

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(21) **201891590** (13) **A1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ**

(43) Дата публикации заявки
2019.01.31

(51) Int. Cl. **E21B 43/295 (2006.01)**
E21B 43/24 (2006.01)

(22) Дата подачи заявки
2017.02.07

(54) **СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА IN-SITU ИЗ ПОДЗЕМНЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ПЛАСТОВ**

(31) **62/292,556**

(32) **2016.02.08**

(33) **US**

(86) **PCT/CA2017/050135**

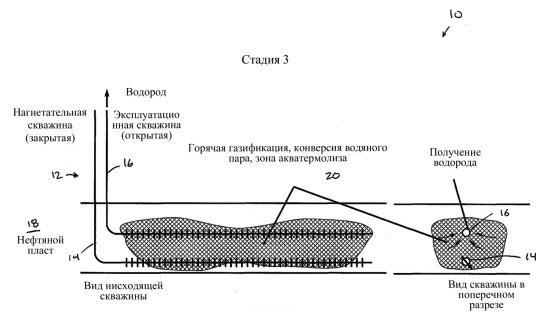
(87) **WO 2017/136924 2017.08.17**

(71) Заявитель:
**ПРОТОН ТЕКНОЛОДЖИС ИНК.
(VG)**

(72) Изобретатель:
Гэйтс Иэн Д., Ван Цзинъи (CA)

(74) Представитель:
**Поликарпов А.В., Соколова М.В.,
Путинцев А.И., Черкас Д.А., Игнатьев
А.В. (RU)**

(57) Углеводородный пласт подвергается термической обработке для индуцирования реакций газификации, конверсии водяного пара и/или акватермолиза для образования газов, в том числе водорода. Только водород извлекается на поверхность лишь при применении внутри эксплуатационных скважин мембран, проницаемых только для водорода.



201891590
A1

201891590
A1

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА IN-SITU ИЗ ПОДЗЕМНЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ПЛАСТОВ

ОБЛАСТЬ ТЕХНИКИ ИЗОБРЕТЕНИЯ

Настоящее изобретение относится к получению водорода из подпочвенных источников.

ПРЕДПОСЫЛКИ ИЗОБРЕТЕНИЯ

Углеводородные пласты многочисленны во всем мире, и известно множество технологий для применения в извлечении углеводорода на поверхность из таких пластов, в том числе первичные способы, а также вторичные способы разработки, такие как заводнение и нагнетание в пласт растворов химических реагентов для получения дополнительного углеводорода.

В случае тяжелой нефти и сверхтяжелой нефти (битума) в естественных пластовых условиях углеводород обычно слишком вязкий для извлечения на поверхность с применением традиционных способов, и поэтому тяжелую нефть и битум обычно термически обрабатывают для снижения вязкости таким образом, чтобы сырье легче двигалось в пласте и могло быть извлечено на поверхность.

После добычи тяжелой нефти и битума их необходимо обогатить до синтетической неочищенной нефти, которую в свою очередь перерабатывают в транспортные топлива и видов сырья для нефтехимической промышленности.

Однако известно, что извлечение углеводородных ресурсов приводит к возможному образованию углекислого газа, поскольку ресурсы или их продукты, как правило, сжигаются для высвобождения их энергии.

Таким образом, существует постоянная потребность в получении топлив, как например водород, которые являются более нейтральными в отношении выброса углекислого газа, а также могут использоваться в качестве химического сырья для отраслей промышленности, таких как обогащение и производство удобрений. Однако также известно, что традиционные способы получения водорода (например, реакция риформинга метана паром или электролиз) являются углеродоемкими или нежелательно дорогостоящими для их

реализации.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

Таким образом, настоящее изобретение направлено на обеспечение способов и систем для получения водорода, потенциально нейтральных в отношении выброса углекислого газа источника энергии, и промышленного сырья из углеводородных пластов.

В соответствии с вариантами осуществления настоящего изобретения *in situ* газификация, конверсия водяного пара и/или акватермолиз используются для получения синтезгаза в подповерхностном пласте, причем такой синтезгаз содержит пар, монооксид углерода, диоксид углерода и водород, при этом оксиды углерода отделяют от извлекаемых на поверхность газов с помощью мембраны, проницаемой только для водорода, в стволе скважины. Затем с помощью данного способа извлекают газовый продукт, в основном содержащий водород, на поверхность.

Полученный водород представляет собой альтернативный энергоноситель, который может быть извлечен на поверхность из углеводородных пластов. Полученный водород затем можно сжигать на поверхности для выработки энергии или тепла или потребления в устройствах на топливных элементах для производства энергии или в качестве промышленного сырья.

В первом широком аспекте настоящего изобретения представлен способ получения водорода из углеводородного пласта, предусматривающий:

- a. обеспечение скважины от поверхности до пласта;
- b. размещение в скважине по меньшей мере одной мембраны, проницаемой для водорода;
- c. нагревание пласта для облегчения протекания по меньшей мере одной из реакций газификации, конверсии водяного пара и акватермолиза между углеводородом и водой внутри пласта с образованием газового потока, содержащего водород; и
- d. приведение в контакт газового потока с по меньшей мере одной мембраной,

проницаемой для водорода, таким образом, что по меньшей мере одна мембрана, проницаемая для водорода, обеспечивает прохождение на поверхность из газового потока только водорода.

В некоторых иллюстративных вариантах осуществления первого аспекта стадия нагревания пласта предусматривает: нагнетание окисляющего средства в пласт для окисления по меньшей мере некоторой части углеводорода внутри пласта; генерирование электромагнитных или радиочастотных волн с помощью электромагнитной или радиочастотной антенны, расположенной внутри пласта; нагнетание горячего материала в пласт или генерирование тепла посредством применения системы резистивного (омического) нагрева, расположенной внутри пласта. Специалисту в данной области техники будет ясно, что для применений по настоящему изобретению могут быть применимы другие способы нагревания.

В некоторых иллюстративных вариантах осуществления по меньшей мере одна мембрана, проницаемая для водорода, может содержать по меньшей мере одно из: палладия (Pd), ванадия (V), тантала (Ta) или ниобия (Nb). По меньшей мере одна мембрана, проницаемая для водорода, может также содержать сплав палладий-медь или потенциально сплав палладий-серебро. По меньшей мере одна мембрана, проницаемая для водорода, может содержать керамический слой, а наиболее предпочтительно – керамический слой с внутренней или с внешней стороны относительно сплава палладий-медь. По меньшей мере одна мембрана, проницаемая для водорода, может содержать керамический слой и слой, отличный от керамического, выбранный из группы, состоящей из палладия, ванадия, тантала, ниобия, меди, сплавов этих материалов и их комбинаций, а также слой, отличный от керамического, может содержать сплав палладий-медь.

По меньшей мере одна мембрана, проницаемая для водорода, предпочтительно расположена в скважине внутри пласта, однако она также может быть расположена в скважине вблизи пласта или в других точках скважины.

В некоторых иллюстративных вариантах осуществления в скважине расположен пористый материал для поддержки внутри скважины по меньшей мере одной мембраны, проницаемой для водорода. Пористый материал предпочтительно, но не обязательно,

представляет собой пористую сталь.

В некоторых иллюстративных вариантах осуществления настоящего изобретения способы предусматривают после стадии нагревания пласта дополнительную стадию задержки приведения в контакт газового потока с по меньшей мере одной мембраной, проницаемой для водорода, для обеспечения дальнейшего получения водорода. Эта стадия задержки может предусматривать задержку, соответствующую периоду от 1 недели до 12 месяцев и наиболее предпочтительно – в диапазоне от 1 недели до 4 недель.

В иллюстративных вариантах осуществления, где для стадии нагревания пласта используется диэлектрическое нагревание, электромагнитное излучение может иметь частоту, находящуюся в диапазоне от 60 Гц до 1000 ГГц, и предпочтительно в диапазоне от 10 МГц до 10 ГГц.

Если для нагревания пласта применяется система резистивного (омического) нагрева, то нагревание предпочтительно осуществляют до температур, находящихся в диапазоне от 200 до 800 градусов Цельсия, и наиболее предпочтительно в диапазоне от 400 до 700 градусов Цельсия.

Во втором широком аспекте настоящего изобретения представлена система для извлечения водорода из подповерхностного пласта, при этом система содержит:

устройство для нагревания пласта с целью образования газового потока, содержащего водород;

скважину, расположенную в пласте; и

мембрану в скважине, проницаемую для водорода, выполненную с возможностью прохождения через нее водорода из газового потока, однако препятствующую прохождению через нее других газов из газового потока для обеспечения извлечения водорода через скважину на поверхность.

В некоторых иллюстративных вариантах осуществления второго аспекта устройство для нагревания пласта содержит по меньшей мере одно из нагнетателя окисляющего средства, электромагнита, радиочастотной антенны и нагнетателя горячего материала.

Полученный водород может потребляться в устройстве с электрохимическими топливными элементами, сжигаться для получения пара для выработки энергии или пара для извлечения нефти или использоваться в качестве промышленного сырья.

Подробное описание иллюстративных вариантов осуществления настоящего изобретения приведено ниже. Однако следует понимать, что настоящее изобретение не должно истолковываться как ограниченное этими вариантами осуществления. Иллюстративные варианты осуществления относятся к конкретным применениям настоящего изобретения, хотя специалисту в данной области техники будет ясно, что настоящее изобретение имеет более широкую применимость, чем приведенные в данном документе иллюстративные варианты осуществления.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

На прилагаемых графических материалах, на которых изображены иллюстративные варианты осуществления настоящего изобретения:

ФИГ. 1А-1С представляют собой упрощенные вид сбоку и вид в разрезе, изображающие стадии в системе и способе, посредством которых углеводородный пласт нагревается путем окисления части углеводорода внутри пласта.

ФИГ. 2 представляет собой упрощенный вид сбоку и вид в разрезе, изображающие систему и способ, посредством которых углеводородный пласт нагревается с применением электромагнитной/радиочастотной антенны, расположенной внутри пласта.

ФИГ. 3 представляет собой упрощенный вид сбоку, изображающий применение множества антенн и эксплуатационных скважин.

ФИГ. 4А-4С представляют собой виды в разрезе, изображающие иллюстративные водород-отделяющие композиционные мембраны.

ФИГ. 5 представляет собой упрощенный вид сбоку и вид в разрезе, изображающие иллюстративные систему и способ, посредством которых окисляющее средство непрерывно нагнетается в пласт для получения водорода.

ФИГ. 6 представляет собой упрощенный вид сбоку и вид в разрезе, изображающие иллюстративную систему и способ, в которых одна из скважин содержит теплостойкий картридж внутри скважины для нагрева пласта с целью получения водорода.

ФИГ. 7 представляет собой схему, изображающую некоторые из реакций, которые происходят внутри пласта с получением водорода, происходящие в иллюстративных способах, описанных в данном документе.

ФИГ. 8А-8В представляют собой схемы, изображающие результаты моделирования термореактивного пласта, с использованием схемы реакций, изображенной на ФИГ. 7, способа получения водорода внутри пласта с тяжелой нефтью, предусматривающего способ нагнетания циклического окисляющего средства, включающего периоды без нагнетания, где обеспечивается протекание химических реакций внутри пласта.

ФИГ. 9А-9D представляют собой схемы, изображающие результаты моделирования термореактивного пласта, с использованием схемы реакций, изображенной на ФИГ. 7, способа получения водорода в пласте с тяжелой нефтью, предусматривающего способ непрерывного нагнетания окисляющего средства.

Ниже будут описаны иллюстративные варианты осуществления настоящего изобретения со ссылкой на прилагаемые графические материалы.

ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ ИЛЛЮСТРАТИВНЫХ ВАРИАНТОВ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

В последующем описании конкретные детали приведены для того, чтобы обеспечить более полное понимание специалистам в данной области техники. Однако хорошо известные элементы могут быть не изображены или подробно не описаны во избежание излишнего затруднения в понимании данного раскрытия. Нижеследующее описание примеров настоящего изобретения не предназначено для того, чтобы быть исчерпывающим или ограничивать данное изобретение точной формой любого иллюстративного варианта осуществления. Соответственно, описание и графические материалы следует рассматривать в иллюстративном, а не ограничительном смысле.

По всему представленному описанию многочисленные термины и выражения используются в соответствии с их обычными значениями. Ниже приведены определения некоторых дополнительных терминов и выражений, которые используются в последующем описании.

"Нефть" представляет собой природный, нерафинированный нефтепродукт, состоящий из углеводородных компонентов. "Битум" и "тяжелая нефть" обычно отличаются от других нефтепродуктов на основании их значений плотности и вязкости. "Тяжелая нефть" обычно классифицируется при плотности, составляющей от 920 до 1000 кг/м³. "Битум" обычно характеризуется плотностью, составляющей более 1000 кг/м³. Для целей настоящего описания термины "нефть", "битум" и "тяжелая нефть" используются взаимозаменяемо, так что каждый из них подразумевает другой. Например, когда используется только термин "битум", – он включает в свой объем "тяжелое масло".

Используемый в данном описании термин "нефтяной пласт" относится к подземному пласту, который состоит в основном из пористой матрицы, которая содержит нефтепродукты, а именно нефть и газ. Используемый в данном описании термин "пласт тяжелой нефти" относится к нефтяному пласту, который в основном состоит из пористой породы, содержащей тяжелую нефть. Используемый в данном описании термин "пласт нефтеносного песчаника" относится к нефтяному пласту, который состоит в основном из пористой породы, содержащей битум.

"Крекинг" относится к расщеплению более крупных углеводородных цепей до соединений с меньшими цепями.

Термин "in situ" относится к окружающей среде подповерхностного пласта нефтеносного песчаника.

В широких аспектах в иллюстративных способах и системах, описанных в данном документе, в качестве источника водорода применяются пласты нефтеносного песчаника, как битум, так и пластовая вода.

В общем, в настоящем описании описаны системы и способы обработки нефтяных пластов (традиционная нефть, тяжелая нефть, пласты нефтеносного песчаника, пласты карбонатной нефти) для получения водорода. Способы предусматривают нагнетание кислорода или обогащенного кислородом потока в пласт для сжигания части углеводородов в пласте.

В некоторых предпочтительных иллюстративных вариантах осуществления во время нагнетания окисляющего средства какие-либо жидкости на поверхность не извлекаются. После достижения целевой температуры в пласте нагнетание останавливают, и в течение этого времени происходит потребление оставшегося кислорода в пласте, и происходят реакции газификации и реакция конверсии водяного пара. В ходе этих реакций внутри пласта образуется водород. Эксплуатационная скважина оборудована мембраной, проницаемой только для водорода, которая при открытии для получения извлекает на поверхность только водород. После того как скорость получения водорода падает ниже порогового значения, снова начинают нагнетание кислорода, и процесс повторяется несколько раз, пока общая скорость получения водорода не опустится ниже порогового значения. Пороговое значение может быть определено из минимальной скорости извлечения водорода, которая является экономически выгодной, что будет определяться расходами на нагнетание кислорода, ценой производства, хранения, транспортировки и потребления водорода (например, в топливном элементе для питания), а также затратами на эксплуатацию. Мембрана, проницаемая только для водорода, предотвращает извлечение оксидов углерода на поверхность. Таким образом, при осуществлении способа получают водород из углеводородов и воды, которые расположены внутри пласта. Если необходимо, то для обеспечения требуемых реакций вода может нагнетаться в пласт с кислородом.

Окисление жидкостей пласта путем нагнетания кислорода в пласт является одним из способов получения тепла внутри пласта. Реакции, которые происходят в пласте при повышенных температурах, могут включать в себя окисление при низкой и высокой температурах, пиролиз (термический крекинг), акватермолиз (водный пиролиз или реакции термического крекинга в присутствии воды), реакции газификации и реакцию конверсии водяного пара.

На ФИГ. 1А-1С изображена система 10, где пара скважин 12 с гравитационным дренажом с применением водяного пара (SAGD), содержащая нагнетательную скважину 14 и эксплуатационную скважину 16, применяется для реализации иллюстративного варианта осуществления настоящего изобретения в пласте 18 на трех стадиях. Специалистам в данной области техники будет ясно, что в иллюстративных способах можно использовать существующую пару скважин с гравитационным дренажом с применением водяного пара (SAGD) или пару скважин, в которой просто используется конфигурация скважины SAGD или размещение пар скважин SAGD, например схему размещения пар скважин SAGD.

Кроме того, специалистам в данной области техники будет понятно, что в иллюстративных способах может использоваться существующая скважина с циклической стимуляцией пара (CSS) или скважина, в которая просто используется конфигурация или размещение скважин CSS, например схема размещения скважин CSS. На стадии 1 (изображенной на ФИГ. 1А), кислород нагнетается в пласт 18 через открытую нагнетательную скважину 14, что приводит к сгоранию части битума в зоне горения 20 пласта 18 для получения температур (для неограничивающего примера >700 градусов Цельсия), необходимых для реакций газификации, конверсии водяного пара и акватермолиза. Эксплуатационная скважина 16 на данной стадии остается закрытой. На стадии 2 нагнетание кислорода прекращают, и нагнетательную скважину 14 закрывают, а оставшийся кислород в пласте 18 потребляется в продолжающихся реакциях в зоне горения 20. Поскольку пласт 18 в прилегающей области скважины находится при достаточно высоких температурах, реакции газификации, конверсии водяного пара и акватермолиза продолжают. Газовые продукты реакций накапливаются в пласте 18. После этого начинается стадия 3, при которой открывают эксплуатационную скважину 16, содержащую мембрану для отделения водорода (не изображена), с помощью которой водород извлекается на поверхность. После того как получение водорода упадет до малопродуктивных пороговых значений, процесс можно запустить снова со стадии 1. Способ по настоящему изобретению не ограничивается горизонтальными скважинами, но также может быть выполнен с вертикальными, и наклонно-направленными, и многоствольными скважинами. Способ может в равной степени применяться в газовом пласте. Способ может применяться в случае, когда из пласта, в дополнение к водороду, получают нефть. Способ может применяться в случае, когда из пласта получают синтезгаз.

Другая иллюстративная система 30 в соответствии с настоящим изобретением изображена на ФИГ. 2. В этом варианте осуществления тепло подается в пласт 18 с применением электромагнитной/радиочастотной антенны 32 для образования нагретой зоны 36. Нагретый пласт 18 подвергают реакциям газификации, конверсии водяного пара и акватермолиза, посредством чего образуется водород и другие газы внутри пласта 18. Образующийся водород извлекается на поверхность через мембрану, проницаемую только для водорода, внутри эксплуатационной скважины 34. Данный подход не ограничивается горизонтальными скважинами, как изображено, но также может быть выполнен с вертикальными, и наклонно-направленными, и многоствольными скважинами. Способ может в равной степени применяться в газовом пласте.

Другой связанный вариант осуществления изображен на ФИГ. 3 на виде в разрезе или поперечном разрезе, где система 40 содержит множество эксплуатационных скважин 42 и множество электромагнитных/радиочастотных антенн/нагревателей 44. Электромагнитные/радиочастотные нагреватели 44 расположены между эксплуатационными скважинами для получения водорода 42 в пласте 18 и создают нагретую зону 46. Способ по настоящему изобретению не ограничивается горизонтальными скважинами, но также может быть выполнен с вертикальными, и наклонно-направленными, и многоствольными скважинами. Способ может в равной степени применяться в газовом пласте. Также могут использоваться скважины с резистивными (омическими) нагревателями.

В ходе реакций образуется газ, что делает возможным гравитационное дренирование (из-за разности плотности) горячей мобилизованной нефти и конденсата пара по направлению к основанию камеры для реакции газификации. Таким образом, дополнительный исходный материал для дальнейшей реакции обеспечивается перемещением мобилизованной нефти по направлению к реакционной зоне выше и вокруг нагнетательной скважины или антенны. Это помогает в реакциях газификации и поддерживает 700+ градусов Цельсия в зоне вблизи скважины. Мембрана в скважине позволяет проходить водороду, а другие молекулы газа задерживает в пласте.

На ФИГ. 5 изображен дополнительный иллюстративный вариант осуществления системы 50 в соответствии с настоящим изобретением. Аналогично варианту осуществления на ФИГ. 1А-1С, система 50 содержит пару скважин SAGD 52 (нагнетательная скважина 54 и эксплуатационная скважина 56). Однако, вместо обеспечения периода химической реакции после нагнетания в нагретой зоне 58 перед получением, нагнетательную и эксплуатационную скважины 54, 56 оставляют открытыми, и обеспечивают непрерывный поток нагнетаемого окисляющего средства, и получают водород. Способ может применяться в случае, когда из пласта, в дополнение к водороду, получают нефть. Способ может применяться в случае, когда из пласта получают синтезгаз.

На ФИГ. 6 изображен дополнительный иллюстративный вариант осуществления системы 60 в соответствии с настоящим изобретением. В данном варианте осуществления, предусматривающем пару скважин 62 (нагнетательную скважину 64 и эксплуатационную скважину 66), одна из скважин 64, 66 снабжена теплостойким картриджом, который применяется для нагревания зоны пиролиза 68 в пласте 18 для получения водорода через эксплуатационную скважину 66.

В других, не изображенных вариантах осуществления, может использоваться конфигурация с одной скважиной, где кислород нагнетается вдоль одной части скважины, а получение только водорода происходит вдоль другой части скважины. Скважина может быть вертикальной, наклонно-направленной, горизонтальной или многоствольной.

В дальнейших не проиллюстрированных вариантах осуществления нагревание пласта можно осуществлять посредством электромагнитных или радиочастотных волн. Альтернативно нагревание пласта можно осуществлять с использованием высокотемпературного пара под высоким давлением.

Настоящий способ можно также применять в нефтяных и газовых пластах, где содержание воды в пласте считается высоким, так что в обычной практике эти пласты не разрабатываются в отношении нефти или газа, соответственно. Способы и система в

соответствии с настоящим изобретением могут применяться в углеводородных пластах с высоким содержанием воды, поскольку водород получается не только из углеводорода, но и из воды внутри пласта. Таким образом, описанные в данном документе способы могут применяться в пластах, где высокое содержание воды делает их менее ценными, чем пласты, насыщенные нефтью, превращая ранее менее ценные нефтяные пласты в ценные источники энергии, поскольку водород поступает как из нефти, так и из воды в пласте.

Настоящее изобретение относится к обработке нефтяного или газового пласта для получения водорода из углеводорода и воды внутри пласта. Обработка включает в себя нагревание пласта для обеспечения реакций газификации и конверсии водяного пара для получения водорода внутри пласта, а затем использование эксплуатационной скважины для получения только водорода, снабженной водородной мембраной для получения водорода из пласта.

Считается, что высокое содержание воды в нефтяных и газовых пластах является невыгодным для извлечения нефти или газа. Однако было обнаружено, что высокое содержание воды может быть выгодным для получения водорода, поскольку водород получают из воды в ходе реакции конверсии водяного пара. Было обнаружено, что во многих реакциях, в ходе которых образуется водород, в качестве источника водорода используется вода в пласте, – при этом при температурах реакций пластовая вода превращается в водяной пар, который затем участвует в реакциях парового риформинга с углеводородами в пласте.

Ниже приводится дополнительное подробное описание некоторых иллюстративных вариантов осуществления настоящего изобретения.

A. Нагревание пласта

В некоторых иллюстративных вариантах осуществления пласт нагревают до температуры, при которой происходят реакции газификации и конверсии водяного пара между нефтью и водой внутри пласта.

Тепло может подаваться в пласт с помощью множества способов, широко известных в данной области техники. Типичные способы, применяемые в данной области техники,

предусматривают стадию горения, где кислород нагнетается в пласт в течение периода времени, и часть углеводорода сжигается для выработки тепла внутри пласта для достижения температуры порядка 400-700 градусов Цельсия. Другие техники нагревания включают электромагнитное или радиочастотное нагревание. Другие техники нагревания включают нагнетание горячих материалов в пласт.

После того как источник тепла попадает пласт, если это происходит путем горения, – нагнетание кислорода прекращают, и обеспечивают дальнейшее протекание химических реакций внутри пласта при повышенной температуре, достигнутой с помощью стадии горения. При нагреве посредством электромагнитного нагревания, это нагревание может продолжать поддерживать требуемую температуру реакции в пласте.

В. Период реакций газификации, конверсии водяного пара и акватермолиза

В течение периода времени, в ходе которого пласт находится при повышенной температуре, могут происходить реакции газификации, конверсии водяного пара и акватермолиза с последующим образованием водорода, сероводорода, монооксида углерода, диоксида углерода и пара (водяного пара), а также, возможно, других газов. По мере того как реакции происходят внутри пласта, газовые компоненты собираются внутри поровых пространств пласта и любых трещин или других пустотных пространств внутри пласта.

На ФИГ. 7 изображены некоторые из реакций, которые происходят в пласте. Как можно видеть, топливо для окисления и газификации представляет собой битум и кокс, которые образуются в результате реакций, происходящих в ходе осуществления способа. Битум может быть представлен в виде смеси мальтенов (насыщенные, ароматические и смолы) и асфальтенов (большие циклические соединения с большой вязкостью). Во время окисления мальтены могут быть превращены в асфальтены. Асфальтены могут быть превращены посредством окисления как при низкой, так и при высокой температуре, а также с помощью термического крекинга в различные газовые продукты, в том числе метан, водород, монооксид углерода, диоксид углерода, сероводород, и высокомолекулярные газы (например, пропан и т. д.), и кокс. Затем кокс может быть превращен посредством реакций окисления и газификации в метан, воду (пар), монооксид углерода, диоксид углерода и

водород. Кроме того, метан может быть превращен посредством реакций газификации в водород, и диоксид углерода, и монооксид углерода. Монооксид углерода и вода (пар) могут быть превращены, посредством реакции конверсии водяного пара, в водород и диоксид углерода. В общем, топливные компоненты в системе (например, нефть, кокс, метан) могут быть газифицированы для получения смесей монооксида углерода, диоксида углерода и водорода.

С. Получение водорода

По прошествии времени, достаточного для образования водорода, водород извлекается из пласта через мембраны, проницаемые только для водорода, внутри эксплуатационной скважины. Таким образом, сероводород, монооксид углерода, диоксид углерода, водяной пар и другие газовые компоненты остаются в пласте, а на поверхность выделяется только водород. Поскольку водород удаляется из пласта, то это способствует реакциям с образованием большего количества водорода.

Для помещения в эксплуатационную скважину мембраны, проницаемой только для водорода, металлические мембраны, например, изготовленные из палладия (Pd), ванадия (V), тантала (Ta) или ниобия (Nb), являются механически прочными, но с ограниченным диапазоном оптимальной производительности в отношении температуры. Эти мембраны работают с помощью механизма растворимости-диффузии, при этом водород растворяется в материале мембраны и диффундирует на другую сторону, где он высвобождается; этот механизм обеспечивает поток водорода (скорость переноса молей на единицу площади), пропорциональный квадратному корню давления. Для примера, проницаемость ванадия и титана по отношению к водороду падает при высоких температурах, а также образуются слои оксида металла, которые предотвращают эффективное отделение водорода.

Мембраны на основе Pd имеют преимущество, поскольку их проницаемость для водорода повышается с повышением температуры. Однако мембраны на основе Pd отравляются сероводородом (H_2S) и монооксидом углерода (CO), которые возникают путем аквагермолиза, когда пар и нефть, например битум, контактируют при повышенных температурах. Этому можно противопоставить применение сплавов Pd-медь. Для снижения затрат могут быть сконструированы многослойные мембраны, состоящие из

сплава Pd-Cu и V, Ta и Nb. Другие сплавы, такие как сплавы палладий-серебро, также могут быть применимы для некоторых вариантов осуществления настоящего изобретения.

Керамические мембраны являются инертными по отношению к H_2S и CO и могут использоваться при температурах, достигаемых *in situ* процессами газификации.

Микропористые керамические мембраны для отделения водорода имеют несколько преимуществ перед металлическими мембранами: поток прямо пропорционален давлению; проницаемость керамических микропористых мембран значительно возрастает с температурой; и стоимость сырья для керамических мембран намного меньше, чем у металлических мембран. Поскольку они являются пористыми, то они, как правило, не дают возможность получать чистый водород, хотя они могут быть селективными в отношении водорода с относительно высокой проницаемостью водорода. В некоторых вариантах осуществления мембрана может содержать керамический слой, чтобы не только обеспечивать способность выделять водород из газовых компонентов, образующихся в результате реакций, но и укреплять мембрану.

В некоторых вариантах осуществления водородная мембрана характеризуется высокой селективностью по отношению к водороду (особенно, если газообразный водород используется для генерации электроэнергии с помощью топливного элемента на поверхности), высокой проницаемостью по отношению к водороду, способна выдерживать нагревание до 700 градусов Цельсия, устойчива к газам H_2S и CO , механически надежна, учитывая проблемы с размещением мембран в скважине, и/или может быть изготовлена со значениями диаметра и длины, которые могут соответствовать скважинам (около 20-30 см в диаметре и 700-1000 м в длину). В некоторых вариантах осуществления мембраны могут также могут быть устойчивыми к стадии частичного окисления, при которой расходуется углерод и другие твердые отложения на внешней поверхности композиционной мембраны.

На ФИГ. 4А-4С изображены иллюстративные варианты осуществления мембран в соответствии с настоящим изобретением. На ФИГ. 4А изображена мембранная конструкция 70, где конструкция 70 расположена внутри обсадного хвостовика 72.

Конструкция 70 содержит пористый стальной опорный слой 74, вышележащий слой сплава Pd-Cu 76 и внешний керамический слой 78. На ФИГ. 4В опорный слой отсутствует, а

конструкция 80 содержит внутренний слой сплава 86 и внешний керамический слой 88, расположенный внутри обсадного хвостовика 82. На ФИГ. 4С изображена конструкция 90, содержащая только слой сплава 96 в обсадном хвостовике 92.

D. Новый цикл

Если нагревание осуществляется циклическим образом, например при *in situ* сгорании, то после того, как температура в пласте упала, так что скорости реакции газификации, конверсии водяного пара и акватермолиза упали, и получение водорода упало ниже порогового значения, – новый цикл нагнетания кислорода и последующее *in situ* горение приведут к возобновлению нагревания пласта. Затем стадии от А до С повторяются. Если непрерывное нагревание осуществляется путем нагнетания окислителя или с помощью электромагнитных, или радиочастотных, или резистивных способов нагрева, то может происходить непрерывное получение водорода из пласта.

ПРИМЕРЫ

На ФИГ. 8А-8В изображены результаты первого моделирования термореактивного пласта, проведенного с использованием программного обеспечения для моделирования пластов CMG STARS™ (программный продукт, который является отраслевым стандартом для моделирования способа получения термореактивного пласта – им рассчитывают баланс энергии и материала в контексте фазового равновесия и ламинарного потока в пористых средах) для циклического способа в соответствии с настоящим изобретением. В данном случае единственная вертикальная скважина использовалась как для нагнетания, так и для получения внутри пласта. В данном примере операция выполнялась циклически, при этом кислород нагнетался в течение периода времени, после которого нагнетание прекращалось, а затем оно начиналось для осуществления получения в течение периода, после которого его прекращали. Этот цикл нагнетания и получения повторялся до тех пор, пока общий процесс не утрачивал продуктивность на заранее заданных уровнях. Свойства пласта, применяемые в этой трехмерной модели для моделирования пласта, представляли собой свойства, типичные для пластов нефтеносных песчаников (пористость 0,3, горизонтальная проницаемость 2200 мД, вертикальная проницаемость 1100 мД, толщина 37 м,

нефтенасыщенность 0,7, начальное давление 2800 кПа, начальная температура 13 градусов Цельсия, соотношение газ-нефть исходного раствора $10 \text{ м}^3/\text{м}^3$). В модели использовалась схема реакции, изображенная на ФИГ. 7. На ФИГ. 8А изображено, что при введении кислорода циклическим образом в пласте образуется водород посредством реакций, представленных на ФИГ. 7. На ФИГ. 8В изображены распределения температуры в вертикальной плоскости нагнетательной/эксплуатационной скважины. Результаты показали, что после нагнетания кислорода в пласт температура достигала 500 градусов Цельсия в пласте, окружающем вертикальную скважину. Вследствие этого повышения температуры, реакции, описанные на ФИГ. 7, происходили с последующим образованием водорода в пласте. После завершения стадии нагнетания кислорода скважину переводили в режим получения, и из пласта получали только водород. Циклы продолжались до тех пор, пока количество водорода, полученного за цикл, больше не было экономически выгодным.

На ФИГ. 9А-9D проиллюстрированы результаты второго моделирования с использованием программного обеспечения для моделирования пластов CMG STARSTM для иллюстративного варианта осуществления настоящего изобретения, где нижняя нагнетательная скважина расположена в пласте вблизи основания пласта, а верхняя эксплуатационная скважина расположена над нагнетательной скважиной. В данном случае эксплуатационная скважина наклонена внутри пласта, как лучше всего видно на ФИГ. 9А. В данном примере длина нагнетательной скважины равна 105 м. Свойства пласта, применяемые в данной трехмерной модели для моделирования пласта, представляли собой свойства, типичные для пластов нефтеносных песчаников (пористость 0,3, горизонтальная проницаемость 2200 мД, вертикальная проницаемость 1100 мД, толщина 37 м, нефтенасыщенность 0,7, начальное давление 2800 кПа, начальная температура 13 градусов Цельсия, соотношение газ-нефть исходного раствора $10 \text{ м}^3/\text{м}^3$). В модели использовалась схема реакции, изображенная на ФИГ. 7.

На ФИГ. 9В изображены операции, в ходе которых в пласт нагнетался кислород с тремя разными скоростями потока. В случаях А, В и С скорость нагнетания кислорода составляла соответственно 17,5, 1,05 и 1,75 млн. станд. куб. футов/день.

На ФИГ. 9С изображены полученные объемы получения водорода из пласта,

соответствующие случаям А, В и С. Суммарные объемы водорода, образующиеся после 700 дней работы, составляли 104, 37 и 44 млн. станд. куб. футов водорода.

На ФИГ. 9D представлен пример распределения температуры в горизонтально-вертикальной плоскости нагнетательных и эксплуатационных скважин для случая А. Результаты показывают, что по мере нагнетания кислорода в пласт внутри пласта создавалась реактивная зона. Реактивная зона представляет собой зону с температурой, которая выше, чем исходная температура пласта. Результаты показывают, что температура поднималась выше 450 градусов Цельсия, и на фронте реакции температура достигала 900 градусов Цельсия. При температурах более 400 градусов Цельсия реакции газификации происходили в горячей зоне, в которой образовывался водород, который извлекался исключительно верхней эксплуатационной скважиной на поверхность. Внутри горячей зоны вокруг нагнетательной скважины нагретая нефть стекает и накапливается вокруг нагнетательной скважины, обеспечивая тем самым больше топлива для реакций, которые происходят вокруг нагнетательной скважины.

Вышеприведенные примеры изображают иллюстративные способы проведения реакций газификации *in situ* в пласте, где для извлечения водорода на поверхность применяется мембрана в эксплуатационной скважине.

Водород, полученный посредством описанных в данном документе способов, может быть использован в топливных элементах на поверхности для выработки энергии или сжигаться для получения пара, который может быть использован для выработки энергии или для других процессов добычи нефти *in situ* или продаваться как промышленное сырье.

Как будет ясно из вышеизложенного, специалисты в данной области техники легко смогут определить очевидные варианты, способные обеспечить описанную функциональность, и при этом для охвата объема настоящего изобретения предназначены все такие варианты и функциональные эквиваленты.

Если контекст явно не требует иного, то в описании и формуле изобретения:

- термины "содержать", "содержащий" и т. д. должны толковаться в неограничивающем

смысле, в отличие от исключительного или исчерпывающего смысла; т. е. в смысле "включая, но без ограничения";

- термины "связанный", "соединенный" или любой их вариант означает любую связь или соединение, прямое или не прямое между двумя или более элементами; соединение или связь между элементами может быть физической, логической или их комбинацией;
- термины "в данном документе", "выше", "ниже" и слова с аналогичным значением, в случае если они используются для изложения данного описания, относятся к данному описанию в целом, а не к каким-либо частям данного описания;
- "или" в отношении списка из двух или более элементов охватывает все следующие интерпретации слова: любой из элементов в списке, все элементы в списке и любую комбинацию элементов в списке;
- формы единственного числа также включают значение любых соответствующих форм множественного числа.

Слова, обозначающие направления, такие как "вертикальный", "поперечный", "горизонтальный", "вверх", "вниз", "вперед", "назад", "внутри", "наружный", "вертикальный", "поперечный", "левый", "правый", "передний", "задний", "верхняя часть", "нижняя часть", "ниже", "выше", "нижний" и т. п., используемые в данном описании и любых сопроводительных пунктах (где они присутствуют), зависят от конкретной ориентации описанного и проиллюстрированного устройства. Объект настоящего изобретения, описанный в данном документе, может принимать различные альтернативные ориентации. Соответственно, такие термины, обозначающие направление, не строго ограничены и их не следует толковать узко.

Конкретные примеры способов и систем описаны в данном документе для целей иллюстрации. Они являются лишь примерами. Представленная в данном документе технология может применяться к контекстам, отличным от иллюстративных контекстов, описанных выше. При осуществлении настоящего изобретения возможны различные изменения, модификации, дополнения, исключения и перестановки. Настоящее изобретение включает вариации описанных вариантов осуществления, которые будут очевидны для специалиста в данной области, в том числе вариации, полученные путем замены характеристик, элементов и/или действий на эквивалентные характеристики,

элементы и/или действия; смешивание и подбор характеристик, элементов и/или действий из различных вариантов осуществления; объединение характеристик, элементов и/или действий из вариантов осуществления, как описано в данном документе, с характеристиками, элементами и/или действиями из другой технологии; и/или исключение характеристик, элементов и/или действий из описанных вариантов осуществления.

Вышеизложенное рассматривается как иллюстративное только исходя из принципов данного изобретения. Объем формулы изобретения не должен ограничиваться вышеизложенными иллюстративными вариантами осуществления, но должен быть широко интерпретирован в соответствии с описанием в целом.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ получения водорода из углеводородного пласта, при этом способ предусматривает:
 - a. обеспечение скважины от поверхности до пласта;
 - b. размещение в скважине по меньшей мере одной мембраны, проницаемой для водорода;
 - c. нагревание пласта для облегчения протекания по меньшей мере одной из реакций газификации, конверсии водяного пара и акватермолиза между углеводородом и водой внутри пласта с образованием газового потока, содержащего водород; и
 - d. приведение в контакт газового потока с по меньшей мере одной мембраной, проницаемой для водорода, таким образом, что по меньшей мере одна мембрана, проницаемая для водорода, обеспечивает прохождение на поверхность из газового потока только водорода.

2. Способ по п. 1, где стадия нагревания пласта предусматривает нагнетание окисляющего средства в пласт для окисления по меньшей мере некоторой части углеводорода внутри пласта.

3. Способ по п. 1, где стадия нагревания пласта предусматривает генерирование электромагнитных или радиочастотных волн с помощью электромагнитной или радиочастотной антенны, расположенной внутри пласта.

4. Способ по п. 1, где стадия нагревания пласта предусматривает нагнетание горячего материала в пласт.

5. Способ по п. 1, где стадия нагревания пласта предусматривает генерирование тепла посредством применения системы резистивного (омического) нагрева, расположенной внутри пласта.

6. Способ по п. 1, где по меньшей мере одна мембрана, проницаемая для водорода, содержит по меньшей мере одно из: палладия (Pd), ванадия (V), тантала (Ta) или ниобия (Nb).
7. Способ по любому из пп. 1-6, где по меньшей мере одна мембрана, проницаемая для водорода, содержит сплав палладий-медь.
8. Способ по любому из пп. 1-7, где по меньшей мере одна мембрана, проницаемая для водорода, содержит керамический слой.
9. Способ по п. 7, где по меньшей мере одна мембрана, проницаемая для водорода, содержит керамический слой с внутренней или с внешней стороны относительно сплава палладий-медь.
10. Способ по любому из пп. 1-5, где по меньшей мере одна мембрана, проницаемая для водорода, содержит керамический слой и слой, отличный от керамического, выбранный из группы, состоящей из палладия, ванадия, тантала, ниобия, меди, сплавов этих материалов и их комбинаций.
11. Способ по п. 10, где слой, отличный от керамического, содержит сплав палладий-медь.
12. Способ по любому из пп. 1-5, где по меньшей мере одна мембрана, проницаемая для водорода, расположена в скважине внутри пласта.
13. Способ по любому из пп. 1-5, где по меньшей мере одна мембрана, проницаемая для водорода, расположена в скважине вблизи пласта.
14. Способ по любому из пп. 1-5, где в скважине расположен пористый материал для поддержки внутри скважины по меньшей мере одной мембраны, проницаемой для водорода.

15. Способ по п. 14, где пористый материал представляет собой пористую сталь.
16. Способ по любому из пп. 1-5, предусматривающий после стадии нагревания пласта дополнительную стадию задержки приведения в контакт газового потока с по меньшей мере одной мембраной, проницаемой для водорода, для обеспечения дальнейшего получения водорода.
17. Способ по п. 16, где стадия задержки предусматривает задержку в течение периода в диапазоне от 1 недели до 12 месяцев.
18. Способ по п. 17, где задержка соответствует периоду в диапазоне от 1 недели до 4 недель.
19. Способ по п. 3, где для стадии нагревания пласта применяется диэлектрическое нагревание, при этом электромагнитное излучение характеризуется частотой в диапазоне от 60 Гц до 1000 ГГц.
20. Способ по п. 19, где электромагнитное излучение характеризуется частотой в диапазоне от 10 МГц до 10 ГГц.
21. Способ по п. 5, где для нагрева пласта до температур в диапазоне от 200 до 800 градусов Цельсия применяется система резистивного (омического) нагрева.
22. Способ по п. 21, где температура находится в диапазоне от 400 до 700 градусов Цельсия.
23. Система для извлечения водорода из подповерхностного пласта, при этом система содержит:
 - устройство для нагревания пласта с целью образования газового потока, содержащего водород;

скважину, расположенную в пласте; и мембрану в скважине, проницаемую для водорода, выполненную с возможностью прохождения через нее водорода из газового потока, однако препятствующую прохождению через нее других газов из газового потока для обеспечения извлечения водорода через скважину на поверхность.

24. Система по п. 23, где устройство для нагревания пласта содержит по меньшей мере одно из нагнетателя окисляющего средства, электромагнита, радиочастотной антенны и нагнетателя горячего материала.

25. Система по п. 23, где полученный водород потребляется в устройстве с электрохимическими топливными элементами или сжигается для получения пара для выработки энергии или пара для извлечения нефти.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ
(измененная на международной стадии)

1. Способ получения водорода из нефтяного пласта, при этом способ предусматривает:
 - a. обеспечение скважины от поверхности до пласта;
 - b. размещение в скважине по меньшей мере одной мембраны, проницаемой для водорода;
 - c. нагревание пласта для облегчения протекания по меньшей мере одной из реакций газификации, конверсии водяного газа и акватермолиза между нефтяными углеводородами и водой внутри пласта с образованием газового потока, содержащего водород, и
 - d. приведение в контакт газового потока с по меньшей мере одной мембраной, проницаемой для водорода, таким образом, что по меньшей мере одна мембрана, проницаемая для водорода, обеспечивает прохождение на поверхность из газового потока только водорода.

2. Способ по п. 1, где стадия нагревания пласта предусматривает нагнетание окисляющего средства в пласт для окисления по меньшей мере некоторой части нефтяных углеводородов внутри пласта.

3. Способ по п. 1, где стадия нагревания пласта предусматривает генерирование электромагнитных или радиочастотных волн с помощью электромагнитной или радиочастотной антенны, расположенной внутри пласта.

4. Способ по п. 1, где стадия нагревания пласта предусматривает нагнетание горячего материала в пласт.

5. Способ по п. 1, где стадия нагревания пласта предусматривает генерирование тепла посредством применения системы резистивного (омического) нагрева, расположенной внутри пласта.

6. Способ по п. 1, где по меньшей мере одна мембрана, проницаемая для водорода, содержит по меньшей мере одно из: палладия (Pd), ванадия (V), тантала (Ta) или ниобия (Nb).
7. Способ по любому из пп. 1-6, где по меньшей мере одна мембрана, проницаемая для водорода, содержит сплав палладий-медь.
8. Способ по любому из пп. 1-7, где по меньшей мере одна мембрана, проницаемая для водорода, содержит керамический слой.
9. Способ по п. 7, где по меньшей мере одна мембрана, проницаемая для водорода, содержит керамический слой с внутренней или с внешней стороны относительно сплава палладий-медь.
10. Способ по любому из пп. 1-5, где по меньшей мере одна мембрана, проницаемая для водорода, содержит керамический слой и слой, отличный от керамического, выбранный из группы, состоящей из палладия, ванадия, тантала, ниобия, меди, сплавов этих материалов и их комбинаций.
11. Способ по п. 10, где слой, отличный от керамического, содержит сплав палладий-медь.
12. Способ по любому из пп. 1-5, где по меньшей мере одна мембрана, проницаемая для водорода, расположена в скважине внутри пласта.
13. Способ по любому из пп. 1-5, где по меньшей мере одна мембрана, проницаемая для водорода, расположена в скважине вблизи пласта.
14. Способ по любому из пп. 1-5, где в скважине расположен пористый материал для поддержки внутри скважины по меньшей мере одной мембраны, проницаемой для водорода.

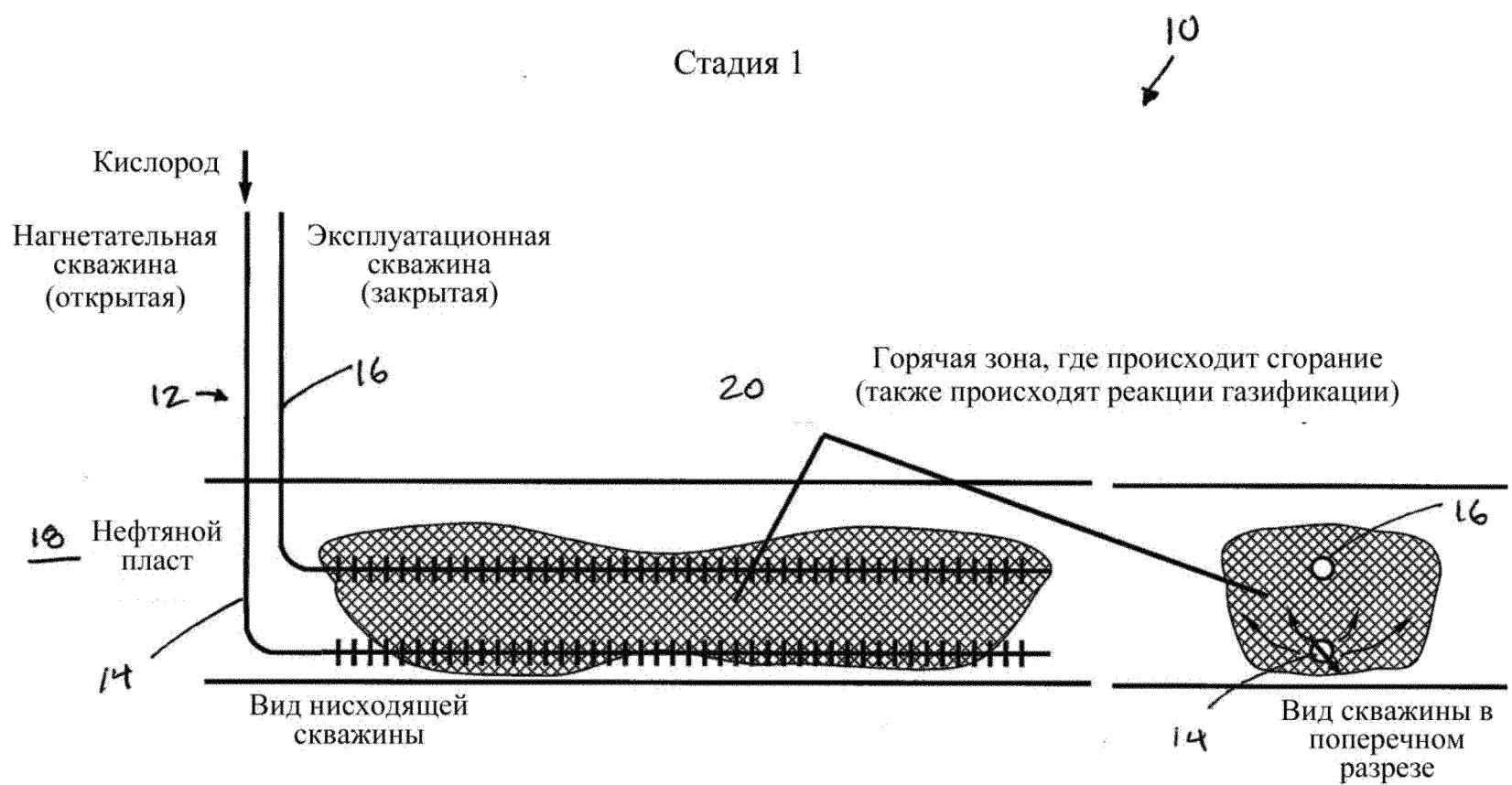
15. Способ по п. 14, где пористый материал представляет собой пористую сталь.
16. Способ по любому из пп. 1-5, предусматривающий после стадии нагревания пласта дополнительную стадию задержки приведения в контакт газового потока с по меньшей мере одной мембраной, проницаемой для водорода, для обеспечения дальнейшего получения водорода.
17. Способ по п. 16, где стадия задержки предусматривает задержку в течение периода в диапазоне от 1 недели до 12 месяцев.
18. Способ по п. 17, где задержка соответствует периоду в диапазоне от 1 недели до 4 недель.
19. Способ по п. 3, где для стадии нагревания пласта применяется диэлектрическое нагревание, при этом электромагнитное излучение характеризуется частотой в диапазоне от 60 Гц до 1000 ГГц.
20. Способ по п. 19, где электромагнитное излучение характеризуется частотой в диапазоне от 10 МГц до 10 ГГц.
21. Способ по п. 5, где для нагрева пласта до температур в диапазоне от 200 до 800 градусов Цельсия применяется система резистивного (омического) нагрева.
22. Способ по п. 21, где температура находится в диапазоне от 400 до 700 градусов Цельсия.
23. Система для извлечения водорода из нефтяного подповерхностного пласта, при этом система содержит:
 - устройство для нагревания пласта с целью образования газового потока, содержащего водород;

скважину, расположенную в пласте; и мембрану в скважине, проницаемую для водорода, выполненную с возможностью прохождения через нее водорода из газового потока, однако препятствующую прохождению через нее других газов из газового потока для обеспечения извлечения водорода через скважину на поверхность.

24. Система по п. 23, где устройство для нагревания пласта содержит по меньшей мере одно из нагнетателя окисляющего средства, электромагнита, радиочастотной антенны и нагнетателя горячего материала.

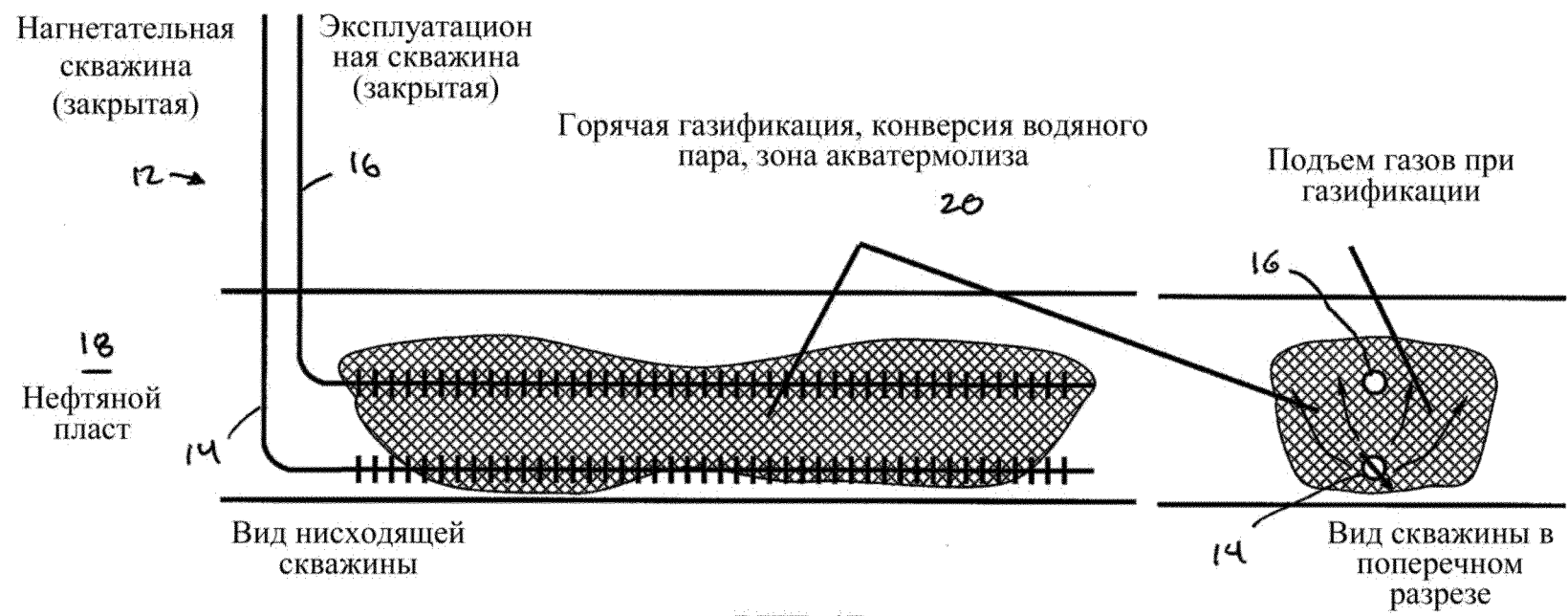
25. Система по п. 23, где полученный водород потребляется в устройстве с электрохимическими топливными элементами или сжигается для получения пара для выработки энергии или пара для извлечения нефти.

26. Система по п. 23, где полученные оксиды углерода, образующиеся в результате осуществления способа, остаются в пласте и являются изолированными в нем, что обеспечивает способ получения энергии из безуглеродных источников.



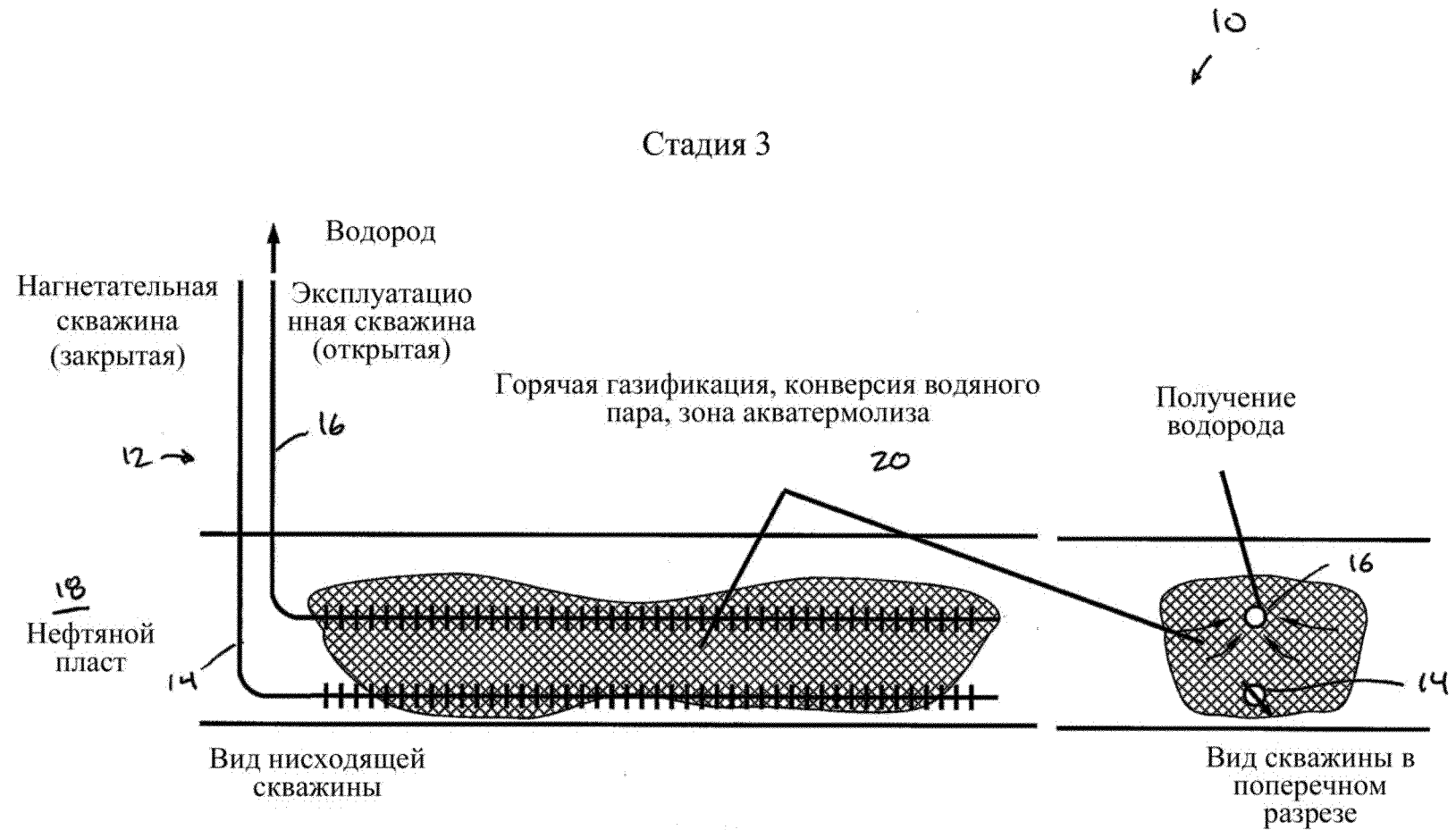
ФИГ. 1А

Стадия 2

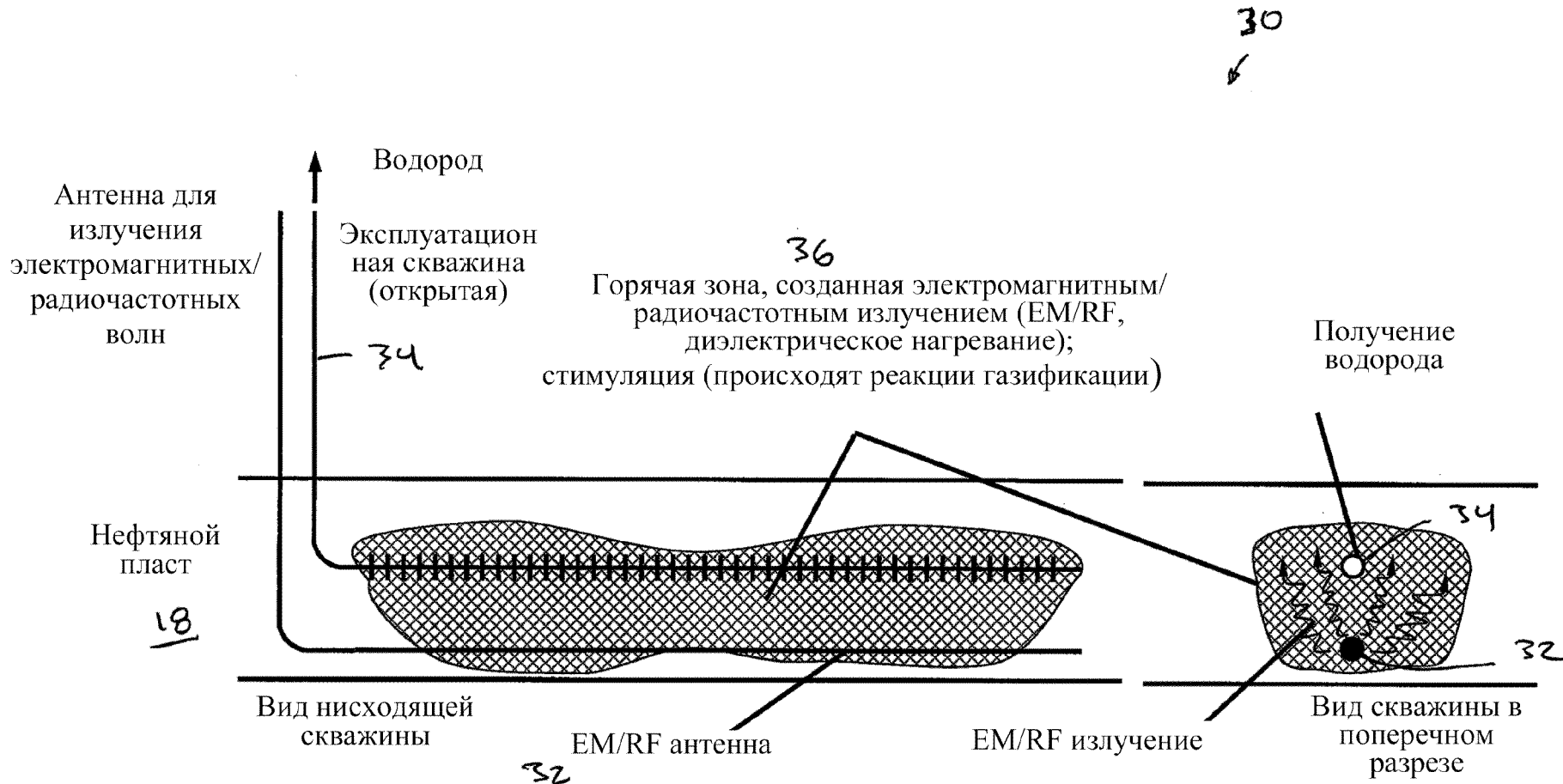


ФИГ. 1В

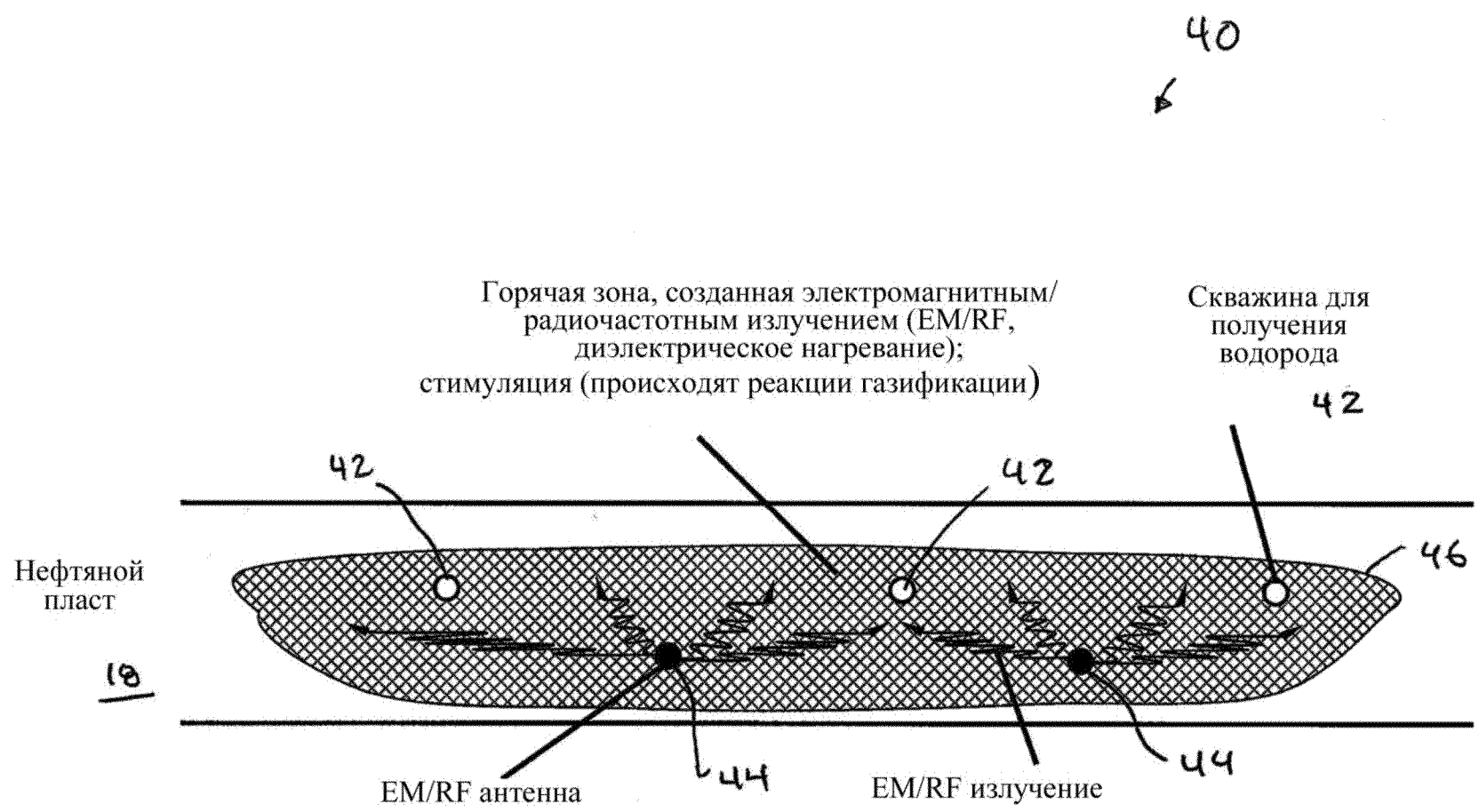
Стадия 3



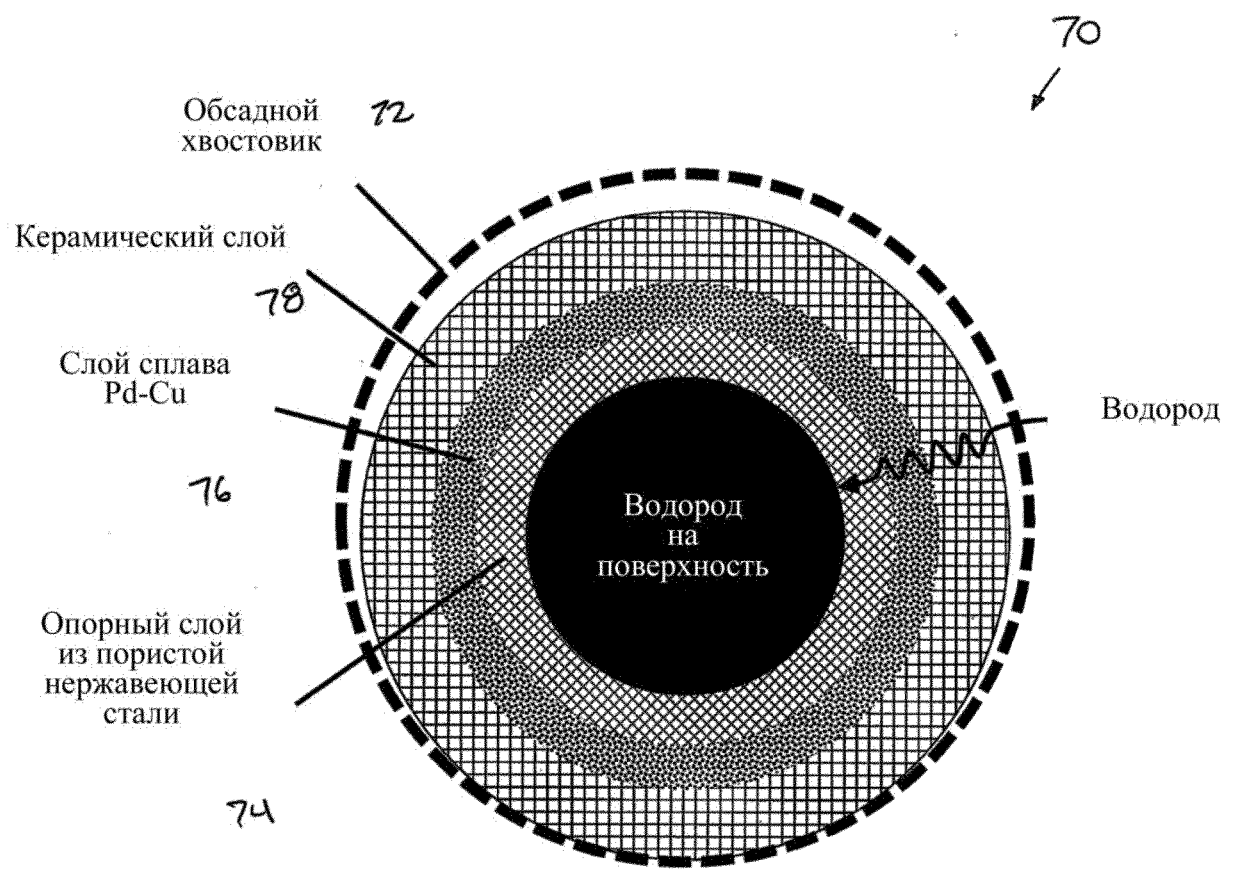
ФИГ. 1С



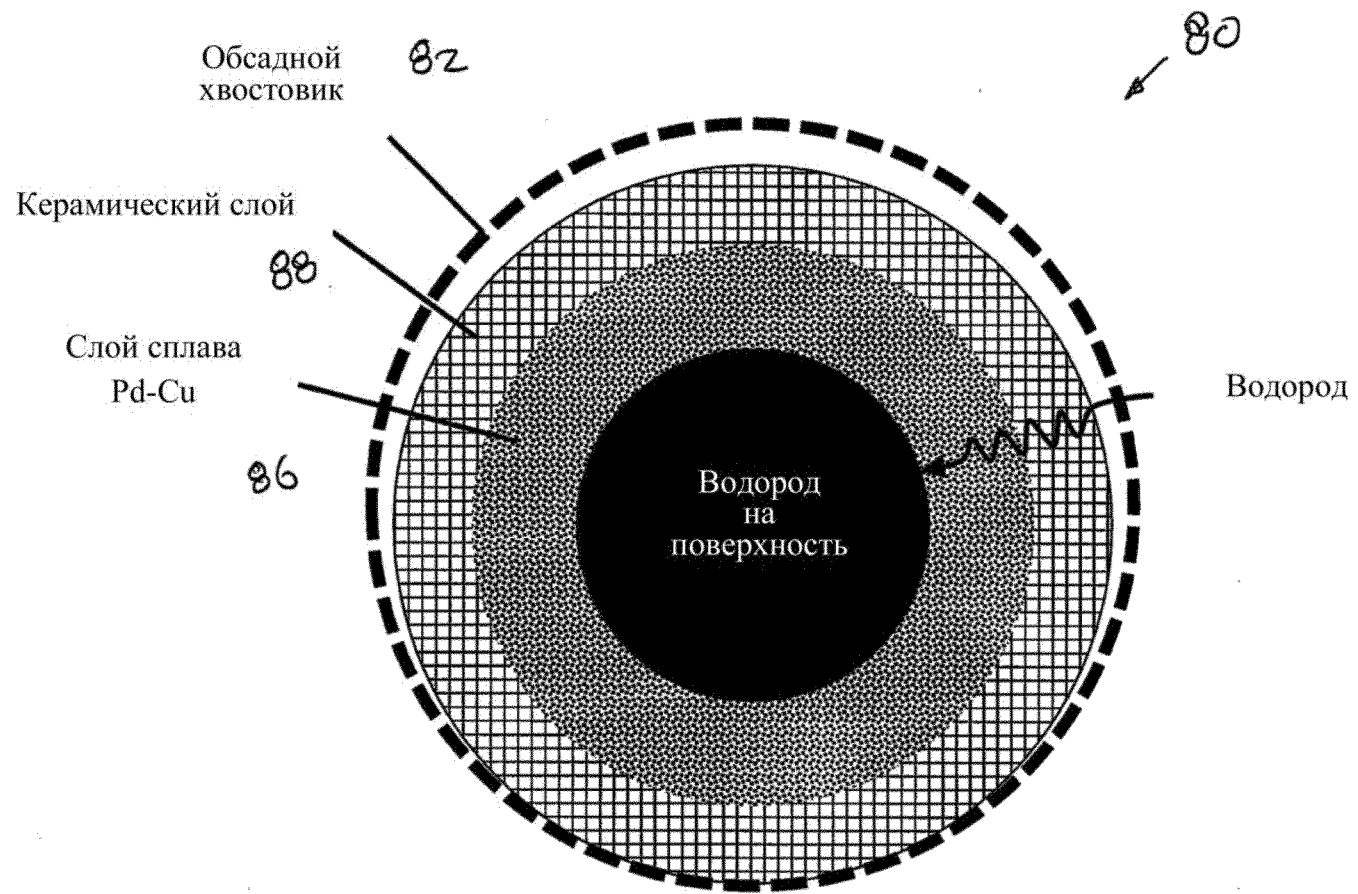
ФИГ. 2



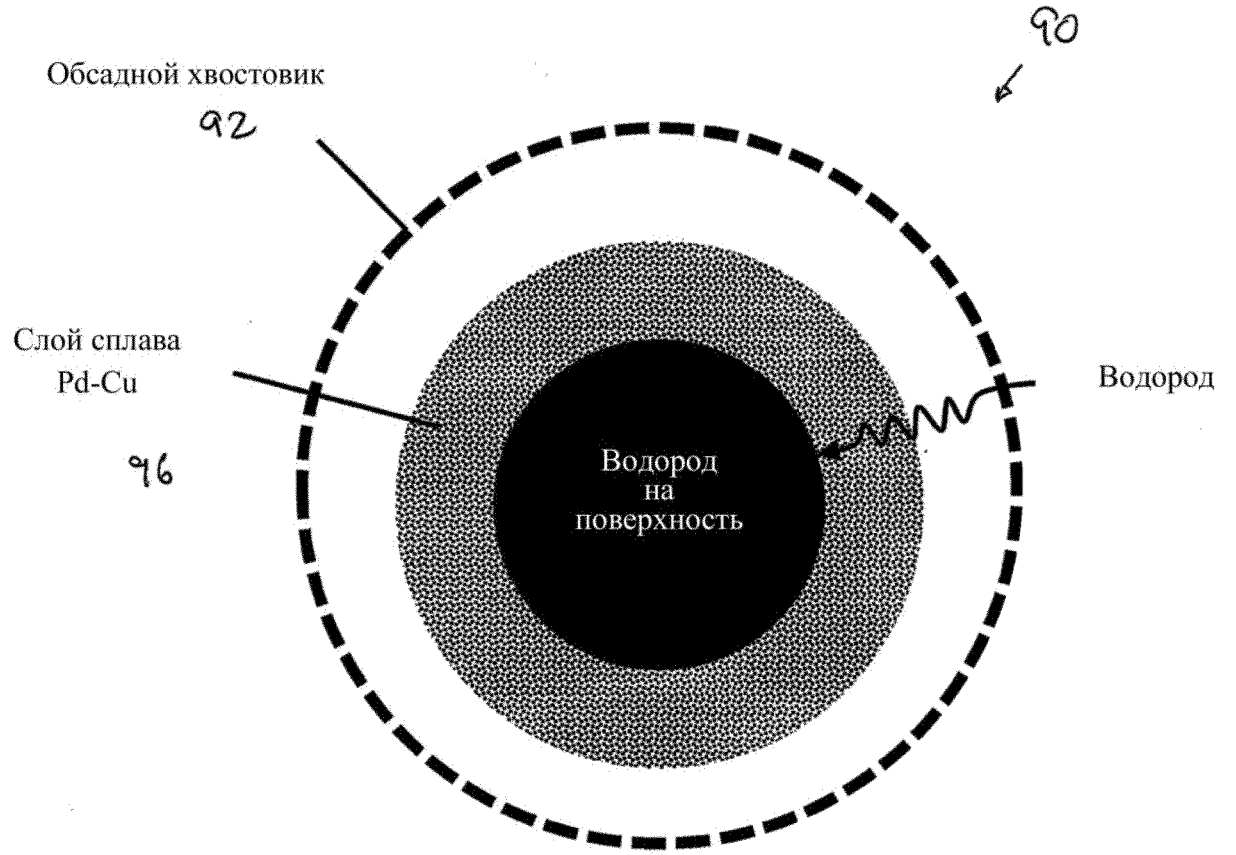
ФИГ. 3



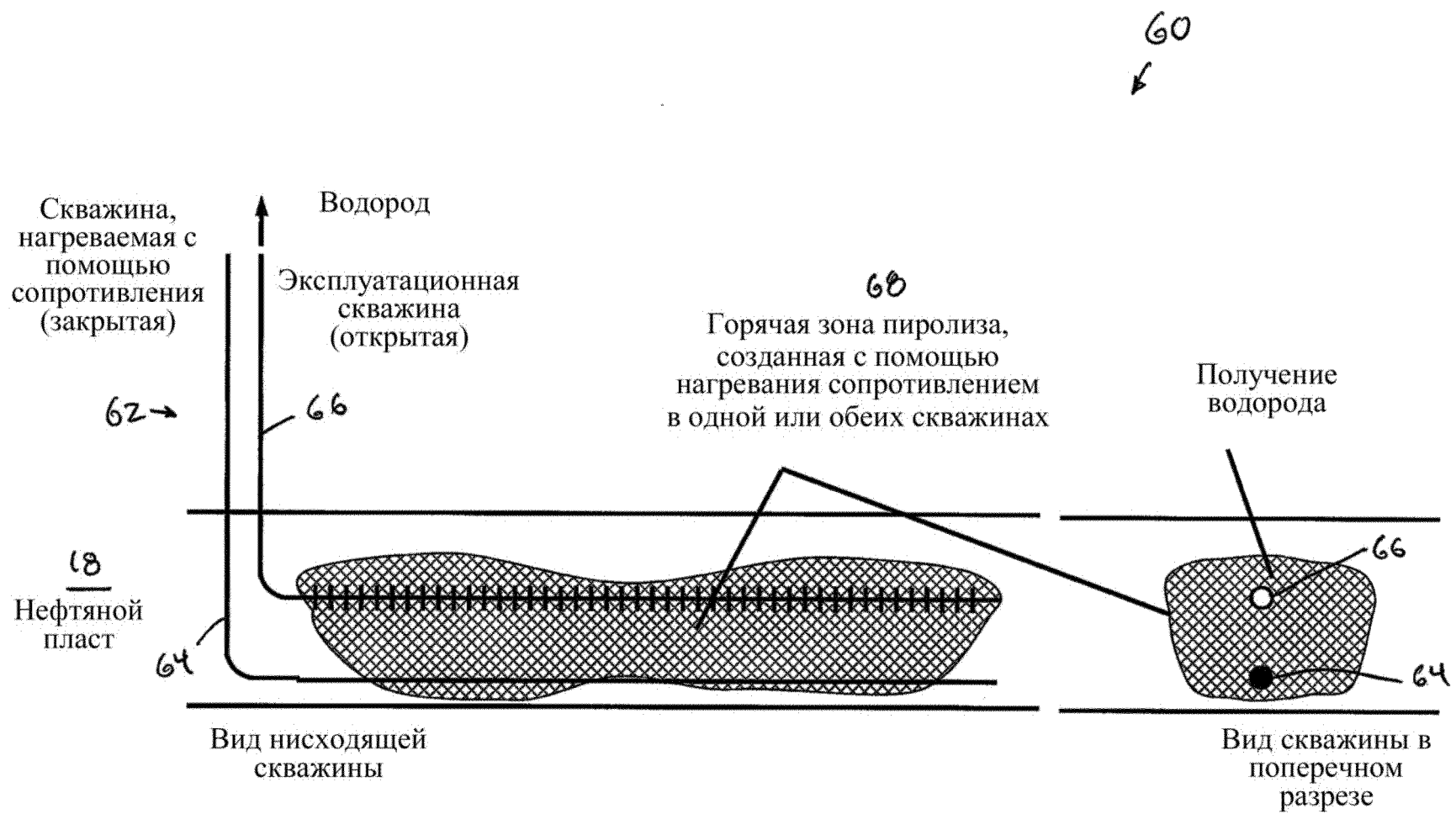
ФИГ. 4А



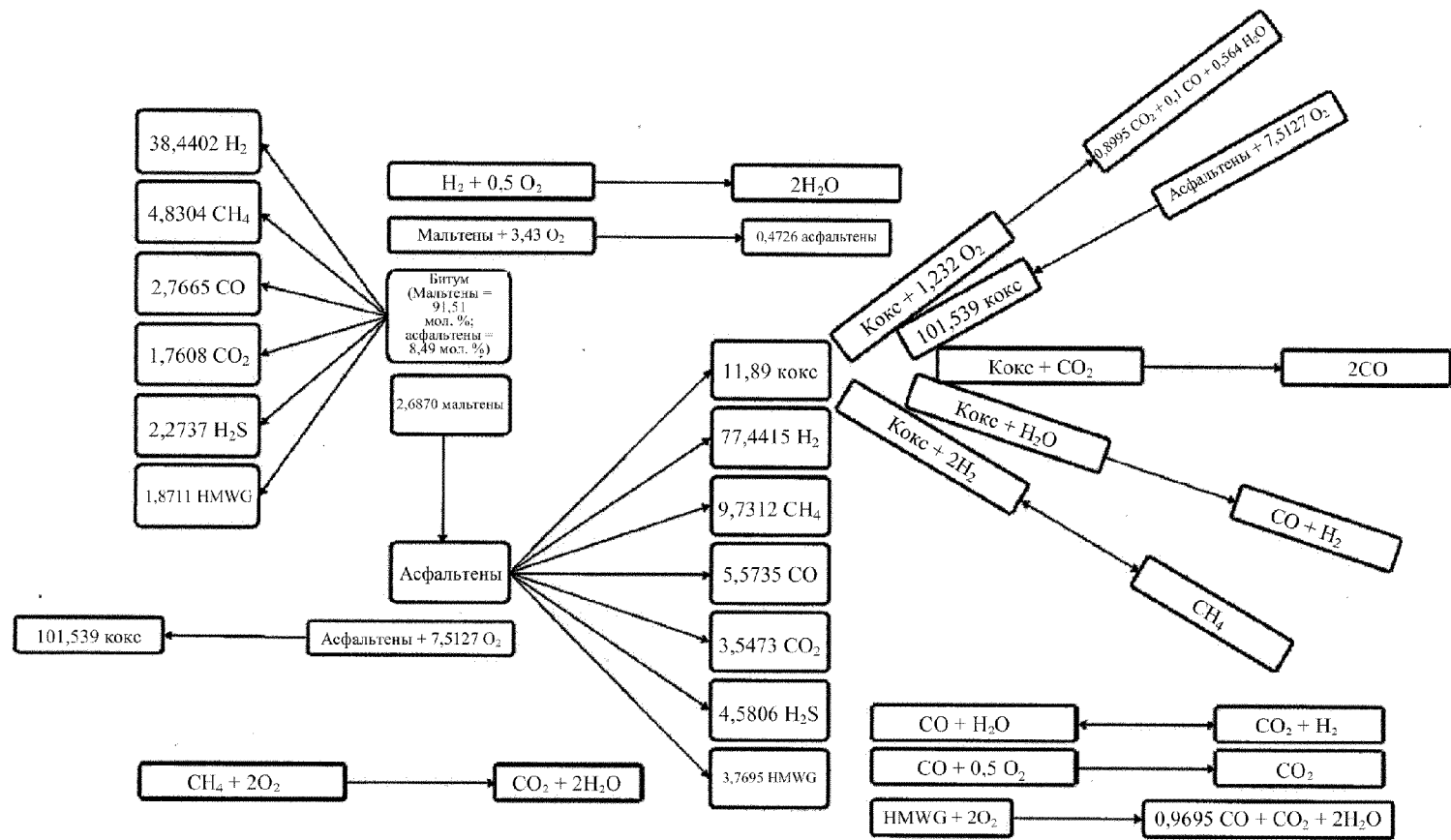
ФИГ. 4В



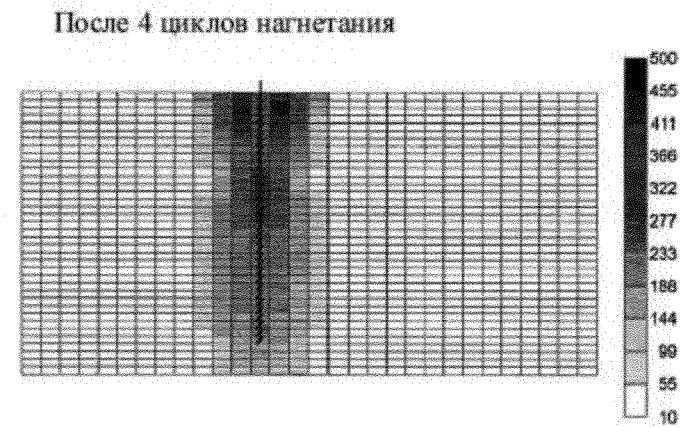
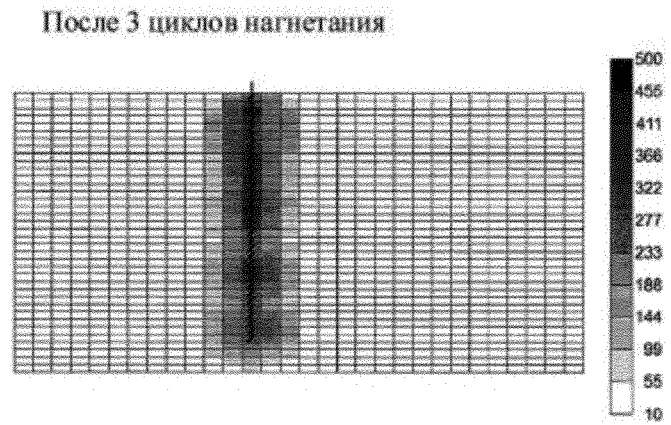
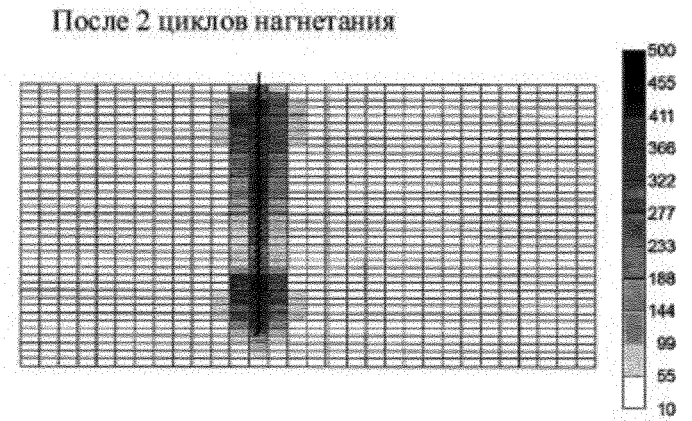
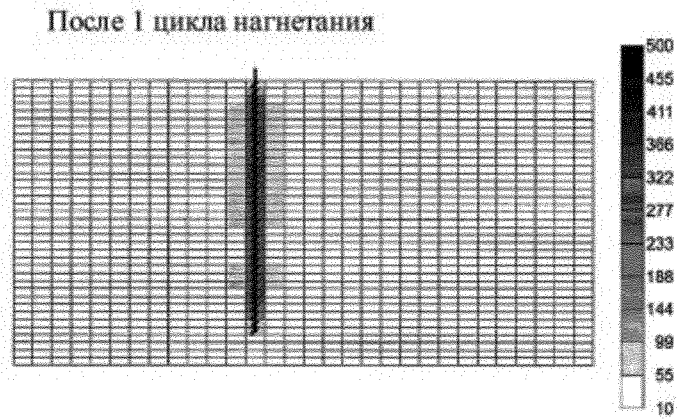
ФИГ. 4С



ФИГ. 6

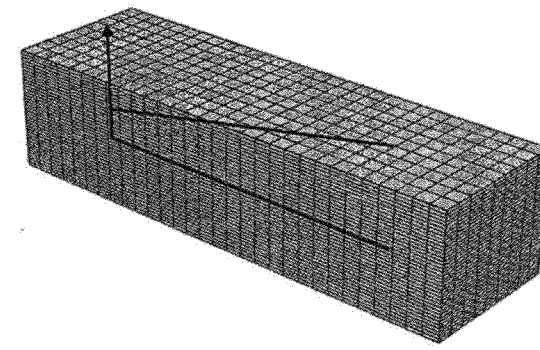
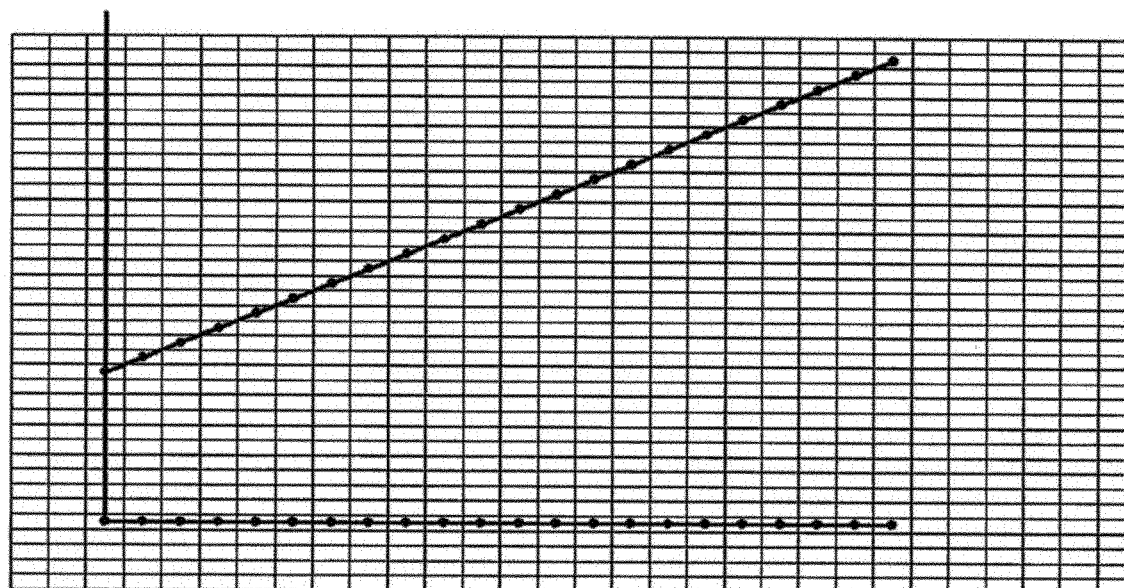


ФИГ. 7

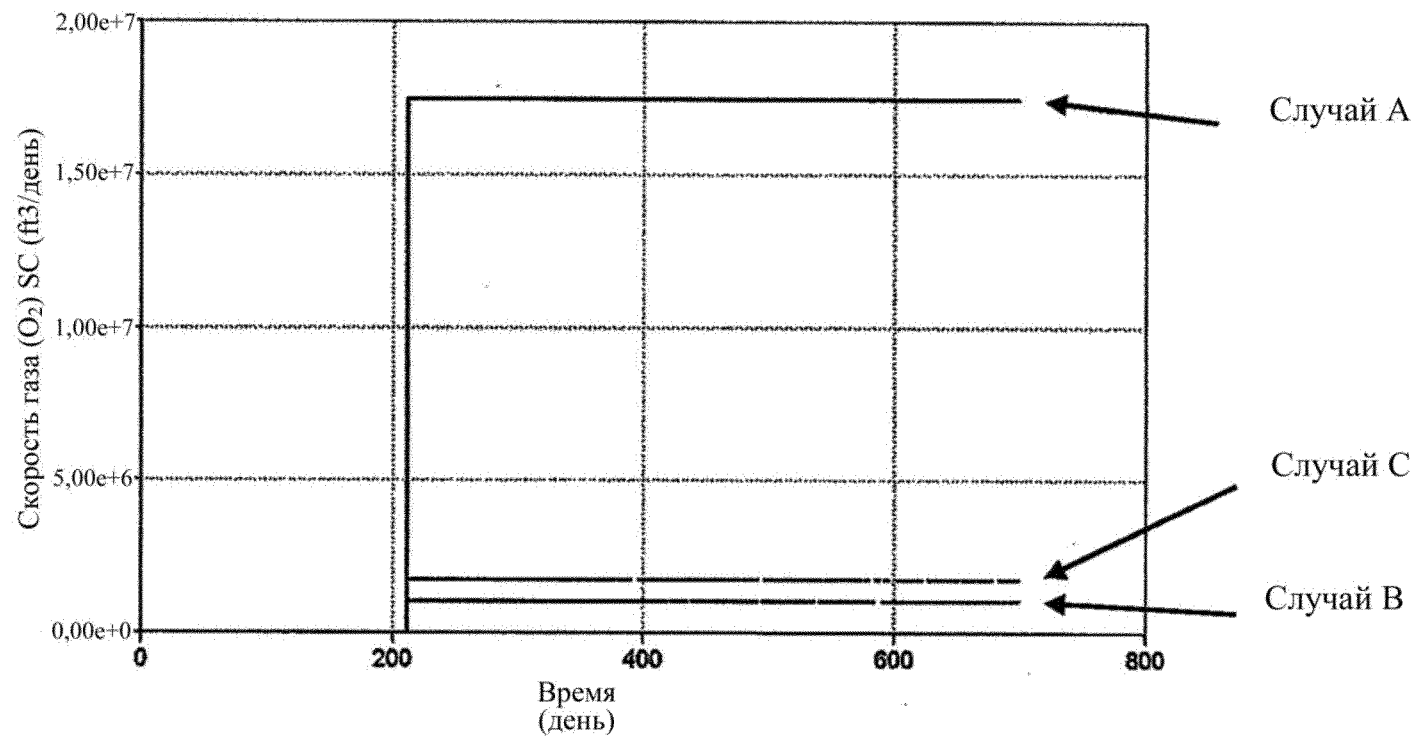


ФИГ. 8В

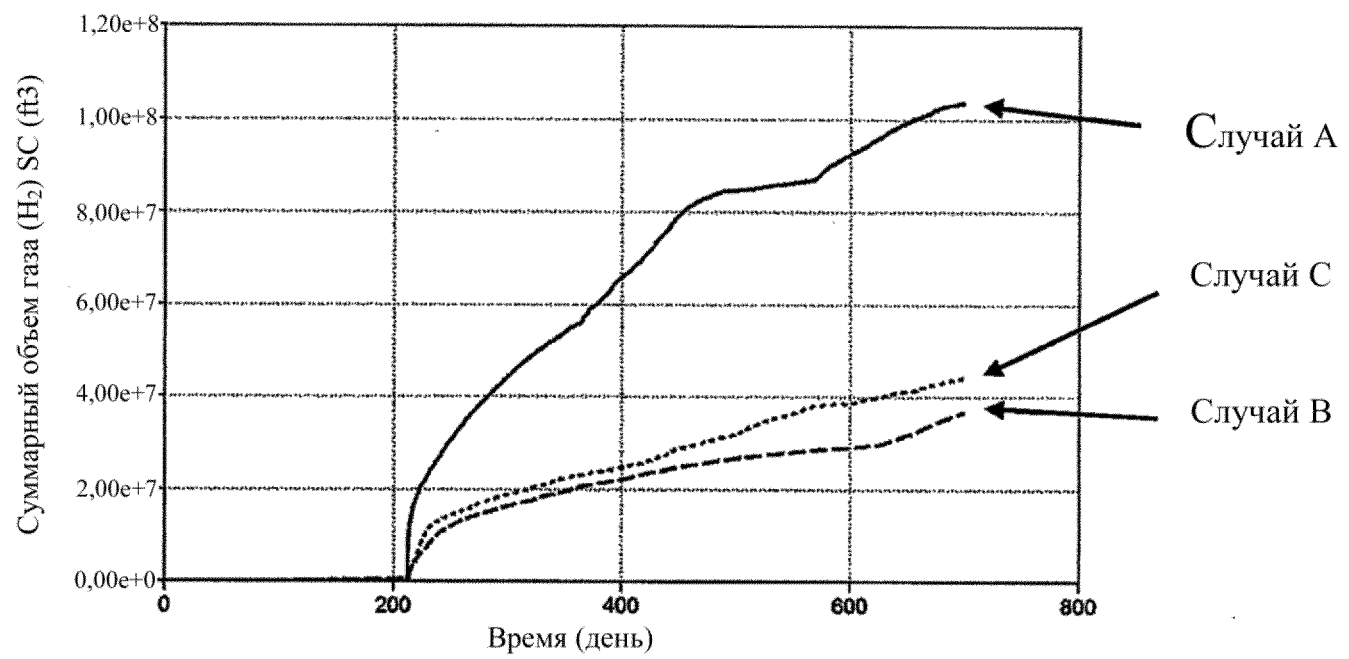
Случаи А, В, С конфигурации скважин



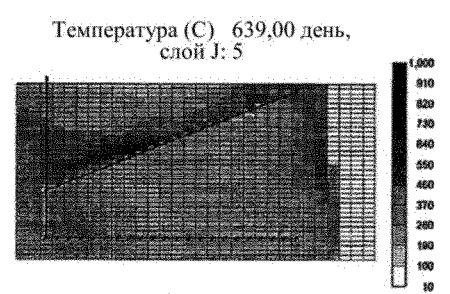
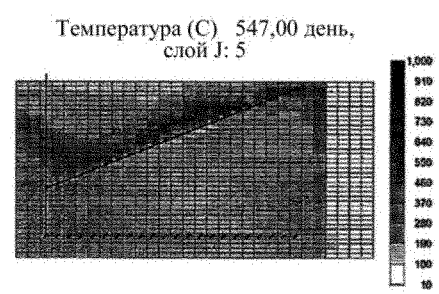
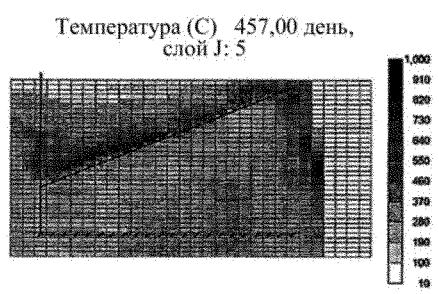
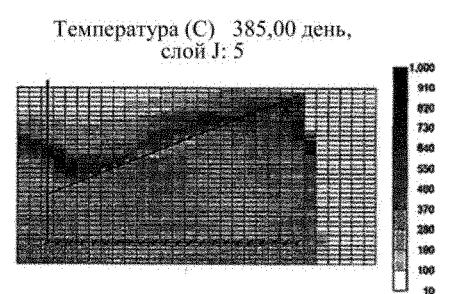
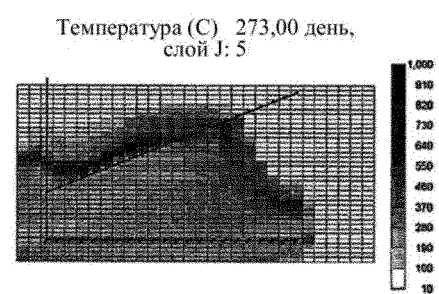
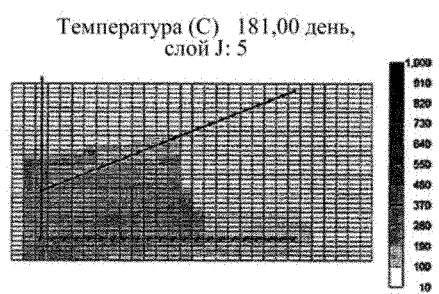
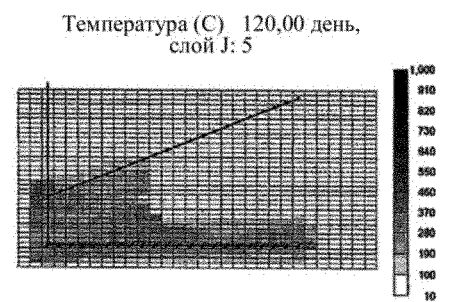
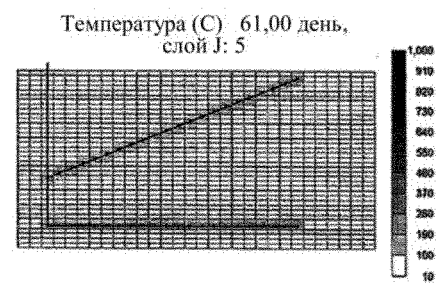
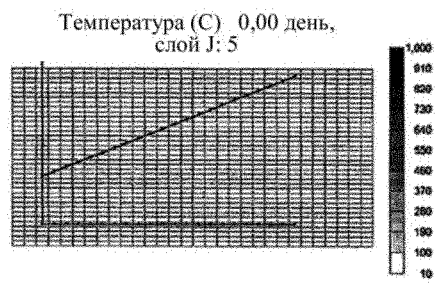
ФИГ. 9А



ФИГ. 9В



ФИГ. 9С



Случай А

ФИГ. 9D