или трубопровод, нагреваемый паром.

[0013] Способ согласно абзацу [0011], в котором по меньшей мере один источник загорания расположен перед катализатором горения и катализатором ОКМ и включает впрыск перегретого водяного пара при температуре от $600\text{ }^\circ\text{C}$ до $1000\text{ }^\circ\text{C}$.

[0014] Способ по любому из абзацев [0007] - [0013], дополнительно включающий удаление CO_2 из выходящего потока ОКМ.

[0015] Способ по любому из абзацев [0007] - [0014], в котором реакцию ОКМ проводят при температуре от $450\text{ }^\circ\text{C}$ до $950\text{ }^\circ\text{C}$.

[0016] Способ по любому из абзацев [0007] - [0015], в котором реакция ОКМ имеет селективность в отношении соединений C_{2+} по меньшей мере 35%.

[0017] Способ по любому из абзацев [0007] - [0016], дополнительно включающий разделение выходящего потока ОКМ на по меньшей мере (i) первый поток, содержащий CO , H_2 и CH_4 , и (ii) второй поток, содержащий соединения C_{2+} , включая C_2H_4 и C_2H_6 .

[0018] Способ согласно абзацу [0017], дополнительно включающий направление по меньшей мере части первого потока в реактор ОКМ как части сырьевой газовой смеси.

[0019] Способ согласно абзацу [0017] или абзацу [0018], дополнительно включающий разделение второго потока с получением третьего потока, содержащего C_2H_4 , и четвертого потока, содержащего C_2H_6 .

[0020] Способ согласно абзацу [0019], дополнительно включающий направление четвертого потока в установку колоночного крекинга после катализатора горения и катализатора ОКМ.

[0021] Способ по любому из абзацев [0007] - [0020], в котором катализатор горения предпочтительно сжигает H_2 , CO или оба, а не CH_4 .

[0022] Настоящее изобретение предлагает способ проведения реакции окислительной конденсации метана (ОКМ) с получением соединений C_{2+} , причем способ включает: (а) смешивание потока окислителя, содержащего кислород (O_2), имеющего температуру от $0\text{ }^\circ\text{C}$ до $50\text{ }^\circ\text{C}$ с потоком углеводорода, содержащего метан (CH_4), монооксид углерода (CO) и водород (H_2), имеющим температуру менее или равную $300\text{ }^\circ\text{C}$, с образованием сырьевой газовой смеси, имеющей температуру менее или равную $300\text{ }^\circ\text{C}$; (б) введение сырьевой газовой смеси на вход реактора ОКМ, причем реактор ОКМ содержит катализатор горения и катализатор ОКМ; (в) приведение в контакт катализатора горения с сырьевой газовой смесью для сжигания по меньшей мере части сырьевой газовой смеси и образования нагретой газовой смеси, имеющей температуру по меньшей мере

450 °С; и (г) приведение в контакт катализатора ОКМ с нагретой газовой смесью с иницированием реакции ОКМ и получением выходящего потока ОКМ, содержащего (i) соединения C₂₊, включая этилен и этан, и (ii) примеси, отличные от C₂₊, содержащие один или несколько из СО, СН₄, Н₂ и диоксида углерода (СО₂).

[0023] Способ согласно абзацу [0022], в котором поток окислителя дополнительно содержит водяной пар.

[0024] Способ согласно абзацу [0022] или абзацу [0023], в котором катализатор горения содержит металл, оксид металла или смешанный оксид металла, содержащий по меньшей мере одно из платины, хрома, меди, палладия, кобальта, железа, марганца, золота, церия, висмута, индия, молибдена, родия, рутения, германия, гадолиния, сурьмы, таллия, теллура, свинца, цинка или олова.

[0025] Способ по любому из абзацев [0022] - [0024], в котором сырьевая газовая смесь имеет температуру от 15 °С до 250 °С на входе в реактор ОКМ.

[0026] Способ по любому из абзацев [0022] - [0025], в котором нагретая газовая смесь имеет температуру от 500 °С до 700 °С.

[0027] Способ по любому из абзацев [0022] - [0026], в котором реактор ОКМ дополнительно содержит по меньшей мере один источник загорания, причем по меньшей мере один источник загорания способствует загоранию компонентов сырьевой газовой смеси.

[0028] Способ согласно абзацу [0027], в котором по меньшей мере один источник загорания находится в контакте с катализатором горения и содержит по меньшей мере один из: электрический картриджный нагреватель или трубопровод, нагреваемый паром.

[0029] Способ согласно абзацу [0027], в котором по меньшей мере один источник загорания расположен перед катализатором горения и катализатором ОКМ и включает впрыск перегретого водяного пара при температуре от 600 °С до 1000 °С.

[0030] Способ по любому из абзацев [0022] - [0029], в котором реакцию ОКМ проводят при температуре от 450 °С до 950 °С.

[0031] Способ по любому из абзацев [0022] - [0030], в котором реакция ОКМ имеет селективность в отношении соединений C_{2+} по меньшей мере 35%.

[0032] Способ по любому из абзацев [0022] - [0031], дополнительно включающий удаление CO_2 из выходящего потока ОКМ.

[0033] Способ по любому из абзацев [0022] - [0032], дополнительно включающий разделение выходящего потока ОКМ на по меньшей мере (i) первый поток, содержащий CO , H_2 и CH_4 , и (ii) второй поток, содержащий соединения C_{2+} , включая C_2H_4 и C_2H_6 .

[0034] Способ согласно абзацу [0033], дополнительно включающий направление по меньшей мере части первого потока в реактор ОКМ как часть сырьевой газовой смеси.

[0035] Способ согласно абзацу [0033] или абзацу [0034], дополнительно включающий разделение второго потока с получением третьего потока, содержащего C_2H_4 , и четвертого потока, содержащего C_2H_6 .

[0036] Способ согласно абзацу [0035], дополнительно включающий направление четвертого потока в блок колоночного крекинга, который находится после катализатора горения и катализатора ОКМ.

[0037] Способ по любому из абзацев [0022] - [0036], в котором катализатор горения предпочтительно сжигает H_2 , CO или оба, а не CH_4 .

[0038] Настоящее изобретение обеспечивает систему для проведения реакции окислительной конденсации метана (ОКМ) с получением соединений C_{2+} , причем система включает: реактор ОКМ, содержащий катализатор горения и катализатор ОКМ, при этом в реактор ОКМ подается сырьевая газовая смесь, содержащая метан (CH_4), кислород (O_2), водород (H_2) и монооксид углерода (CO) при температуре менее или равной $300\text{ }^\circ\text{C}$, при этом катализатор горения способствует сгоранию по меньшей мере части сырьевой газовой смеси с образованием нагретой газовой смеси, имеющей температуру по меньшей мере $450\text{ }^\circ\text{C}$, и при этом катализатор ОКМ инициирует реакцию ОКМ при контакте с нагретой газовой смесью и производит поток ОКМ, содержащий (i) соединения C_{2+} , включая этилен и этан, и (ii) примеси, отличные от C_{2+} , включающие один или несколько из CO , CH_4 , H_2 и диоксида углерода (CO_2).

[0039] Система согласно абзацу [0038], в которой катализатор горения содержит металл, оксид металла или смешанный оксид металла, содержащий по меньшей мере один из платины, хрома, меди, палладия, кобальта, железа, марганца, золота, церия, висмута, индия, молибдена, родия, рутения, германия, гадолиния, сурьмы, таллия, теллура, свинца, цинка или олова.

[0040] Система согласно абзацу [0038] или абзацу [0039], в которой реактор ОКМ дополнительно содержит по меньшей мере один источник загорания, причем по меньшей мере один источник загорания способствует загоранию компонентов сырьевой газовой смеси.

[0041] Система согласно абзацу [0040], в которой по меньшей мере один источник загорания находится в контакте с катализатором горения и содержит по меньшей мере один из: электрический картриджный нагреватель или трубопровод, нагреваемый паром.

[0042] Система согласно абзацу [0040], в которой по меньшей мере один источник загорания расположен перед катализатором горения и катализатором ОСМ и содержит инжектор перегретого водяного пара, который впрыскивает пар при температуре от 600 °С до 1000 °С в реактор ОКМ.

[0043] Система по любому из абзацев [0038] - [0042], дополнительно содержащая подсистему разделения после реактора ОКМ и выполненную с возможностью жидкостного соединения с ним, при этом подсистема разделения сконфигурирована для приема выходящего потока ОКМ и разделения выходящего потока ОКМ на по меньшей мере (i) первый поток, содержащий CO, H₂ и CH₄, и (ii) второй поток, содержащий соединения C₂₊, включая C₂H₄ и C₂H₆.

[0044] Система по любому из абзацев [0038] - [0043], дополнительно содержащая блок удаления CO₂, выполненный с возможностью жидкостного соединения с реактором ОКМ и подсистемой разделения, при этом блок удаления CO₂ выполнен с возможностью удаления CO₂ из выходящего потока ОКМ и направления практически свободного от CO₂ выходящего потока ОКМ в подсистему разделения.

[0045] Система согласно абзацу [0043] или абзацу [0044], в которой подсистема разделения включает блок деметанирования и блок очистки C₂; при этом блок

деметанирования выполнен с возможностью: (i) приема выходящего потока ОКМ; (ii) разделения выходящего потока ОКМ на первый поток и второй поток; (iii) направления по меньшей мере части первого потока в реактор ОКМ; и (iv) направления второго потока в установку очистки C_2 ; и при этом установка очистки C_2 выполнена с возможностью жидкостного соединения с реактором ОКМ и выполнена с возможностью приема второго потока и разделения второго потока на по меньшей мере третий поток, содержащий C_2H_4 , и четвертый поток, содержащий C_2H_6 .

[0046] Система согласно абзацу [0045], в которой реактор ОКМ дополнительно включает блок колоночного крекинга (КК) после катализатора горения и катализатора ОКМ, и в которой блок КК сконфигурирован для приема четвертого потока и генерирования C_2H_4 .

[0047] Система по любому из абзацев [0038] - [0046], в которой катализатор горения предпочтительно сжигает H_2 , CO или оба, а не CH_4 .

[0048] Другие аспекты и преимущества настоящего изобретения станут очевидными из последующего описания.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

[0049] ФИГ. 1 иллюстрирует схему примерного реактора окислительной конденсации метана в соответствии с настоящим изобретением;

[0050] ФИГ. 2 иллюстрирует схему примерного реактора окислительной конденсации метана в соответствии с настоящим изобретением;

[0051] ФИГ. 3 иллюстрирует схему примерного реактора окислительной конденсации метана в соответствии с настоящим изобретением;

[0052] ФИГ. 4 иллюстрирует схему примерного реактора окислительной конденсации метана в соответствии с настоящим изобретением;

[0053] ФИГ. 5 иллюстрирует блок-схему примерной системы для проведения реакции окислительной конденсации метана с получением соединений C_{2+} в соответствии с настоящим изобретением; и

[0054] ФИГ. 6 иллюстрирует блок-схему примерной системы для проведения реакции окислительной конденсации метана с получением соединений C_{2+} в соответствии с настоящим изобретением.

ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ

[0055] В настоящем документе описаны способы и системы для проведения реакции окислительной конденсации метана с получением соединений C_{2+} с использованием подачи низкотемпературной газовой смеси. В соответствии с изобретением настоящего изобретения реакцию окислительной конденсации метана (ОКМ) проводят с использованием сырьевой газовой смеси, имеющей температуру менее или равную $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Способы и системы настоящего изобретения повышают общую безопасность процесса ОКМ за счет исключения проблем, связанных со смешиванием метана и кислорода при повышенных температурах (например, $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ или более). Кроме того, способы и системы настоящего изобретения устраняют необходимость в высокотемпературной печи или предварительном нагревателе, обычно используемых в традиционных процессах ОКМ, что тем самым исключает связанные с этим выбросы воздуха из печи/предварительного нагревателя. Кроме того, способы и системы настоящего изобретения могут способствовать селективности реакции ОКМ по C_{2+} за счет предпочтительного сжигания водорода, монооксида углерода или обоих, а не метана, в сырьевой газовой смеси.

[0056] Термин «реакция ОКМ», используемый в настоящем документе, обычно относится к реакции или процессу окислительной конденсации метана с получением этилена (C_2H_4). Реакция ОКМ может включать окисление метана до углеводорода и воды и включает экзотермическую реакцию. В реакции ОКМ метан может быть частично окислен до одного или нескольких соединений C_{2+} , таких как этилен. Например, реакция ОКМ представляет собой $2\text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$. Реакция ОКМ может давать соединения C_{2+} . Реакцию ОКМ можно облегчить с помощью катализатора ОКМ, такого как гетерогенный катализатор. Дополнительные побочные продукты реакций ОКМ могут включать CO , CO_2 и H_2 . Этан также может реагировать с образованием этилена на катализаторе ОКМ в реакции ОКМ.

[0057] Термины « C_{2+} » и «соединение C_{2+} », используемые в настоящем документе, обычно относятся к соединению, содержащему два или более атомов углерода,

например, C_2 , C_3 и т.д. Соединения C_{2+} включают, помимо прочего, алканы, алкены и алкины, содержащие два или более атомов углерода. Примеры соединений C_{2+} включают этан, этилен, этин, пропан, пропилен, пропин и т.д. Аналогичным образом, термины « C_{3+} » и «соединение C_{3+} », используемые в настоящем документе, обычно относятся к соединению, содержащему три или более атомов углерода, например, C_3 , C_4 , C_5 и т. д. Соединения C_{3+} включают, помимо прочего, алканы, алкены и алкины, содержащие два или более атомов углерода. Примеры соединений C_{3+} включают пропан, пропилен, пропин, бутан, бутен и т.д.

[0058] Термин «примеси, отличные от C_{2+} », используемый в настоящем документе, обычно относится к материалу, который не включает соединения C_{2+} . Примеры примесей, отличных от C_{2+} , которые могут быть обнаружены в некоторых потоках или выходящих продуктах реакции ОКМ, включают, помимо прочего, азот (N_2), кислород (O_2), воду (H_2O), аргон (Ar), водород (H_2) монооксид углерода (CO), диоксид углерода (CO_2) и метан (CH_4).

[0059] Термин «селективность по C_{2+} », используемый в настоящем документе, обычно относится к проценту молей углерода в метане, которые превращаются в соединения C_{2+} (например, этилен, этан).

[0060] Термин «блок», используемый в настоящем документе, обычно относится к операционному блоку. Операционный блок может осуществлять одну или несколько базовых операций в процессе. Блок может иметь один или несколько субблоков (или подсистем). Операционные блоки могут включать физические изменения или химические преобразования, такие как разделение, кристаллизация, испарение, фильтрация, полимеризация, изомеризация, другие реакции или их комбинации. Блок может включать один или несколько отдельных компонентов. Например, блок разделения может включать одну или несколько колонн разделения, или блок амина может включать одну или несколько колонн амина.

[0061] Используемый в настоящем документе термин «адиабатический» относится к системе, в которой наблюдается минимальный или в идеале отсутствует взаимообмен или обмен тепловой энергией с окружающей средой. Используемые в настоящем документе термины «адиабатические» резервуар (например, реакторы) и сосуды, работающие в «адиабатических» условиях, относятся к резервуарам, не имеющим

специальных приспособлений для отвода или ввода тепловой энергии в систему или из нее. Несмотря на вышесказанное, следует понимать, что побочная теплопередача между резервуаром и окружающей его средой рассматривается в контексте приведенного выше определения. Обычно, когда адиабатический резервуар используется для проведения реакции, которая высвобождает тепловую энергию (т.е. «экзотермическая» реакция), положительный температурный профиль будет поддерживаться между реагентами, добавленными в резервуар, и продуктами, удаленными из резервуара. Другими словами, продукты, удаляемые из резервуара, обычно имеют температуру выше температуры реагентов, введенных в резервуар, поскольку тепловая энергия, выделяемая в результате реакции, может быть существенно удалена только продуктами реакции.

[0062] Термин «по существу не содержит CO_2 », используемый в настоящем документе, обычно относится к молярному процентному содержанию CO_2 менее чем 1%, включая менее чем 0,5%, менее чем 0,25%, менее чем 0,1%, менее чем 0,05%, а также в том числе 0%.

[0063] Термин «по существу сухой», используемый в настоящем документе, обычно относится к молярному процентному содержанию H_2O менее чем 1%, включая менее чем 0,5%, менее чем 0,25%, менее чем 0,1%, менее чем 0,05%, а также в том числе 0%.

[0064] В соответствии с настоящим изобретением было обнаружено, что реакция ОКМ может быть проведена с использованием сырьевой газовой смеси, имеющей температуру 300 °C или менее, путем использования катализатора горения для автотермического нагрева сырьевой газовой смеси до температуры достаточной для инициирования реакции ОКМ, когда нагретая газовая смесь контактирует с катализатором ОКМ. Способы и системы настоящего изобретения имеют несколько преимуществ по сравнению с известными способами и системами ОКМ, включая повышенную безопасность процесса за счет использования подачи газовой смеси, содержащей метан и кислород при низкой температуре (т.е. 300 °C или менее), меньшее количество капитального оборудования и выбросов. (то есть, отсутствие высокотемпературной печи/предварительного нагревателя или связанных с ними выбросов) и хорошей селективности по C_{2+} в реакции ОКМ.

[0065] Теперь будут сделаны ссылки на чертежи для дальнейшего описания способов и систем настоящего изобретения. Следует понимать, что чертежи и элементы на них не

обязательно прорисованы в масштабе. На чертежах направление потока жидкости указано стрелками. Жидкость может быть направлена от одного блока к другому с помощью клапанов и системы потока жидкости. Как понятно специалистам в данной области техники, такие системы потока жидкости могут включать в себя компрессоры и/или насосы, а также систему управления для регулирования потока жидкости.

[0066] Обратимся теперь к ФИГ. 1, где показана система 100 для проведения реакции ОКМ с получением соединений C_{2+} , включая этилен (C_2H_4), в соответствии с настоящим изобретением. Система 100 включает реактор ОКМ 10, содержащий катализатор горения 12 и катализатор ОКМ 14. В некоторых аспектах система 100 может включать в себя один или несколько реакторов ОКМ 10, расположенных последовательно и/или параллельно. В некоторых аспектах реактор ОКМ 10 представляет собой адиабатический реактор. В некоторых аспектах реактор ОКМ 10 работает в адиабатических условиях. В некоторых аспектах реактор ОКМ 10 представляет собой изотермический реактор. В некоторых аспектах реактор ОКМ 10 работает в изотермических условиях. Реактор ОКМ 10 может работать при давлении от 0 кПа (манометрическое) до 2000 кПа (манометрическое), включая давление от 100 кПа (манометрическое) до 2000 кПа (манометрическое), давление от 250 кПа (манометрическое) до 2000 кПа (манометрическое), давление от 500 кПа (манометрическое) до 2000 кПа (манометрическое), давление от 700 кПа (манометрическое) до 1500 кПа (манометрическое), а также в том числе включает давление от 750 кПа (манометрическое) до 1250 кПа (манометрическое).

[0067] Как видно на ФИГ. 1, реактор ОКМ 10 принимает сырьевую газовую смесь 20 на входе в реактор ОКМ 10. Сырьевая газовая смесь 20 содержит метан (CH_4), кислород (O_2), водород (H_2) и монооксид углерода (CO). Сырьевая газовая смесь 20 может быть образована путем смешивания потока углеводорода 22, содержащего CH_4 , H_2 и CO , и потока окислителя 24, содержащего O_2 . В некоторых аспектах способов и систем настоящего изобретения поток окислителя 24 обеспечивается потоком воздуха или потоком O_2 , который генерируется установкой разделения воздуха. В некоторых аспектах способов и систем настоящего изобретения поток окислителя 24 дополнительно содержит пар, который можно впрыскивать или иным образом добавлять в поток окислителя 24 по линии 26. В некоторых аспектах поток углеводорода 22 смешивают с потоком окислителя 24 в смесительном устройстве 30. Смесительное

устройство 30 может представлять собой любое известное устройство, подходящее для смешивания первого газового потока, содержащего углеводороды, и второго газового потока, содержащего кислород, такое как, например, смесительное устройство, описанное в патенте США № 3706534. В некоторых аспектах смесительное устройство 30 содержит технологический трубопровод или смесительный тройник.

[0068] В соответствии со способами и системами настоящего изобретения сырьевая газовая смесь 20 вводится в реактор ОКМ 10 при температуре менее или равной 300 °С. В некоторых аспектах сырьевая газовая смесь 20 вводится в реактор ОКМ 10 при давлении от 200 кПа (манометрическое) до 1400 кПа (манометрическое), включая давление от 500 кПа (манометрическое) до 1200 кПа (манометрическое), от 600 кПа (манометрическое) до 1100 кПа (манометрическое), от 700 кПа (манометрическое) до 1000 кПа (манометрическое), а также включая давление от 750 кПа (манометрическое) до 950 кПа (манометрическое). В некоторых аспектах сырьевая газовая смесь 20 имеет температуру от 15 °С до 300 °С на входе в реактор ОКМ 10, включая температуру от 50 °С до 300 °С, от 100 °С до 300 °С, от 100 °С до 250 °С, от 100 °С до 225 °С, от 100 °С до 200 °С, от 100 °С до 175 °С, от 100 °С до 150 °С, от 100 °С до 125 °С, от 125 °С до 300 °С, от 150 °С до 300 °С, от 175 °С до 300 °С, от 200 °С до 300 °С, от 225 °С до 300 °С, от 250 °С до 300 °С, а также включая температуру от 275 °С до 300 °С на входе в реактор ОКМ 10. В некоторых аспектах поток углеводорода 22, используемый для формирования сырьевой газовой смеси 20, имеет температуру менее или равную 300 °С, включая температуру от 15 °С до 300 °С, от 25 °С до 300 °С, от 50 °С до 300 °С, от 75 °С до 300 °С, от 100 °С до 300 °С, от 125 °С до 250 °С, от 150 °С до 225 °С, от 175 °С до 200 °С, от 15 °С до 250 °С, от 15 °С до 200 °С, от 15 °С до 150 °С, от 15 °С до 100 °С, от 15 °С до 75 °С, а также включая температуру от 15 °С до 50 °С. В некоторых аспектах поток окислителя 24, используемый для формирования сырьевой газовой смеси 20, имеет температуру от 0 °С до 250 °С, включая температуру от 10 °С до 250 °С, от 20 °С до 250 °С, от 30 °С до 200 °С, от 30 °С до 150 °С, от 30 °С до 100 °С, от 30 °С до 50 °С, от 40 °С до 250 °С, от 100 °С до 250 °С, от 150 °С до 250 °С, от 200 °С до 250 °С, от 0 °С до 50 °С, а также включая температуру от 0 °С до 30 °С.

[0069] Обеспечивая подачу сырьевой газовой смеси 20 в реактор ОКМ 10 при относительно низкой температуре, способы и системы настоящего изобретения повышают безопасность процесса ОКМ, по существу устраняя вероятность

преждевременного загорания сырьевой газовой смеси 20. Несмотря на свою выгоду, низкая температура сырьевой газовой смеси 20 создает препятствие для успешного проведения реакции ОКМ, а именно достижения минимальной температуры, необходимой для загорания или активации катализатора ОКМ 14 для инициирования реакции ОКМ. В зависимости от катализатора ОКМ 14, для достижения загорания и инициирования реакции ОКМ требуется минимальная температура по меньшей мере 450 °С (например, от 450 °С до 700 °С) и более обычно от 500 °С до 700 °С.

[0070] Соответственно, чтобы преодолеть это препятствие, способы и системы настоящего изобретения используют катализатор горения 12 для автотермического нагрева сырьевой газовой смеси 20 внутри реактора ОКМ 10. При контакте с сырьевой газовой смесью 20 катализатор горения 12 способствует сгоранию по меньшей мере части сырьевой газовой смеси 20 с образованием нагретой газовой смеси, имеющей температуру по меньшей мере 450 °С. В некоторых аспектах способов и систем настоящего изобретения при контакте с сырьевой газовой смесью 20 катализатор горения 12 способствует сгоранию по меньшей мере части сырьевой газовой смеси 20 с образованием нагретой газовой смеси, имеющей температуру от 450 °С до 700 °С, включая температуру от 500 °С до 700 °С, от 500 °С до 650 °С, температуру от 500 °С до 600 °С, а также включая температуру от 525 °С до 600 °С. Соответственно, катализатор горения 12 может быть использован для создания разности температур между температурой сырьевой газовой смеси 20 на входе в реактор ОКМ 10 и температурой нагретой газовой смеси от 150 °С до 600 °С, включая разницу температур от 200 °С до 550 °С, от 250 °С до 550 °С, от 300 °С до 500 °С, а также разницу температур от 350 °С до 500 °С.

[0071] Катализатор горения 12 может представлять собой любую каталитическую композицию, известную в настоящее время или в будущем, которая способна сжигать по меньшей мере часть одного или более компонентов сырьевой газовой смеси 20 (например, H_2 , CO , CH_4). В некоторых аспектах способов и систем настоящего изобретения катализатор горения 12 содержит по меньшей мере один из металла, оксида металла или смешанного оксида металла. Примеры металлов, оксидов металлов и смешанных оксидов металлов, подходящих для использования в качестве катализатора горения 12 настоящего изобретения, включают, помимо прочего, платину, оксид платины, хром, оксид хрома (II), оксид хрома (III), оксид хрома (VI), медь, оксид меди

(I), оксид меди (II), оксид меди (III), палладий, оксид палладия (II), кобальт, оксид кобальта (II), оксид кобальта (III), железо, оксид железа (II), оксид железа (III), марганец, оксид марганца (II), оксид марганца (III), золото, оксид золота (III), церий, оксид церия (IV), олово, оксид олова (II), оксид олова (IV), висмут, оксид висмута (III), индий, оксид индия (III), молибден, оксид молибдена (IV), оксид молибдена (VI), сурьму, оксид сурьмы (III), лантан, оксид лантана (III), алюминий, серебро, осмий, вольфрам, свинец, цинк, никель, родий, рутений, таллий, теллур, германий, гадолиний, $\text{V}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, $\text{In}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, $\text{Al}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, $\text{Fe}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, $\text{Cr}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, $\text{La}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, $\text{Ce}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ или их комбинации. В некоторых аспектах катализатор горения 12, используемый в способах и системах настоящего изобретения, может быть в форме рыхлого катализатора, агломерированного катализатора, спеченного катализатора, прессованного катализатора или иным образом сформированного в различные формы, такие как кольца, седла, колеса со спицами, снежинки и т.п., которые обеспечивают высокое отношение площади открытой поверхности к объему. В некоторых аспектах катализатор горения 12, используемый в способах и системах настоящего изобретения, может быть прикреплен, связан или присоединен иным образом к субстрату или подложке, которая может быть или не быть инертной, что обеспечивает структурную прочность и/или форму для катализатора. Примеры субстратов или подложек, к которым катализатор горения 12 может быть прикреплен, связан или присоединен иным образом, включают, помимо прочего, диоксид кремния, оксид алюминия, диоксид титана, диоксид циркония, церий, гафний, кордиерит, карбид кремния, гидроксид алюминия, алюминаты кальция (например, алюминат трикальция, алюминат монокальция) и цеолиты (например, цеолит ZSM-5, цеолит Y, цеолит MCM-41).

[0072] В некоторых аспектах способов и систем по настоящему изобретению катализатор горения 12 избирательно или предпочтительно сжигает H_2 , CO или оба, а не CH_4 . Такой катализатор горения 12 далее именуется «селективным катализатором горения». Селективный катализатор горения может содержать любой один или комбинацию металлов, оксидов металлов или смешанных оксидов металлов, описанных выше, которые селективно или предпочтительно сжигают H_2 , CO или оба, а не CH_4 . В некоторых аспектах способов и систем настоящего изобретения селективный катализатор горения содержит по меньшей мере один из платины, палладия, золота, висмута, олова, платины-золота, платины-олова, оксида палладия (II), рутения, оксида висмута (III), оксида сурьмы (III), оксида индия (III), оксида молибдена (VI), $\text{V}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$,

$\text{In}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, $\text{Al}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, $\text{Fe}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, $\text{Cr}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, $\text{La}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$, $\text{Ce}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ или их комбинации. В некоторых аспектах селективный катализатор горения может быть в форме рыхлого катализатора, агломерированного катализатора, спеченного катализатора, прессованного катализатора или иным образом сформированного в различные формы, такие как кольца, седла, колеса со спицами, снежинки и т.п., которые обеспечивают высокое отношение площади открытой поверхности к объему. В некоторых аспектах селективный катализатор горения может быть прикреплен, связан или присоединен иным образом к субстрату или подложке, которая может быть или не быть инертной, что обеспечивает структурную прочность и/или форму для катализатора. Примеры субстратов или подложек, к которым селективный катализатор горения может быть прикреплен, связан или присоединен иным образом, включают, помимо прочего, диоксид кремния, оксид алюминия, диоксид титана, диоксид циркония, церий, гафний, кордиерит, карбид кремния, гидроксид алюминия, алюминаты кальция (например, алюминат трикальция, алюминат монокальция) и цеолиты (например, цеолит ZSM-5, цеолит Y, цеолит MCM-41).

[0073] При использовании селективного катализатора горения меньше CH_4 в сырьевой газовой смеси 20 расходуется или сгорает при автотермическом повышении температуры сырьевой газовой смеси 20, что приводит к тому, что больше CH_4 становится доступным для участия в реакции ОКМ. В результате селективность реакции ОКМ для превращения CH_4 в соединения C_{2+} (т.е. селективность по C_{2+}) может быть сохранена или улучшена.

[0074] В некоторых аспектах способов и систем настоящего изобретения реакция ОКМ имеет селективность по C_{2+} по меньшей мере 35%, по меньшей мере 40%, по меньшей мере 45%, по меньшей мере 50%, по меньшей мере 55%, по меньшей мере 60%, по меньшей мере 65% или по меньшей мере 70%. В некоторых аспектах способов и систем по настоящему изобретению реакция ОКМ имеет селективность по C_{2+} от 35% до 85%, включая селективность по C_{2+} от 40% до 85%, от 50% до 85%, от 60% до 85%, а также включает селективность по C_{2+} от 70% до 85%.

[0075] В дополнение к катализатору горения 12, реактор ОКМ 10 также включает в себя катализатор ОКМ 14 для облегчения реакции ОКМ с получением выходящего потока ОКМ 40, содержащего соединения C_{2+} , включая C_2H_4 и C_2H_6 , и примеси, отличные от C_{2+} , содержащие один или несколько из CO , CH_4 , H_2 и диоксида углерода

(CO₂). Катализатором ОКМ 14 может быть любая каталитическая композиция, известная сейчас или в будущем, которая облегчает реакцию ОКМ, такая как катализаторы, описанные, например, в патенте США № 8921256, патенте США № 8962517 и патенте США № 9718054, полное описание которых полностью включено в настоящий документ посредством ссылки. В некоторых аспектах катализатор ОКМ 14, используемый в способах и системах настоящего изобретения, может быть в форме рыхлого катализатора, агломерированного катализатора, спеченного катализатора, прессованного катализатора или иным образом сформированного в различные формы, такие как кольца, седла, колеса со спицами, снежинки и т.п., которые обеспечивают высокое отношение площади открытой поверхности к объему. В некоторых аспектах катализатор ОКМ 14 может быть прикреплен, связан или присоединен иным образом к субстрату или подложке, которая может быть или не быть инертной, что обеспечивает структурную прочность и/или форму для катализатора.

[0076] При контакте с нагретой газовой смесью катализатор ОКМ 14 активируется (т.е. обеспечивает загорание) и инициирует реакцию ОКМ с образованием выходящего потока ОКМ 40, содержащего соединения C₂₊, включая C₂H₄ и C₂H₆, и примеси, отличные от C₂₊, содержащие один или несколько из CO, CH₄, H₂ и CO₂. Поскольку реакция ОКМ является экзотермической, температура, при которой осуществляется и/или поддерживается реакция ОКМ, обычно выше, чем температура нагретой газовой смеси, используемой для активации или загорания катализатора ОКМ 14. В некоторых аспектах реакция ОКМ проводится и/или поддерживается при температуре от 450 °C до 950 °C, включая температуру от 500 °C до 950 °C, от 550 °C до 950 °C, от 600 °C до 950 °C, от 650 °C до 950 °C, от 700 °C до 950 °C, от 750 °C до 950 °C, от 800 °C до 950 °C, от 850 °C до 950 °C, а также включая температуру от 875 °C до 925 °C. Выходящий поток ОКМ 40, выходящий из реактора ОКМ 10, обычно имеет температуру, соответствующую температуре реакции ОКМ (т.е. от 450 °C до 950 °C) и может быть направлен в последующие блоки и/или подсистему разделения для дополнительной обработки, как описано в настоящем документе.

[0077] Катализатор горения 12 и катализатор ОКМ 14 могут быть расположены внутри реактора ОКМ 10 различными способами. Например, в некоторых аспектах реактор ОКМ 10 может включать в себя первый слой катализатора, содержащий катализатор горения 12, и второй слой катализатора, содержащий катализатор ОКМ 14,

расположенный после первого слоя катализатора, как проиллюстрировано на ФИГ. 1. В некоторых аспектах реактор ОКМ 10 может включать один слой катализатора, содержащий по меньшей мере один слой катализатора горения 12 и по меньшей мере один слой катализатора ОКМ 14. В некоторых аспектах реактор ОКМ 10 может включать один слой катализатора, который содержит смесь катализатора горения 12 и катализатора ОКМ 14. Реактор ОКМ 10 также может включать один или несколько слоев или засыпок инертного материала (не показано), который может функционировать в качестве физической опоры для катализаторов 12, 14 в слое катализатора. В некоторых аспектах реактор ОКМ 10 может включать первый слой катализатора, содержащий катализатор горения 12 и инертный материал либо в виде одного или нескольких отдельных слоев, либо в виде смеси, и второй слой катализатора, содержащий катализатор ОКМ 14.

[0078] Снова обращаясь к ФИГ. 1, реактор ОКМ 10 может содержать один или несколько температурных элементов 50 для индикации температуры внутри реактора ОКМ 10. Температурный элемент 50 может представлять собой любое подходящее устройство для измерения температуры, включая, помимо прочего, термопару и резисторный датчик температуры (РДТ). Как видно на ФИГ. 1, температурный элемент 50 расположен в катализаторе горения 12 перед катализатором ОКМ 14. Например, если реактор ОКМ 10 включает первый слой катализатора, содержащий катализатор горения 12, и второй слой катализатора, содержащий катализатор ОКМ 14, температурный элемент 50 расположен вблизи конца первого слоя катализатора и перед вторым слоем катализатора. В другом примере, где реактор ОКМ 10 включает в себя один слой катализатора, содержащий слой катализатора горения 12 перед слоем катализатора ОКМ, температурный элемент 50 расположен в слое катализатора горения 12 вблизи границы раздела между слоем катализатора горения 12 и слоем катализатора ОКМ 14. Температурный элемент 50 может использоваться для подачи одного или более сигналов, указывающих температуру нагретой газовой смеси до контакта нагретой газовой смеси с катализатором ОКМ 14. Температурный элемент 50 может быть частью системы управления, предназначенной для поддержания температуры нагретой газовой смеси на желаемом заданном уровне (например, минимальной температуры загорания катализатора ОКМ), например, путем контроля или иного регулирования температуры потока углеводорода 22, потока окислителя 24 или обоих.

[0079] В некоторых аспектах способы и системы настоящего изобретения включают блок колоночного крекинга (КК) 60 для получения олефинов (например, C_2H_4) из алканов (например, C_2H_6 , C_3H_8). Блок КК 60 может быть расположен после реактора ОКМ 10, как показано на ФИГ. 1. Блок КК 60 может представлять собой отдельный реактор или блок КК 60 может быть включен в состав секции реактора ОКМ 10 (например, секция после катализатора ОКМ 14 в том же резервуаре). Поскольку реакция ОКМ является экзотермической и выделяет тепло, тепло, выделяемое реакцией ОКМ, можно использовать для крекинга алканов (например, C_2H_6) до олефинов (например, C_2H_4). Блок КК 60 может выполнять крекинг при температуре от 600 °С до 1000 °С, включая температуру от 700 °С до 1000 °С, от 750 °С до 1000 °С, от 775 °С до 1000 °С, а также включая температуру от 800 °С до 950 °С.

[0080] Блок КК 60 может использоваться для крекинга дополнительных внешних алканов 65 (например, C_2H_6 , C_3H_8), помимо тех, которые содержатся в выходящем потоке ОКМ 40. Теплоемкость в выходящем потоке ОКМ 40 может быть достаточной для крекинга некоторого количества дополнительных внешних алканов 65. Дополнительные внешние алканы 65 могут быть получены из рециркуляционного потока процесса или из совершенно отдельного источника алканов. Внешние алканы 65 могут быть нагреты перед вводом в установку КК 60. Внешние алканы 65 могут быть нагреты, например, посредством теплообмена с реактором ОКМ 10 и/или выходящим потоком ОКМ 40 или другим технологическим потоком. Выходящий поток КК 70 выходит из блока КК 60 и содержит более высокую концентрацию олефинов (например, C_2H_4) и H_2 по сравнению с выходящим потоком ОКМ 40.

[0081] В некоторых аспектах способы и системы настоящего изобретения включают впрыскивание компонента загорания 80 в реактор ОКМ 10. Компонент загорания 80 может представлять собой любое вещество, которое имеет более низкую температуру samozагорания, чем CH_4 , такое как, например, диметиловый эфир или метанол. Компонент загорания 80 может быть подан в реактор ОКМ 10 в качестве дополнительного средства (т.е. посредством сжигания компонента загорания 80) для повышения температуры сырьевой газовой смеси 20. Хотя ФИГ. 1 иллюстрирует компонент загорания 80, впрыскиваемый непосредственно в реактор ОКМ 10, компонент загорания 80 также может быть добавлен к одному или нескольким из сырьевой газовой смеси 20, потока углеводорода 22 или потока окислителя 24.

[0082] Обратимся теперь к ФИГ. 2, где показана система 200 для проведения реакции ОКМ с получением соединений C_{2+} , включая этилен (C_2H_4), в соответствии с настоящим изобретением. Система 200, проиллюстрированная на ФИГ. 2 аналогична системе 100, изображенной на ФИГ. 1 и подобные цифры используются на ФИГ. 2 для идентификации подобных компонентов. Основное различие между системой 200, проиллюстрированной на ФИГ. 2, и системой 100, проиллюстрированной на ФИГ. 1, заключается в том, что реактор ОКМ 10 системы 200 содержит по меньшей мере один источник загорания 16.

[0083] По меньшей мере один источник загорания 16 способствует загоранию компонентов (например, H_2 , CO или обоих) сырьевой газовой смеси 20. Как видно на ФИГ. 2, по меньшей мере один источник загорания 16 находится в контакте с катализатором горения 12 и может обеспечивать локализованное загорание, помогая работе катализатора горения 12 при генерировании нагретой газовой смеси. В некоторых аспектах по меньшей мере один источник загорания 16 содержит по меньшей мере одно из: трубопровод, нагреваемый паром, электрический картриджный нагреватель или другой электронный зажигатель. Источник загорания 16 может работать, обеспечивая достаточную температуру (например, от $400\text{ }^{\circ}C$ до $600\text{ }^{\circ}C$), чтобы вызвать зажигание одного или нескольких компонентов сырьевой газовой смеси 20 в локализованной области катализатора горения 12 в качестве механизма, способствующего катализатору горения 12 активировать горение по меньшей мере части сырьевой газовой смеси 20 с образованием нагретой газовой смеси. В некоторых аспектах по меньшей мере один источник загорания 16 (например, трубопровод, нагреваемый паром, электрический картриджный нагреватель или другой электронный зажигатель) может быть расположен вблизи катализатора горения 12 и перед ним (т.е. не в прямом контакте с катализатором горения 12) для обеспечения локализованного загорания, способствующего работе катализатора горения 12 при выработке нагретой газовой смеси.

[0084] В системе 200, проиллюстрированной на ФИГ. 2, реактор ОКМ 10 может включать температурный элемент 50, расположенный в катализаторе горения 12 перед катализатором ОКМ 14, как описано выше в отношении системы 100, показанной на ФИГ. 1. В системе 200 температурный элемент 50 может быть частью системы управления, предназначенной для поддержания температуры нагретой газовой смеси на

желаемом заданном значении (например, минимальной температуре загорания катализатора ОКМ), например, посредством контроля или иным образом регулируя температуру, локально сообщаемую по меньшей мере одним источником загорания 16 (например, путем регулирования количества энергии, подаваемой на один или более электрических картриджных нагревателей, путем регулирования температуры одного или более трубопроводов, нагреваемых паром). В некоторых аспектах, в дополнение к контролю или иному регулированию температуры, создаваемой по меньшей мере одним источником загорания 16, температура потока углеводород 22, потока окислителя 24 или обоих может контролироваться или иным образом регулироваться для поддержания температуры нагретой газовой смеси до желаемой установки.

[0085] Обратимся теперь к ФИГ. 3, где показана система 300 для проведения реакции ОКМ с получением соединений C_{2+} , включая этилен (C_2H_4), в соответствии с настоящим изобретением. Система 300, проиллюстрированная на ФИГ. 3 аналогична системам 100, 200, изображенным на ФИГ. 1 и 2 и подобные цифры используются на ФИГ. 3 для идентификации подобных компонентов. Основное различие между системой 300, проиллюстрированной на ФИГ. 3, и системой 200, проиллюстрированной на ФИГ. 2 зависит от типа и конфигурации по меньшей мере одного источника загорания 16.

[0086] Как видно на ФИГ. 3, по меньшей мере один источник загорания 16 расположен перед катализатором горения 12 и катализатором ОКМ 14. В системе 300, проиллюстрированной на ФИГ. 3, по меньшей мере один источник загорания 16 содержит инжектор перегретого водяного пара, который впрыскивает перегретый пар при температуре от 600 °С до 1000 °С в реактор ОКМ 10. В некоторых аспектах перегретый пар имеет давление от 400 кПа (манометрическое) до 3000 кПа (манометрическое). В некоторых аспектах способов и систем настоящего изобретения перегретый пар вводят в реактор ОКМ 10 при температуре от 625 °С до 1000 °С, включая температуру от 650 °С до 950 °С, температуру от 675 °С до 900 °С, от 700 °С до 900 °С, а также включая температуру от 750 °С до 850 °С. Впрыск перегретого пара может вызвать загорание одного или нескольких компонентов сырьевой газовой смеси 20, чтобы способствовать работе катализатора горения 12 при создании нагретой газовой смеси. Кроме того, поскольку система 300 включает впрыск перегретого пара в реактор ОКМ 10, не нужен необязательный водяной пар 26, добавляемый к потоку окислителя 24, показанный на ФИГ. 1 и 2.

[0087] В системе 300, проиллюстрированной на ФИГ. 3, реактор ОКМ 10 может включать температурный элемент 50, расположенный в катализаторе горения 12 перед катализатором ОКМ 14, как описано выше в отношении системы 100, 200, показанной на ФИГ. 1 и 2. В системе 300 температурный элемент 50 может быть частью системы управления, предназначенной для поддержания температуры нагретой газовой смеси на желаемом заданном значении (например, минимальной температуре загорания катализатора ОКМ), например, посредством контроля или иного регулирования температуры перегретого пара, впрыскиваемого в реактор ОКМ 10. В некоторых аспектах, помимо контроля или иного регулирования температуры перегретого водяного пара, впрыскиваемого в реактор ОКМ 10, температуры потока углеводорода 22, потока окислителя 24 или обеих могут контролироваться или регулироваться иным образом для поддержания температуры нагретой газовой смеси на желаемом заданном уровне.

[0088] Обратимся теперь к ФИГ. 4, где показана система 400 для проведения реакции ОКМ с получением соединений C_{2+} , включая этилен (C_2H_4), в соответствии с настоящим изобретением. Система 400, проиллюстрированная на ФИГ. 4 аналогична системам 100, 200, 300, изображенным на ФИГ. 1-3 и подобные цифры используются на ФИГ. 4 для идентификации подобных компонентов.

[0089] Как видно на ФИГ. 4, реактор ОКМ 10 включает в себя один слой катализатора 18, который содержит катализатор горения 12 и катализатор ОКМ 14, а также по меньшей мере один источник загорания 16, расположенный в слое катализатора 18. Слой катализатора 18 может быть сконфигурирован таким образом, чтобы по меньшей мере один источник загорания 16 (например, трубопровод, нагреваемый паром, электрический картриджный нагреватель или другой электронный зажигатель) включен в состав катализатора горения 12. Альтернативно, по меньшей мере один источник загорания 16 (например, трубопровод, нагреваемый паром, электрический картриджный нагреватель или другой электронный зажигатель) может быть расположен вблизи и выше слоя катализатора 18 (т.е. не в прямом контакте со слоем катализатора 18). В некоторых аспектах слой катализатора 18 может содержать по меньшей мере один слой катализатора горения 12 и по меньшей мере один слой катализатора ОКМ 14. В некоторых аспектах слой 18 катализатора может содержать смесь катализатора горения 12 и катализатора ОКМ 14.

[0090] В системе 400, проиллюстрированной на ФИГ. 4, реактор ОКМ 10 может включать в себя температурный элемент 50, расположенный в слое катализатора 18. Температурный элемент 50 может быть частью системы управления, предназначенной для поддержания желаемого профиля температуры поперек и/или по всему слою катализатора 18, например, посредством контроля или иным образом регулируя температуру, локально сообщаемую по меньшей мере одним источником загорания 16 (например, путем регулирования количества мощности, подаваемой на один или более электрических картриджных нагревателей, путем регулирования температуры одной или более труб, нагреваемых паром). В некоторых аспектах, в дополнение к контролю или иному регулированию температуры, локально создаваемой по меньшей мере одним источником загорания 16, температура потока углеводород 22, потока окислителя 24 или обоих может контролироваться или иным образом регулироваться для поддержания желаемого температурного профиля поперек и/или по всему слою катализатора 18.

[0091] Обратимся теперь к ФИГ. 5, где показана блок-схема системы 500 для проведения реакции ОКМ с получением соединений C_{2+} , включая этилен (C_2H_4), в соответствии с настоящим изобретением. Система 500 включает подсистему ОКМ 501, дополнительную установку удаления CO_2 502 и подсистему разделения 503. Подсистема ОКМ 501 выполнена с возможностью жидкостного соединения с подсистемой разделения 503 и сконфигурирована для приема сырьевой газовой смеси 510, имеющей температуру ниже или равную $300\text{ }^\circ\text{C}$ и содержит метан (CH_4), кислород (O_2), водород (H_2) и монооксид углерода (CO) и генерирует выходящий поток ОКМ 511, содержащий соединения C_{2+} , включая C_2H_4 и C_2H_6 , и примеси, отличные от C_{2+} , включающие один или более из CO , CO_2 , H_2 и CH_4 . Подсистема разделения 503 расположена после подсистемы ОКМ 501 и выполнена с возможностью жидкостного соединения с подсистемой ОКМ 501 и сконфигурирована для приема выходящего потока ОКМ 511 и разделения выходящего потока ОКМ 511 на по меньшей мере первый поток 513, содержащий CO , H_2 и CH_4 , и второй поток (не показаны), содержащие соединения C_{2+} , включая C_2H_4 и C_2H_6 . Второй поток может быть дополнительно разделен в подсистеме разделения 503 для получения третьего потока 514, содержащего C_2H_4 , и четвертого потока 515, содержащего C_2H_6 .

[0092] В соответствии со способами и системами настоящего изобретения подсистема ОКМ 501 включает в себя реактор ОКМ, содержащий катализатор горения и катализатор

ОКМ. В некоторых аспектах подсистема ОКМ 501 включает в себя реактор ОКМ, содержащий катализатор горения, катализатор ОКМ и блок КК. Реактор ОКМ и блок КК подсистемы ОКМ 501 могут быть сконфигурированы так же, как любой один или несколько реакторов ОКМ 10 и блоков КК 60, ранее описанных в настоящем документе со ссылкой на ФИГ. 1-4.

[0093] Как видно на ФИГ. 5, сырьевая газовая смесь 510 направляется в подсистему ОКМ 501 с получением выходящего потока ОКМ 511, содержащего соединения C_{2+} , включая C_2H_4 и C_2H_6 , и примеси, отличные от C_{2+} , включающие один или несколько из CO , CO_2 , H_2 и CH_4 . Выходящий поток ОКМ 511 может быть направлен в подсистему разделения 503 для разделения выходящего потока ОКМ 511 на по меньшей мере первый поток 513, содержащий CO , H_2 и CH_4 , и второй поток, содержащий соединения C_{2+} , включая C_2H_4 и C_2H_6 . Как видно на ФИГ. 5, первый поток 513, содержащий CO , H_2 и CH_4 или его часть, может быть рециркулирован в подсистему ОКМ 501 для облегчения генерации сырьевой газовой смеси 510. В соответствии с некоторыми аспектами способов и систем настоящего изобретения, по меньшей мере часть первого потока 513 может быть пропущена через поток 516, чтобы предотвратить накопление инертных компонентов (например, N_2) в системе 500. Кроме того, подсистема разделения 503 может разделять второй поток, содержащий соединения C_{2+} , на третий поток 514, содержащий продукт C_2H_4 , и четвертый поток 515, содержащий C_2H_6 . Как показано на ФИГ. 5, четвертый поток 515, содержащий C_2H_6 , может быть направлен в подсистему ОКМ 501 (например, в реактор ОКМ и/или в блок КК) для получения дополнительных C_2H_4 и H_2 путем крекинга C_2H_6 .

[0094] Подсистема разделения 503 может включать любое количество разделительных блоков или использовать любую комбинацию технологий разделения, подходящих для разделения продуктов реакции ОКМ. Например, подсистема разделения 503 может отделять поток ОКМ 511 с помощью криогенной сепарации, адсорбции с переменным давлением, адсорбции с переменным температурным режимом, мембранного разделения, адсорбентов и их комбинаций. Примеры подсистем разделения 503, подходящих для реализации в способах и системах настоящего изобретения, описаны, например, в WO 2014/011646 A1, WO 2013/106771 A2, WO 2015/106023 A1, WO 2017/065947 A1 и WO 2018/118105 A1, полные описания которых включены в настоящий документ посредством ссылки во всей своей полноте.

[0095] Как видно на ФИГ. 5, в соответствии с некоторыми аспектами способов и систем настоящего изобретения система 500 содержит блок удаления CO_2 502, выполненный с возможностью жидкостного соединения с подсистемой ОКМ 501 и подсистемой разделения 503. Блок удаления CO_2 502 сконфигурирован для удаления CO_2 из выходящего потока ОКМ 511 через поток 512 и направления выходящего потока ОКМ, практически не содержащего CO_2 , в подсистему разделения 503. Блок удаления CO_2 502 может включать любую известную технологию, подходящую для удаления CO_2 из технологического потока. Примеры подходящих технологий удаления CO_2 включают, помимо прочего, систему аминного абсорбера, адсорбцию при переменном давлении, адсорбцию при переменной температуре, мембранное разделение, разделение растворителей и криогенное разделение.

[0096] Хотя ФИГ. 5 иллюстрирует блок удаления CO_2 502, расположенный после подсистемы ОКМ 501 и перед подсистемой разделения 503, предполагается, что CO_2 , содержащийся в выходящем потоке ОКМ 501, может быть удален через подсистему разделения 503, тем самым устраняя необходимость в блоке удалении CO_2 502. Такое расположение было бы особенно подходящим в системах, где подсистема разделения 503 основана на адсорбционной технологии.

[0097] В соответствии с некоторыми аспектами способов и систем настоящего изобретения система 500 содержит смесительное устройство 504, выполненное с возможностью жидкостного соединения с подсистемой ОКМ 501 и с подсистемой разделения 503, как показано на ФИГ. 5. Смесительное устройство 504 способствует формированию сырьевой газовой смеси 510, которая направляется в подсистему ОКМ 501. Как видно на ФИГ. 5, смесительное устройство 504 принимает поток углеводорода, который включает по меньшей мере часть первого потока 513 из подсистемы разделения 503, и поток окислителя 518, содержащий кислород. В некоторых аспектах способов и систем настоящего изобретения поток метана или природного газа 517 может быть добавлен к первому потоку 513 для формирования потока углеводорода, который направляется в смесительное устройство 504. В некоторых аспектах способов и систем настоящего изобретения поток окислителя 518 обеспечивается потоком воздуха или потоком O_2 , который генерируется, например, с помощью установки разделения воздуха, мембраны или установки электролиза воды. В некоторых аспектах способов и систем настоящего изобретения поток окислителя 518 дополнительно содержит водяной

пар, который можно впрыскивать или иным образом добавляться в поток окислителя 518 по линии 519. Смесительным устройством 504 может быть любое известное устройство, подходящее для смешивания друг с другом первого газового потока, содержащего углеводород, и второго газового потока, содержащего кислород, такое как, например, смесительное устройство, описанное в патенте США № 3706534. В некоторых аспектах смесительное устройство 504 содержит технологический трубопровод или смесительный тройник.

[0098] Сырьевая газовая смесь 510 имеет температуру менее или равную 300 °С при выходе из смесительного устройства 504 и входе во вход реактора ОКМ подсистемы ОКМ 501. В некоторых аспектах сырьевая газовая смесь 510 имеет температуру от 15 °С до 300 °С на входе в реактор ОКМ 10, включая температуру от 50 °С до 300 °С, от 100 °С до 300 °С, от 100 °С до 250 °С, от 100 °С до 225 °С, от 100 до 200 °С, от 100 до 175 °С, от 100 до 150 °С, от 100 до 125 °С, от 125 до 300 °С, от 150 до 300 °С, от 175 °С до 300 °С, от 200 °С до 300 °С, от 225 °С до 300 °С, от 250 °С до 300 °С, а также включая температуру от 275 °С до 300 °С на входе реактора ОКМ 10. В некоторых аспектах поток углеводорода, направляемый в смесительное устройство 504, имеет температуру менее или равную 300 °С, включая температуру от 15 °С до 300 °С, от 25 °С до 300 °С, от 50 до 300 °С, от 75 до 300 °С, от 100 до 300 °С, от 125 до 250 °С, от 150 до 225 °С, от 175 до 200 °С, от 15 °С до 250 °С, от 15 °С до 200 °С, от 15 °С до 150 °С, от 15 °С до 100 °С, от 15 °С до 75 °С, а также включая температуру от 15 °С до 50 °С. В некоторых аспектах поток окислителя 518, направляемый в смесительное устройство 504, имеет температуру от 0 °С до 250 °С, включая температуру от 10 °С до 250 °С, от 20 °С до 250 °С, от 30 °С до 200 °С, от 30 °С до 150 °С, от 30 °С до 100 °С, от 30 °С до 50 °С, от 40 °С до 250 °С, от 100 °С до 250 °С, от 150 °С до 250 °С, от 200 °С до 250 °С, а также включая температуру от 0 °С до 50 °С.

[0099] Первый поток 513 из подсистемы разделения 503, который содержит СО и Н₂ (т.е. побочные продукты реакции ОКМ), а также СН₄, может обеспечивать реагенты (кроме О₂) в сырьевой газовой смеси 510, которая контактирует с катализатором горения и реагирует/сгорает с образованием нагретой газовой смеси, имеющей температуру по меньшей мере 450 °С, причем эта нагретая газовая смесь затем контактирует с катализатором ОКМ, чтобы инициировать реакцию ОКМ и производить выходящий поток ОКМ 511. Соответственно, по меньшей мере часть побочных продуктов Н₂ и СО,

образующиеся в реакции ОКМ, может быть рециркулирована в реактор ОКМ подсистемы ОКМ 501 в качестве реагентов, которые контактируют с катализатором горения для аутотермического нагрева сырьевой газовой смеси 510 внутри реактора ОКМ и тем самым генерирования нагретой газовой смеси, которая контактирует с катализатором горения ОКМ для инициирования реакции ОКМ и получения соединений C_{2+} .

[00100] Хотя это не показано на ФИГ. 5, предполагается, что компонент загорания, как описано ранее, может быть введен в реактор ОКМ подсистемы ОКМ 501. Кроме того, предполагается, что может быть добавлен поток, содержащий H_2 , CO или оба (например, синтез-газ) к потоку углеводорода, который направляется в смесительное устройство 504 для формирования сырьевой газовой смеси 510.

[00101] Ссылаясь теперь на ФИГ. 6, где показана блок-схема другого варианта реализации системы 600 для проведения реакции ОКМ с получением соединений C_{2+} , включая этилен (C_2H_4), в соответствии с настоящим изобретением. Подобно системе 500, проиллюстрированной на ФИГ. 5, система 600 содержит подсистему ОКМ 601 и подсистему разделения (не пронумерована). Кроме того, система 600 включает в себя подсистему метанирования 605. Подсистема ОКМ 601 выполнена с возможностью жидкостного соединения с подсистемой разделения и с системой метанирования 605 и выполнена с возможностью приема сырьевой газовой смеси 610, имеющей температуру менее или равную $300\text{ }^\circ\text{C}$, которая содержит метан (CH_4), кислород (O_2), водород (H_2) и монооксид углерода (CO), и образования выходящего потока ОКМ 611, содержащего соединения C_{2+} , включая C_2H_4 и C_2H_6 , и примеси, отличные от C_{2+} , содержащие один или несколько из CO , CO_2 , H_2 и CH_4 .

[00102] В соответствии со способами и системами настоящего изобретения подсистема ОКМ 601 включает в себя реактор ОКМ, содержащий катализатор горения и катализатор ОКМ. В некоторых аспектах подсистема ОКМ 601 включает в себя реактор ОКМ, содержащий катализатор горения, катализатор ОКМ и блок КК. Реактор ОКМ и блок КК подсистемы ОКМ 601 могут быть сконфигурированы так же, как любой один или несколько реакторов ОКМ 10 и блоков КК 60, ранее описанных в настоящем документе со ссылкой на ФИГ. 1-4.

[00103] Как видно на ФИГ. 6, сырьевая газовая смесь 610 направляется в подсистему ОКМ 601 с образованием выходящего потока ОКМ 611, содержащего соединения C_{2+} , включая C_2H_4 и C_2H_6 , и примеси, отличные от C_{2+} , включающие один или несколько из CO , CO_2 , H_2 и CH_4 . Выходящий поток ОКМ 611 может быть направлен в один или несколько теплообменников 602 для передачи тепла от выходящего потока ОКМ 611 технологическому потоку и тем самым охлаждения выходящего потока ОКМ 611. В некоторых аспектах один или несколько теплообменников могут представлять собой теплоутилизационный парогенератор (ТУПГ), который генерирует пар, который можно использовать для отопления, выработки электроэнергии с помощью газовой турбины или для других процессов.

[00104] Снова обращаясь к ФИГ. 6, после прохождения через один или несколько теплообменников 602 выходящий поток ОКМ 611 может быть направлен в компрессор технологического газа 603 для повышения давления выходящего потока ОКМ 611 до желаемого или подходящего давления, такого как по меньшей мере 600 кПа (манометрическое), по меньшей мере 800 кПа (манометрическое), по меньшей мере 1000 кПа (манометрическое), по меньшей мере 1200 кПа (манометрическое), по меньшей мере 1500 кПа (манометрическое), по меньшей мере 1750 кПа (манометрическое) или по меньшей мере 2000 кПа (манометрическое). В некоторых аспектах способов и систем настоящего изобретения поток природного газа 612 может быть добавлен к выходящему потоку ОКМ 611 перед входом в компрессор технологического газа 603. Сжатый выходящий поток ОКМ 611 может быть направлен в блок удаления CO_2 604 для удаления CO_2 из выходящего потока ОКМ 611. По меньшей мере часть удаленного CO_2 может быть направлена в подсистему метанирования 605 через поток 613. В соответствии с некоторыми аспектами способов и систем настоящего изобретения весь CO_2 , удаленный с помощью блока удаления CO_2 604 направляется в подсистему метанирования 605 через поток 613. Блок удаления CO_2 604 может быть сконфигурирован так же, как блок удаления CO_2 502, описанный выше. Выходящий поток ОКМ 611, по существу, не содержащий CO_2 , может быть направлен в сушилку технологического газа 606 для удаления H_2O из выходящего потока ОКМ 611, практически не содержащего CO_2 . Осушитель технологического газа 606 может представлять собой одну или несколько сушилок с молекулярными ситами или сепараторов, которые удаляют H_2O (либо в виде пара, либо в виде жидкости) из потока ОКМ 611, практически не содержащего CO_2 .

[00105] Хотя ФИГ. 6 иллюстрирует блок удаления CO_2 604, расположенный после подсистемы ОКМ 601 и перед подсистемой разделения, предполагается, что CO_2 , содержащийся в выходящем потоке ОКМ 611, может быть удален через подсистему разделения, тем самым устраняя необходимость в блоке удаления CO_2 604. Такое расположение было бы особенно подходящим в системах, где подсистема разделения основана на адсорбционной технологии.

[00106] Снова обращаясь к ФИГ. 6, после выхода из осушителя технологического газа 606 по существу сухой, практически не содержащий CO_2 выходящий поток ОКМ 611 может быть направлен в подсистему разделения, которая находится ниже по потоку и выполнена с возможностью жидкостного соединения с подсистемой ОКМ 601 и которая включает по меньшей мере блок деметанирования 607 и блок очистки C_2 608. Блок деметанирования 607 выполнен с возможностью жидкостного соединения с системой метанирования 605 и с блоком очистки C_2 608, как показано на ФИГ. 6. Блок деметанирования 607 сконфигурирован для приема выходящего потока ОКМ 611 для разделения выходящего потока ОКМ на первый поток 614, содержащий CO , H_2 и CH_4 , и второй поток 615, содержащий соединения C_{2+} , включая C_2H_4 и C_2H_6 . По меньшей мере часть первого потока 614 рециркулируется в подсистему ОКМ 601 для облегчения генерации сырьевой газовой смеси 510. В соответствии с некоторыми аспектами способов и систем настоящего изобретения по меньшей мере часть первого потока 614 направляется из установки деметанирования 607 в подсистему метанирования 605 для образования выходящего потока метанирования 617, содержащего CH_4 . В соответствии с некоторыми аспектами способов и систем настоящего изобретения по меньшей мере часть первого потока 614 продувается через линию 616, чтобы предотвратить накопление инертных компонентов (например, N_2) в системе 600.

[00107] Подсистема метанирования 605 может включать один или несколько реакторов метанирования, которые содержат катализатор метанирования (например, катализатор на основе никеля, катализатор на основе рутения) для проведения реакции метанирования с получением CH_4 . Типичные условия эксплуатации реактора метанирования могут быть при давлении от 100 кПа до 5000 кПа и температуре от 150 °C до 400 °C. В подсистеме метанирования 605 оксиды углерода (например, CO_2 , CO или оба) из потоков 613 и 614 реагируют с H_2 (например, H_2 , содержащимся в потоке 614) с образованием выходящего потока метанирования 617, содержащего CH_4 ,

посредством следующих реакций: i) $\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$ и ii) $\text{CO} + 3 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$.

[00108] В соответствии с некоторыми аспектами способов и систем настоящего изобретения система 600 содержит смесительное устройство 609, выполненное с возможностью жидкостного соединения с подсистемой ОКМ 601, подсистемой разделения (например, через установку деметанирования 607) и подсистемой метанирования 605, как показано на ФИГ. 6. Смесительное устройство 609 способствует формированию сырьевой газовой смеси 610, которая направляется в подсистему ОКМ 601. Как видно на ФИГ. 6, смесительное устройство 609 принимает поток окислителя 518, содержащий поток кислорода и углеводорода, который включает по меньшей мере часть первого потока 614 из установки деметанирования 607 и выходящий поток метанирования 617. В некоторых аспектах способов и систем настоящего изобретения необязательный поток метана или природного газа 619 может быть добавлен к первому потоку 614 вместе с выходящим потоком метанирования 617 для формирования потока углеводорода, который направляется в смесительное устройство 609. В некоторых аспектах способов и систем настоящего изобретения, поток окислителя 618 обеспечивается потоком воздуха или потоком O_2 , который генерируется установкой разделения воздуха. В некоторых аспектах способов и систем настоящего изобретения поток окислителя 618 дополнительно содержит водяной пар, который можно впрыскивать или иным образом добавлять в поток окислителя 618 через линию 620. Смесительным устройством 609 может быть любое известное устройство, подходящее для смешивания друг с другом первого газового потока, содержащего углеводороды, и второго газового потока, содержащего кислород, такой как, например, смесительное устройство, описанное в патенте США № 3706534. В некоторых аспектах смесительное устройство 609 содержит технологический трубопровод или смесительный тройник.

[00109] Сырьевая газовая смесь 610 имеет температуру менее или равную $300\text{ }^\circ\text{C}$ при выходе из смесительного устройства 609 и вводе во вход реактора ОКМ подсистемы ОКМ 601. В некоторых аспектах сырьевая газовая смесь 610 имеет температуру от $15\text{ }^\circ\text{C}$ до $300\text{ }^\circ\text{C}$ на входе в реактор ОКМ 10, включая температуру от $50\text{ }^\circ\text{C}$ до $300\text{ }^\circ\text{C}$, от $100\text{ }^\circ\text{C}$ до $300\text{ }^\circ\text{C}$, от $100\text{ }^\circ\text{C}$ до $250\text{ }^\circ\text{C}$, от $100\text{ }^\circ\text{C}$ до $225\text{ }^\circ\text{C}$, от $100\text{ }^\circ\text{C}$ до $200\text{ }^\circ\text{C}$, от $100\text{ }^\circ\text{C}$ до $175\text{ }^\circ\text{C}$, от $100\text{ }^\circ\text{C}$ до $150\text{ }^\circ\text{C}$, от $100\text{ }^\circ\text{C}$ до $125\text{ }^\circ\text{C}$, от $125\text{ }^\circ\text{C}$ до $300\text{ }^\circ\text{C}$, от $150\text{ }^\circ\text{C}$ до $300\text{ }^\circ\text{C}$, от $175\text{ }^\circ\text{C}$ до $300\text{ }^\circ\text{C}$, от $200\text{ }^\circ\text{C}$ до $300\text{ }^\circ\text{C}$, от $225\text{ }^\circ\text{C}$ до $300\text{ }^\circ\text{C}$, от $250\text{ }^\circ\text{C}$ до $300\text{ }^\circ\text{C}$, а

также включая температуру от 275 °С до 300 °С на входе реактора ОКМ 10. В некоторых аспектах поток углеводорода, направляемый в смесительное устройство 609, имеет температуру менее или равную 300 °С, включая температуру от 15 °С до 300 °С, от 25 °С до 300 °С, от 50 °С до 300 °С, от 75 °С до 300 °С, от 100 °С до 300 °С, от 125 °С до 250 °С, от 150 °С до 225 °С, от 175 °С до 200 °С, от 15 °С до 250 °С, от 15 °С до 200 °С, от 15 °С до 150 °С, от 15 °С до 100 °С, от 15 °С до 75 °С, а также включая температуру от 15 °С до 50 °С. В некоторых аспектах поток окислителя 618, направляемый в смесительное устройство 609, имеет температуру от 0 °С до 250 °С, включая температуру от 10 °С до 250 °С, от 20 °С до 250 °С, от 30 °С до 200 °С, от 30 °С до 150 °С, от 30 °С до 100 °С, от 30 °С до 50 °С, от 40 °С до 250 °С, от 100 °С до 250 °С, от 150 °С до 250 °С, от 200 °С до 250 °С, а также включая температуру от 0 °С до 50 °С.

[00110] Первый поток 614 из блока деметанирования 607, который содержит СО и Н₂ (т.е. побочные продукты реакции ОКМ), а также СН₄, может обеспечивать реагенты (кроме О₂) в сырьевой газовой смеси 610, которая контактирует с катализатором горения и реагирует/сгорает с образованием нагретой газовой смеси, имеющей температуру по меньшей мере 450 °С, причем эта нагретая газовая смесь затем контактирует с катализатором ОКМ, чтобы инициировать реакцию ОКМ и образовать поток ОКМ 611. Соответственно, по меньшей мере часть побочных продуктов Н₂ и СО, образующихся в реакции ОКМ, могут быть рециркулированы в реактор ОКМ подсистемы ОКМ 601 в качестве реагентов, которые контактируют с катализатором горения для аутотермического нагрева сырьевой газовой смеси 610 внутри реактора ОКМ и тем самым образование нагретой газовой смеси, которая контактирует с катализатором ОКМ для инициирования реакции ОКМ и образования соединений С₂₊.

[00111] Хотя это не показано на ФИГ. 6, предполагается, что компонент загорания, как описано ранее, может быть введен в реактор ОКМ подсистемы ОКМ 601. Кроме того, предполагается, что может быть добавлен поток, содержащий Н₂, СО или оба (например, синтез-газ) к потоку углеводорода, который направляется в смесительное устройство 609 для формирования сырьевой газовой смеси 610.

[00112] Снова обращаясь к ФИГ. 6, второй поток 615, содержащий соединения С₂₊, включая С₂Н₄ и С₂Н₆, может быть направлен в блок очистки С₂ 608. Блок очистки С₂ 608 выполнен с возможностью жидкостного соединения с подсистемой ОКМ 601 и выполнен с возможностью приема второго потока 615 и разделения второго потока 615

на по меньшей мере третий поток 621, содержащий C_2H_4 , и четвертый поток 622, содержащий C_2H_6 . Третий поток 621, содержащий C_2H_4 , может быть собран или направлен в последующий процесс, в котором в качестве сырья используется C_2H_4 . Как видно на ФИГ. 6, четвертый поток 622, содержащий C_2H_6 , может быть рециркулирован в подсистему ОКМ 601 (например, в реактор ОКМ или в блок КК) для получения дополнительных C_2H_4 и H_2 путем крекинга C_2H_6 . В некоторых аспектах способов и систем настоящего изобретения установка очистки C_2 608 может включать блок деэтанирования (не показан), который способен отделять соединения C_2 (например, этан и этилен) от соединений C_{3+} (например, пропан, пропилен, бутан, бутен). Выделенные соединения C_{3+} могут покидать блок деэтанирования по потоку 623 и подвергаться дополнительной последующей переработке. Соединения C_2 из блока деэтанирования можно направить в сплиттер C_2 (не показан), который может отделить C_2H_6 от C_2H_4 . Разделитель C_2 может представлять собой дистилляционную колонну.

[00113] Все ссылки на характеристики или ограничения настоящего изобретения в единственном числе должны включать соответствующую характеристику или ограничение во множественном числе, и наоборот, если иное не указано или явно не подразумевается контекстом, в котором сделана ссылка.

[00114] Все комбинации способов или стадий процесса, используемые в настоящем документе, могут быть выполнены в любом порядке, если не указано иное или явно не подразумевается обратное контекстом, в котором создается указанная комбинация.

[00115] Все диапазоны и параметры, включая, помимо прочего, проценты, части и соотношения, раскрытые в настоящем документе, понимаются как охватывающие любые и все поддиапазоны, предполагаемые и включенные в него, и каждое число между конечными точками. Например, заявленный диапазон «от 1 до 10» следует рассматривать как включающий все без исключения поддиапазоны между (включительно) минимальным значением 1 и максимальным значением 10; то есть все поддиапазоны, начинающиеся с минимального значения 1 или более (например, от 1 до 6,1) и заканчивающиеся максимальным значением 10 или меньше (например, от 2,3 до 9,4, от 3 до 8, от 4 до 7) и, наконец, к каждому числу 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 и 10, содержащемуся в диапазоне.

[00116] Способы и системы настоящего изобретения могут включать, состоять или, по существу, состоять из существенных элементов и ограничений изобретения, как описано в настоящем документе, а также любых дополнительных или необязательных компонентов или признаков, описанных в настоящем документе или иным образом известных как полезные при переработке углеводов или нефтехимии, включая окислительную конденсацию метана.

[00117] В той степени, в которой термины «включает» или «включающий» используются в описании или формуле изобретения, они предназначены для включения в суть, аналогично термину «содержащий», поскольку этот термин интерпретируется при использовании в качестве переходного слова в формуле изобретения. Кроме того, в той степени, в которой используется термин «или» (например, А или В), он означает «А или В, или и А, и В». Если заявитель намеревается указать «только А или В, но не то и другое», тогда будет использоваться термин «только А или В, но не оба». Таким образом, использование термина «или» в настоящем документе является включающим, а не исключительным. Более того, фразу «по меньшей мере один из А, В и С» следует интерпретировать как «только А, или только В, или только С, или любые их комбинации». В настоящем описании единственное число следует понимать как включающее как единственное, так и множественное число. И наоборот, любая ссылка на элементы во множественном числе должна, где это уместно, включать единственное число.

[00118] В соответствии с настоящим изобретением можно использовать различные концепции изобретения в комбинации друг с другом. Кроме того, любой конкретный признак, указанный как относящийся к конкретно раскрытому аспекту способов и систем настоящего изобретения, должен интерпретироваться как доступный для использования со всеми раскрытыми аспектами способов и систем настоящего изобретения, если только включение конкретного признака не будет противоречить явным условиям раскрытого аспекта. Дополнительные преимущества и модификации будут очевидны специалистам в данной области техники. Следовательно, изобретение в его более широких аспектах не ограничивается конкретными подробностями, представленными в нем, репрезентативным устройством или показанными и описанными иллюстративными примерами. Соответственно, от таких деталей можно

делать отступления, не выходя за пределы сущности или объема общих концепций изобретения.

[00119] Объем общих концепций изобретения, представленных в настоящем документе, не предназначен для ограничения конкретными примерными аспектами, показанными и описанными в настоящем изобретении. Из приведенного описания специалисты в данной области техники не только поймут общие концепции изобретения и сопутствующие им преимущества, но также обнаружат очевидные различные изменения и модификации раскрытых устройств, систем и способов. Поэтому стремятся охватить все такие изменения и модификации, которые входят в дух и объем общих концепций изобретения, описанных и/или заявленных в настоящем изобретении, и любых их эквивалентов.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ проведения реакции окислительной конденсации метана (ОКМ) с получением соединений C_{2+} , включающий:
 - (а) введение сырьевой газовой смеси, содержащей метан (CH_4), кислород (O_2), водород (H_2) и монооксид углерода (CO) и имеющей температуру менее или равную $300\text{ }^\circ C$, на вход в реактор ОКМ, где реактор ОКМ содержит катализатор горения и катализатор ОКМ;
 - (б) приведение в контакт катализатора горения с сырьевой газовой смесью для сжигания по меньшей мере части сырьевой газовой смеси и образования нагретой газовой смеси, имеющей температуру по меньшей мере $450\text{ }^\circ C$; и
 - (в) приведение в контакт катализатора ОКМ с нагретой газовой смесью для инициирования реакции ОКМ и получения выходящего потока ОКМ, содержащего (i) соединения C_{2+} , включая этилен и этан, и (ii) примеси, отличные от C_{2+} , содержащие один или несколько из CO , CH_4 , H_2 и диоксида углерода (CO_2).
2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что катализатор горения содержит металл, оксид металла или смешанный оксид металла, при этом металл, оксид металла или смешанный оксид металла содержит по меньшей мере один из платины, хрома, меди, палладия, кобальта, железа, марганца, золота, церия, висмута, индия, молибдена, родия, рутения, германия, гадолиния, сурьмы, таллия, теллура, свинца, цинка или олова.
3. Способ по п. 1, отличающийся тем, что сырьевая газовая смесь имеет температуру от $15\text{ }^\circ C$ до $250\text{ }^\circ C$ на входе в реактор ОКМ.
4. Способ по п. 1, отличающийся тем, что реактор ОКМ дополнительно содержит по меньшей мере один источник загорания, при этом по меньшей мере один источник загорания способствует загоранию компонентов сырьевой газовой смеси.
5. Способ по п. 4, отличающийся тем, что по меньшей мере один источник загорания находится в контакте с катализатором горения и содержит по меньшей мере один из: электрический картриджный нагреватель или трубопровод, нагреваемый паром.

6. Способ по п. 4, отличающийся тем, что по меньшей мере один источник загорания расположен перед катализатором горения и катализатором ОКМ и включает впрыск перегретого пара при температуре от 600 °С до 1000 °С.
7. Способ по п. 1, отличающийся тем, что реакция ОКМ имеет селективность по отношению к соединениям C_{2+} по меньшей мере 35%.
8. Способ по любому из пп. 1-7, отличающийся тем, что катализатор горения предпочтительно сжигает H_2 , CO или оба, а не CH_4 .
9. Способ проведения реакции окислительной конденсации метана (ОКМ) с получением соединений C_{2+} , включающий:
 - (а) смешивание потока окислителя, содержащего кислород (O_2), имеющего температуру от 0 °С до 50 °С, с потоком углеводорода, содержащего метан (CH_4), монооксид углерода (CO) и водород (H_2), имеющим температуру менее или равную 300 °С с образованием сырьевой газовой смеси, имеющей температуру менее или равную 300 °С;
 - (б) введение сырьевой газовой смеси на вход реактора ОКМ, причем реактор ОКМ содержит катализатор горения и катализатор ОКМ;
 - (в) приведение в контакт катализатора горения с сырьевой газовой смесью для сжигания по меньшей мере части сырьевой газовой смеси и образования нагретой газовой смеси, имеющей температуру по меньшей мере 450 °С; и
 - (г) приведение в контакт катализатора ОКМ с нагретой газовой смесью с иницированием реакции ОКМ и получением выходящего потока ОКМ, содержащего (i) соединения C_{2+} , включая этилен и этан, и (ii) примеси, отличные от C_{2+} , содержащие один или несколько из CO , CH_4 , H_2 и диоксида углерода (CO_2).
10. Способ по п. 9, отличающийся тем, что поток окислителя дополнительно содержит водяной пар.
11. Способ по п. 9, отличающийся тем, что катализатор горения содержит металл, оксид металла или смешанный оксид металла, при этом металл, оксид металла или смешанный оксид металла содержит по меньшей мере один из платины, хрома, меди, палладия, кобальта, железа, марганца, золота, церия, висмута, индия, молибдена,

родия, рутения, германия, гадолия, сурьмы, таллия, теллура, свинца, цинка или олова.

12. Способ по п. 9, отличающийся тем, что сырьевая газовая смесь имеет температуру от 15 °С до 250 °С на входе в реактор ОКМ.

13. Способ по п. 9, отличающийся тем, что реактор ОКМ дополнительно содержит по меньшей мере один источник загорания, при этом по меньшей мере один источник загорания способствует загоранию компонентов сырьевой газовой смеси.

14. Способ по п. 13, отличающийся тем, что по меньшей мере один источник загорания находится в контакте с катализатором горения и содержит по меньшей мере один из: электрический картриджный нагреватель или трубопровод, нагреваемый паром.

15. Способ по п. 13, отличающийся тем, что по меньшей мере один источник загорания расположен перед катализатором горения и катализатором ОКМ и включает впрыск перегретого водяного пара при температуре от 600 °С до 1000 °С.

16. Способ по п. 9, отличающийся тем, что реакция ОКМ имеет селективность в отношении соединений C_{2+} по меньшей мере 35%.

17. Способ по любому из пп. 9-16, отличающийся тем, что катализатор горения предпочтительно сжигает H_2 , CO или оба, а не CH_4 .

18. Система для проведения реакции окислительной конденсации метана (ОКМ) с получением соединений C_{2+} , содержащая:

реактор ОКМ, содержащий катализатор горения и катализатор ОКМ,

при этом в реактор ОКМ подается сырьевая газовая смесь, содержащая метан (CH_4), кислород (O_2), водород (H_2) и монооксид углерода (CO) при температуре менее или равной $300\text{ }^\circ\text{C}$,

при этом катализатор горения способствует сгоранию по меньшей мере части сырьевой газовой смеси с образованием нагретой газовой смеси, имеющей температуру по меньшей мере $450\text{ }^\circ\text{C}$, и

при этом катализатор ОКМ инициирует реакцию ОКМ при контакте с нагретой газовой смесью и производит выходящий поток ОКМ, содержащий (i) соединения C_{2+} , включая этилен и этан, и (ii) примеси, отличные от C_{2+} , содержащие один или несколько из CO , CH_4 , H_2 и углекислого газа (CO_2).

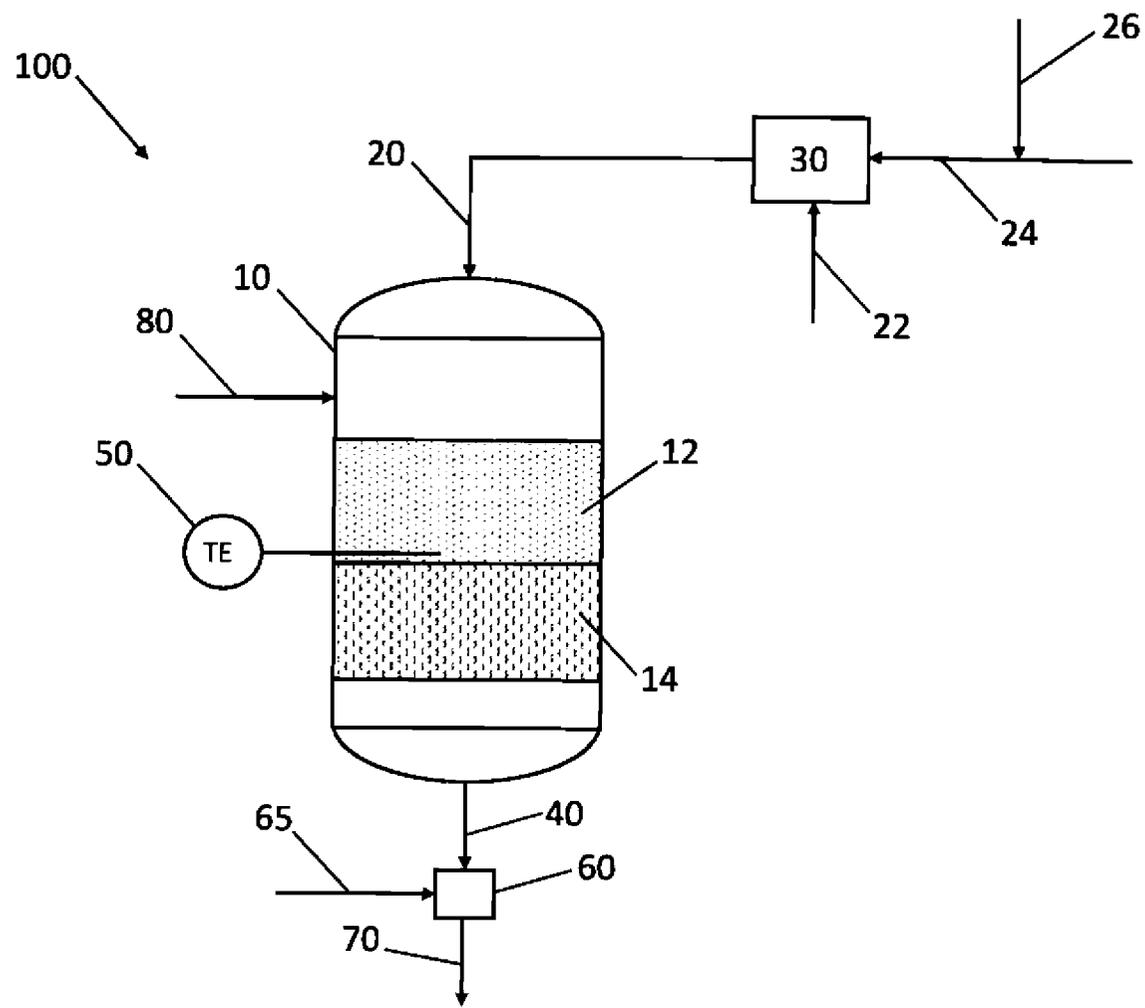
19. Система по п. 18, отличающаяся тем, что катализатор горения содержит металл, оксид металла или смешанный оксид металла, причем металл, оксид металла или смешанный оксид металла содержит по меньшей мере один из платины, хрома, меди, палладия, кобальта, железа, марганца, золота, церия, висмута, индия, молибдена, родия, рутения, германия, гадолиния, сурьмы, таллия, теллура, свинца, цинка или олова.

20. Система по п. 18, отличающаяся тем, что реактор ОКМ дополнительно содержит по меньшей мере один источник загорания, при этом по меньшей мере один источник загорания способствует загоранию компонентов сырьевой газовой смеси.

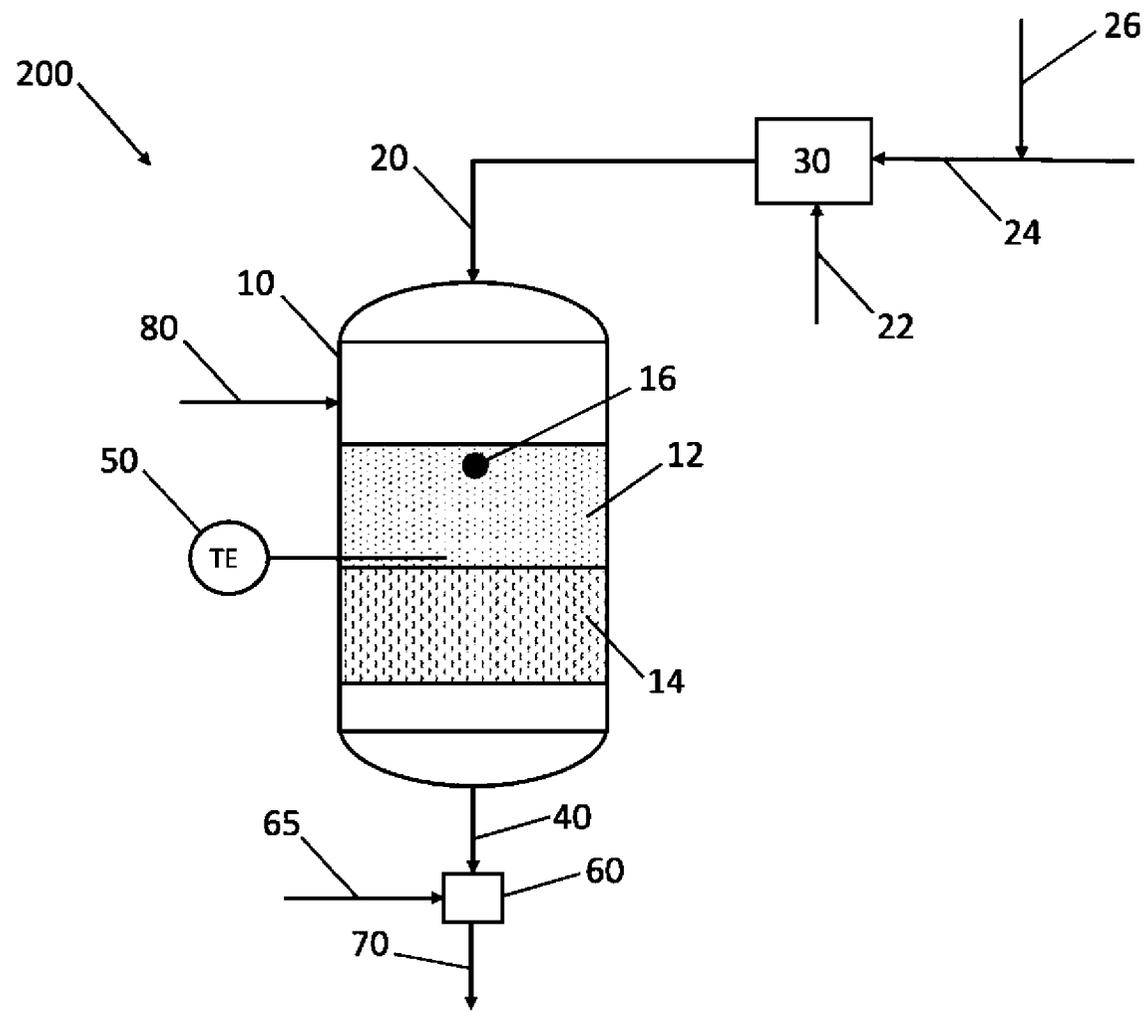
21. Система по п. 20, отличающаяся тем, что по меньшей мере один источник загорания находится в контакте с катализатором горения и содержит по меньшей мере один из: электрический картриджный нагреватель или трубопровод, нагреваемый паром.

22. Система по п. 20, отличающаяся тем, что по меньшей мере один источник загорания расположен перед катализатором горения и катализатором ОКМ и содержит инжектор перегретого водяного пара, который впрыскивает пар при температуре от $600\text{ }^\circ\text{C}$ до $1000\text{ }^\circ\text{C}$ в реактор ОКМ.

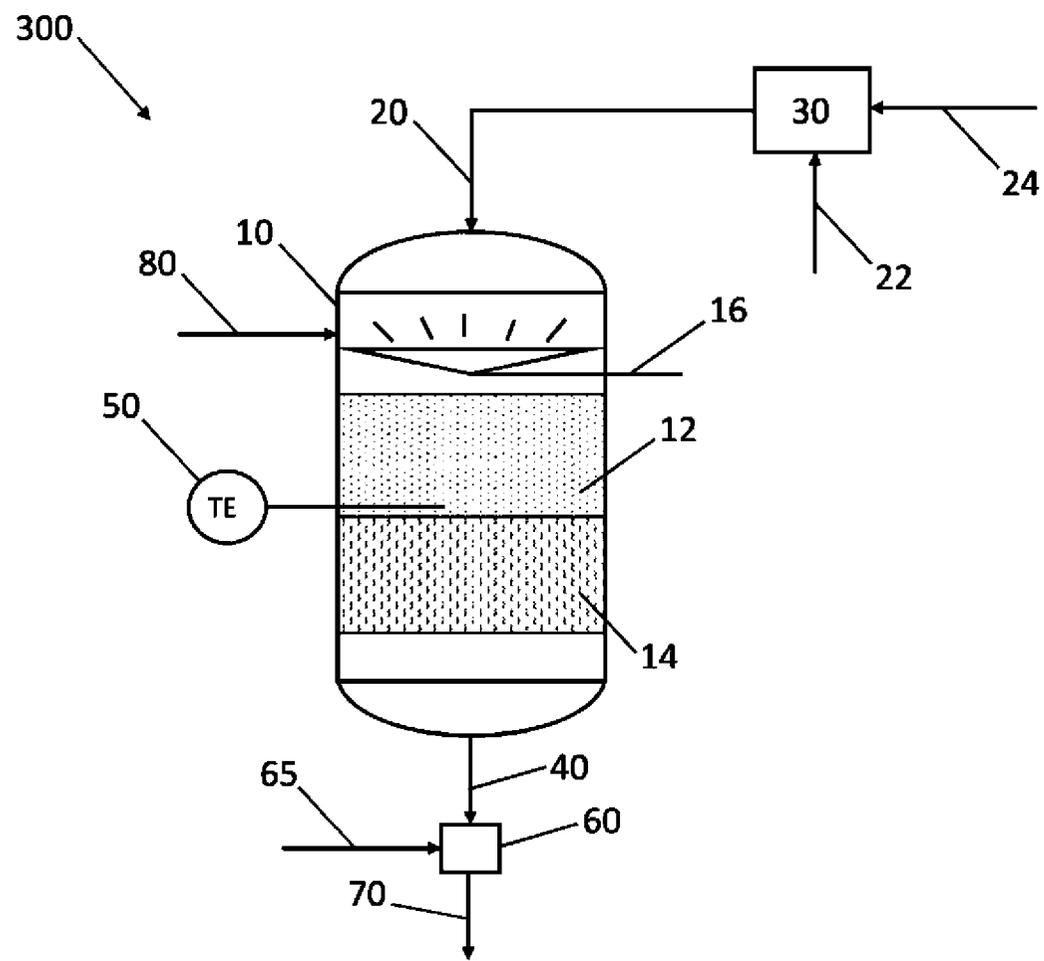
23. Система по любому из пп. 18-22, отличающаяся тем, что катализатор горения предпочтительно сжигает H_2 , CO или оба, а не CH_4 .



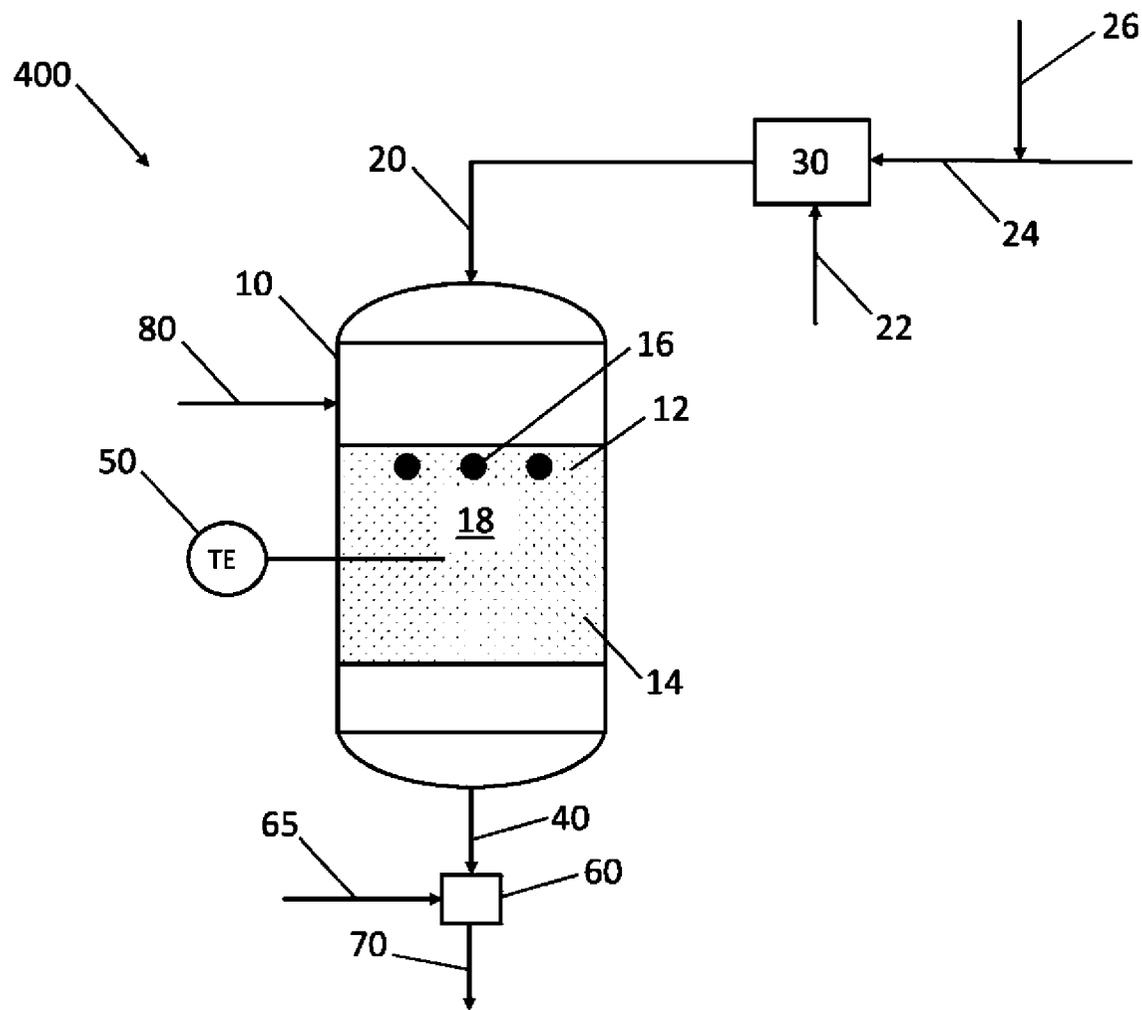
Фиг. 1



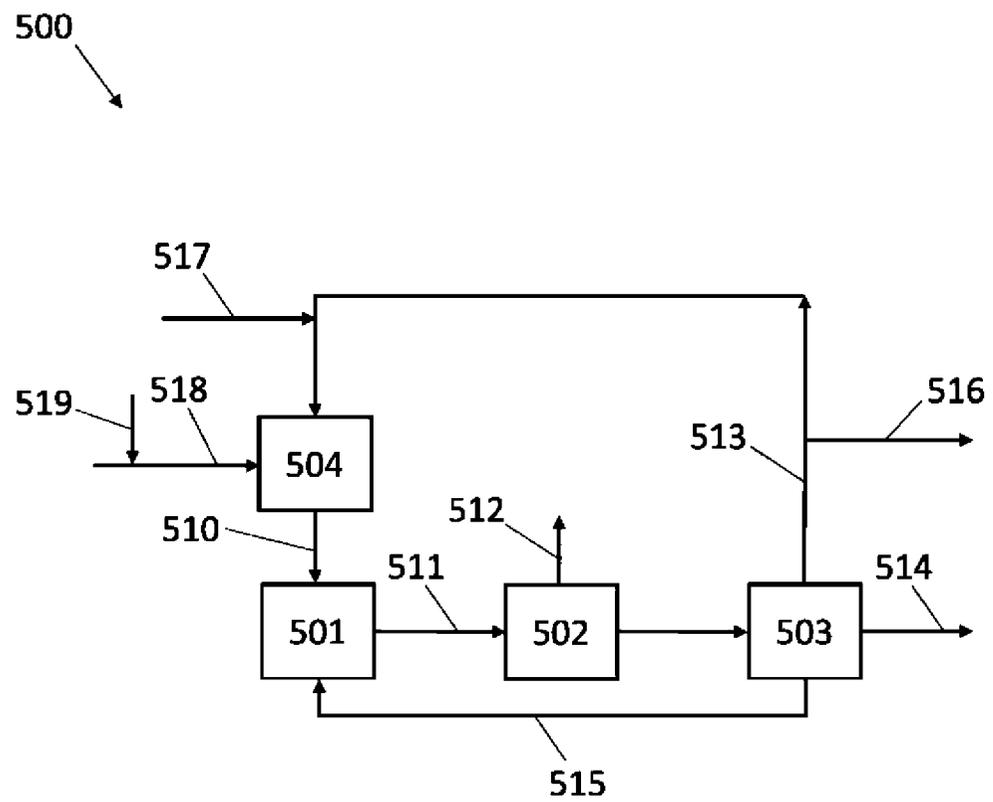
Фиг. 2



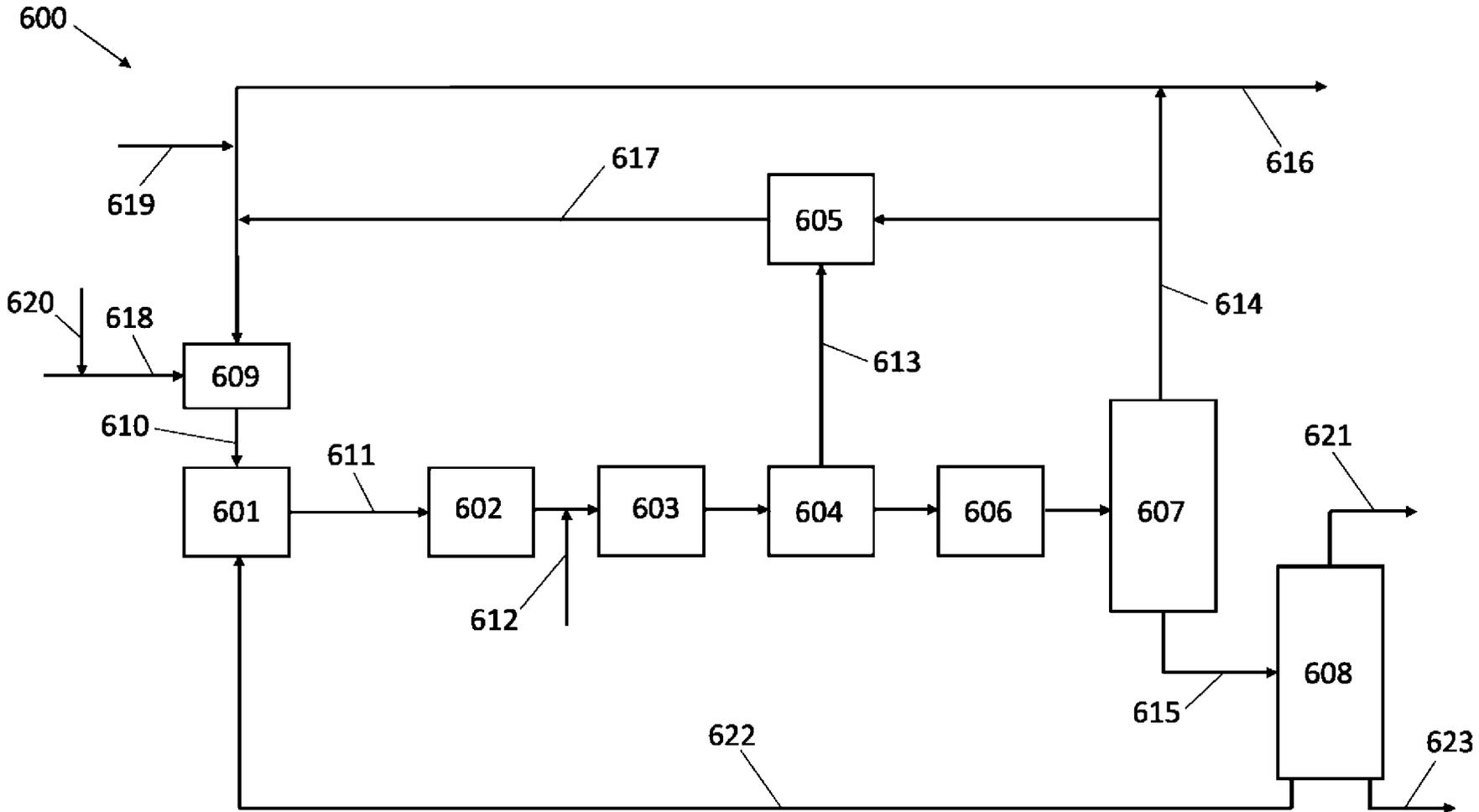
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6