

(19)



Евразийское
патентное
ведомство

(21) 202390265 (13) A1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки
2023.03.14

(22) Дата подачи заявки
2021.07.01

(51) Int. Cl. C06B 33/00 (2006.01)
C06B 45/00 (2006.01)
C09K 8/42 (2006.01)
E21B 29/02 (2006.01)
E21B 33/13 (2006.01)

(54) ШИХТА ТЕРМИТНОЙ РЕАКЦИИ, СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХФАЗНОГО СКВАЖИННОГО БАРЬЕРА МЕЖДУ ГОРНЫМИ ПОРОДАМИ И СКВАЖИННЫЙ БАРЬЕР, СФОРМИРОВАННЫЙ ИЗ НЕЕ

(31) 20200795

(32) 2020.07.07

(33) NO

(86) PCT/EP2021/068268

(87) WO 2022/008355 2022.01.13

(71) Заявитель:

ИНТЕРВЕЛЛ П энд А АС (NO)

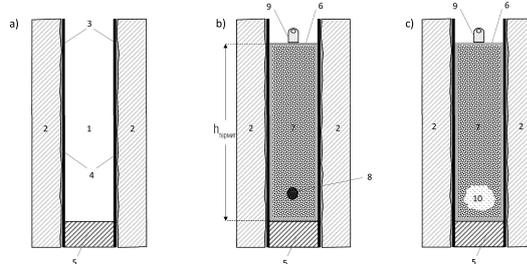
(72) Изобретатель:

Тёндель Стиан, Вилкинсон Даррен
Джеймс, Рустен Торгейр (NO)

(74) Представитель:

Медведев В.Н. (RU)

(57) Данное изобретение относится к шихте термитной реакции, содержащей оксид висмута и алюминий, адаптированной с возможностью реагировать со скоростью реакции, обеспечивающей время реакции от 8 до 15 с для шихты термитной реакции весом от 30 до 100 кг от момента инициализации шихты термитной реакции до реагирования по меньшей мере 90% шихты термитной реакции, к способу создания трехфазного барьера между породами с применением шихты термитной реакции, а также к скважинному барьеру, сформированному из нее.



202390265
A1

202390265
A1

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

2420-577176EA/081

ШИХТА ТЕРМИТНОЙ РЕАКЦИИ, СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХФАЗНОГО СКВАЖИННОГО БАРЬЕРА МЕЖДУ ГОРНЫМИ ПОРОДАМИ И СКВАЖИННЫЙ БАРЬЕР, СФОРМИРОВАННЫЙ ИЗ НЕЕ

Область изобретения

Настоящее изобретение относится к способу и пробке для окончательного тампонирувания и ликвидации скважин в подземные месторождения углеводородов.

Уровень техники

Месторождения нефти и газа являются далеко не пустыми, когда перестают быть коммерчески выгодны для нефтегазовой промышленности. Поэтому со временем может произойти утечка значительного количества углеводородов через открытые скважины в залежи углеводородов. В связи с этим государственные нормативные акты требуют от нефтяных и газовых операторов окончательно ликвидировать свои скважины в месторождение при прекращении его разработки. Ежегодно в мире бурят около 40000 нефтяных и газовых скважин [Ссылка 1]. Это в конечном итоге приводит к тому, что огромное количество скважин нуждается в окончательном тампонирувании перед ликвидацией.

Нефтяные и газовые скважины обычно бурят последовательными участками с постепенным уменьшением диаметра ствола для каждого последующего участка по направлению вниз в землю. Во время бурения ствол скважины обычно заполняют буровым раствором. После того, как участок пробурен, стальную трубу (часто называемую обсадной колонной) с несколько меньшим наружным диаметром, чем внутренний диаметр скважины, вставляют до самого дна скважины. Затем смесь цементного порошка и воды (без гравия) закачивают через обсадную колонну вниз на дно скважины и продавливают дальше в кольцевое пространство между обсадной колонной и стенкой скважины, чтобы вытеснить буровой раствор и заделать колонну в твердый цемент (часто обозначаемый как обсадной цемент), герметизируя кольцевое пространство и делая прочным соединение между обсадной колонной и стволом скважины. Обсадной цемент может распространяться только на ограниченное расстояние вверх в кольцевом пространстве или полностью доходить до поверхности. Если цемент обсадной колонны проходит только часть расстояния, оставшуюся часть кольцевого пространства обычно заполняют буровым раствором.

После того, как участок скважины завершен обсадной колонной и цементом, бурят следующий участок скважины несколько меньшего диаметра, чем предыдущий, и выполняют ту же процедура с установкой обсадной трубы и введением цемента. Вторая обсадная труба обычно проходит весь путь от устья скважины до забоя скважины, что приводит к расположению «труба в трубе» внутри первой обсадной трубы. Перед достижением целевого пласта (пластов) может быть несколько последовательных участков ствола скважины, приводящих к нескольким коаксиальным обсадным колоннам

по типу «труба в трубе», каждая из которых имеет обсадной цемент, как схематично показано на ФИГ. 1. Обсадной цемент показан в виде серых, затененных областей. В этом примере использовано три коаксиальные обсадные колонны. Между обсадными колоннами образуется кольцевое пространство. Обычно первое кольцевое пространство между центральной обсадной колонной и следующей обсадной колонной обозначают как А-кольцевое пространство, следующее кольцевое пространство как В-кольцевое пространство и т.д. В случае добывающих скважин, как правило, имеется расположенная в центре эксплуатационная насосно-компрессорная труба, проходящая от устья скважины вниз в углеводородсодержащий(е) пласт(ы). Обсадной цемент будет изолировать каждое кольцевое пространство в конструкции скважины.

Окончательный скважинный барьер должен проходить по всему поперечному сечению скважины и герметизировать все кольцевые пространства как по вертикали, так и по горизонтали. В нескольких законодательных актах требуется создание, по меньшей мере, двух скважинных барьеров при окончательном тампонировании ствола скважины. Материалы, используемые в элементах скважинного барьера, должны обладать рядом свойств, таких как (но без ограничения ими) очень низкая проницаемость, долговременное постоянство объема, химическая и физическая стойкость к скважинным флюидам, отсутствие хрупкости и достаточное сцепление с пластом.

Таким образом, начальным этапом работ по тампонированию и ликвидации скважин (Р&А) является оценка и определение места установки пробки/пробок. При такой оценке учитывают конфигурацию скважины, глубины, наклоны, нитки обсадных труб, обсадные цементы, боковые стволы, стратиграфические последовательности ствола скважины и другие факторы с целью поиска подходящего места в скважине для формирования барьера. Ключевым фактором является обнаружение совместимого с барьером пласта, который также обладает достаточными свойствами перекрывающей породы [ссылка. 2, стр. 19].

Предшествующий уровень техники

В настоящее время портландцемент является основным барьерным материалом, используемым в нефтяной промышленности для зональной изоляции и окончательной ликвидации скважин. Однако портландцемент при схватывании в некоторой степени дает усадку, что может привести к образованию кольцевых микрозон на границе раздела между скважинным барьером и пластом. Существуют также опасения, связанные с хрупкостью цемента при нанесении на проявляющие ползучесть пласты, с микропористостью, которая может приводить к миграции газа через элемент скважинного барьера, а также с длительной деградацией при высоких температурах, что побуждает поиск альтернативных портландцементу материалов [см. 2, стр. 110].

Одними из альтернативных барьерных материалов являются металлы/сплавы. Легкоплавкие металлы, такие как сурьма, висмут и галлий, а также эвтектические сплавы, предложены для применения при окончательном тампонировании. Из них особое внимание уделено металлическому висмуту и его сплавам. Висмут представляет собой

хрупкий металл, легко ломается при комнатной температуре, имеет плотность 9,78 г/см³ при 25°C, температуру плавления 272°C, температуру кипения 1560°C, расширяется при затвердевании и довольно устойчив к коррозии, будучи устойчивым как к кислороду, так и к воде.

Сплавы на основе висмута, имеющие низкую температуру плавления, уже давно используют в нефтяной промышленности в уплотнениях типа металл-металл. Есть два разных метода размещения сплавов на основе висмута: опускание сплава в расплавленном состоянии в контейнер и выливание его на нужную глубину или опускание сплава в твердом состоянии и плавление его в скважине на нужной глубине. Второй метод наиболее распространен и проводится разными способами, включающими: однократный нагрев в скважине с применением электрического сопротивления или электромагнитной индукции, экзотермическую химическую реакцию *in situ* или закачивание нагретого пара. Одной из проблем, связанных со сплавами на основе висмута, является контроль вертикального распространения тепла во время установки пробки, когда применяют экзотермическую реакцию *in situ*. В недавних разработках в качестве способа установки пробки из сплава висмута используют операцию, осуществляемую при помощи инструмента, спускаемого на канате. Пробковый узел состоит из четырех основных частей: системы зажигания, кожуха из сплава, внутренней трубки и юбки. Внутренняя трубка, заполненная термитом, проходит через кожух из сплава висмута. При воспламенении в результате термитной реакции выделяется тепло, и оболочка из сплава висмута при нагревании плавится. Поскольку расплавленный сплав висмута имеет высокую плотность и его положение не сохраняется, юбка обеспечивает механическую поддержку до тех пор, пока пробка из сплава висмута не остынет и не затвердеет. При применении этого метода более эффективно достигается радиальный и вертикальный контроль нагрева [Ссылка 2, стр. 127].

Патентный документ EP 2857634 B1 раскрывает оправочный инструмент, предназначенный для вставки в трубу, подлежащую герметизации, и который образует пробку за счет плавления и отверждения эвтектического сплава, переносимого на круглых фланцах, приспособленные покрывать площадь поперечного сечения кольцевого пространства, образованного между герметизируемой трубой и оправочным инструментом. За счет образования пробки из сплава висмута, закрывающей внутреннюю часть трубы в том месте, где в трубе есть обсадный цемент, скважина становится полностью герметичной. Аналогичное решение известно из документа EP 3029261 A1. В этих документах сообщается, что может быть применена термитная смесь в качестве источника тепла для плавления эвтектического сплава, формирующего пробки.

Патентный документ GB 2563552B раскрывает использование заглушающего агента в термитной смеси из частиц Fe₂O₃ и Al для получения более равномерного нагревания для нагревателей, применяемых в скважинных работах. Заглушающий агент может присутствовать в количестве от 5 до 35% масс. и состоит из связующего агента, который поддерживает твердую форму во время термитной реакции. В документе

сообщается, что использование 30% масс. заглушающего агента может понизить температуру реакции примерно с 2500°C (нулевое количество заглушающего агента) приблизительно до 600°C.

Может потребоваться создание поперечного барьера по всему стволу скважины, также известного как барьер между породами (от породы к породе), при окончательном тампонировании и ликвидации скважины, что делает необходимым полный доступ к пласту. В нефтяной промышленности применяют разные способы, такие как резка и вытягивание, фрезерование обсадных труб и фрезерование секций, для удаления насосно-компрессорных труб, бурильных труб и забойных блоков, чтобы получить доступ к горной породе. Извлечение такого забойного оборудования скважины подвергает персонал риску, связанному с охраной труда, увеличивает время работы и влечет за собой затраты, связанные с надлежащим обращением и утилизацией извлеченного оборудования [Ссылка. 2, стр. 224]. Удаление забойного оборудования скважины может также требовать применения буровой установки для развертывания, эксплуатации и извлечения требуемых режущих и/или фрезерных инструментов.

Известно применение термита для выполнения окончательных R&A операций без буровой установки и эффективно путем применения термитной смеси, выделяющей достаточно тепла, чтобы расплавить или сжечь оставшееся скважинное оборудование, чтобы обнажить горную породу.

Термит представляет собой смесь оксида, обычно тонкодисперсного оксида металла, и (элементарного) горючего металла, где металл оксида находится выше в электродвижущей цепи, чем горючий металл. При воспламенении происходит чрезвычайно экзотермическая реакция однократного замещения:



где A и B представляют собой металлы, и B представляет собой «горючий металл», находящийся выше A в электродвижущей цепи. Выделение тепла во время термитной реакции обычно достаточно для получения металла A и оксида BO в жидком состоянии. В этой концепции выбирают целевой интервал в стволе скважины, а термитную смесь наносят на мостовую пробку или другую основу, установленную в насосно-компрессорной трубе, а затем воспламеняют, чтобы расплавить/выжечь все материалы *in-situ* забойного оборудования скважины, а также, как правило, некоторую часть окружающей горной породы. При охлаждении возникает отвержденный барьер из материалов и металла *in-situ*, произведенный термитом, как показано на ФИГ. 2. Пример такого решения известен из документа WO 2013/135583.

Патентный документ US 2018/0094504 раскрывает применение для тампонирования и ликвидации (P&A) скважин наноразмерных термитных смесей, имеющих размеры частиц меньше чем 500 нм, предпочтительно меньше чем 200 нм. В документе сообщается, что применение такого мелкодисперсного термита имеет преимущество более низких температур воспламенения, что облегчает внутрискважинное воспламенение, и что такие термитные смеси демонстрируют оптимальную скорость

реакции, способствующую выработке газа вместо температуры. Быстрое выделение газа повышает давление и скорость горения, а, следовательно, обеспечивает повышенную теплопередачу к поверхности ствола скважины и обсадных колонн. Это позволяет использовать меньшие количества нанотермита, которые могут быть применены для достижения такой же степени плавления, что в случае более крупного термита.

Патентный документ US 9494011 B1 раскрывает герметизацию скважин с помощью термитной композиции из оксида железа и алюминия, разбавленной до 75% масс. оксидом алюминия (Al_2O_3), с целью замедления реакции до скорости горения меньше чем 1 см/сек по сравнению со скоростью горения от 10 до 100 см/сек для неразбавленного термита из оксида железа (III) и алюминия. Медленная скорость горения снижает пиковую температуру реакции до меньше чем $1700^{\circ}C$ (по сравнению с почти $3000^{\circ}C$ для неразбавленного термита) и уменьшает образование газа до очень низких уровней, что позволяет сдерживать термитную реакцию. Также раскрыто применение статической массы 500-1500 кг поверх термитной шихты, чтобы уменьшить пористость формируемой пробки. В документе раскрыто использование двух или нескольких термитных шихт, помещенных одна поверх другой, где самая нижняя шихта сильно разбавлена, чтобы только нагревать обсадную колонну до мягкого состояния, чтобы она прижималась к горной породе, и где верхняя(ие) термитная(ые) шихта(ы) разбавлена(ы) в меньшей степени, чтобы давать достаточное количество тепла для плавления обсадной колонны и формирования скважинного барьера между породами.

Патентный документ US 7640965 B2 раскрывает использование расширяющегося сплава висмута, галлия или сурьмы для герметизации кольцевого пространства между коаксиальными трубами путем размещения элемента из расширяющегося сплава на выступе в кольцевом пространстве, а затем путем прикладывания тепла для плавления расширяющегося сплава. Расширяющийся сплав всплывает и заполняет пустоту, а затем расширяется при затвердевании и охлаждении до комнатной температуры, образуя прочное соединение и непроницаемое уплотнение кольцевого пространства. Аналогичное решение применяют для герметизации центральной трубы путем установки вначале мостовой пробки из цемента или другого термостойкого материала, а затем вставки элемента из расширяемого сплава, который нагревают до жидкого состояния, а затем дают затвердеть. В одном типичном варианте осуществления элемент из расширяемого сплава представляет собой термитную смесь из частиц Bi_2O_3 и Al, которая воспламеняется и реагирует на месте с образованием скважинного барьерного элемента из висмута.

Цель изобретения

Основной задачей изобретения является разработка способа формирования без буровой установки постоянного трехфазного поперечного скважинного барьера по типу «порода-к-породе» и скважинного барьера, изготовленного данным способом.

Описание изобретения

Изобретение основано на понимании того, что за счет применения термита из оксида висмута и горючего металла и адаптации кинетики термитной реакции к окну

определенных параметров, термитную реакцию заставляют длиться достаточно долго и давать достаточно тепловой энергии для эффективного расплавления обсадной колонны и соседнего оборудования скважины на протяжении относительно длинного интервала, давая жидкий продукт реакции и подвергая горную породу воздействию формирующих барьер жидких продуктов. Жидкий продукт реакции содержит три несмешивающиеся фазы: металлический висмут, сталь от обсадной колонны/подземного оборудования скважины и шлаковая фаза из оксида алюминия и возможных расплавленных обсадного цемента, пластового песка и т.д., которые разделены из-за разности плотностей на нижнюю фазу висмута, промежуточную фазу стали и верхнюю фазу шлака. Когда система охлаждается, отделенные жидкие фазы затвердевают в структуру в виде сэндвича из трех элементов скважинного барьера от породы к породе. Полученная структура скважинного барьера имеет преимущество относительно длинной зоны соединения в направлении горной породы, причем каждая фаза формирует разные типы соединения с горной породой, придавая структуре скважинного барьера более упругое сцепление.

Таким образом, в первом аспекте изобретение относится к способу герметизации скважины с помощью поперечного скважинного барьера между породами, где скважина содержит подземное оборудование скважины, включающее, по меньшей мере, обсадную колонну, причем способ включает:

- установку термостойкой мостовой пробки в самой заглубленной обсадной колонне в месте, где должно быть сформировано уплотнение,
 - размещение несущего термитную шихту инструмента поверх термостойкой мостовой пробки, где несущий термитную шихту инструмент включает внутреннюю камеру, заполненную шихтой термитной реакции, и воспламенитель, и
 - воспламенение шихты термитной реакции,
- отличающийся тем, что:

- способ дополнительно включает применение шихты термитной реакции в соответствии со вторым аспектом изобретения, где шихта термитной реакции находится под давлением, равным давлению *in situ*, по меньшей мере, 5 МПа.

Во втором аспекте изобретение относится к шихте термитной реакции, содержащей оксид висмута Bi_2O_3 и горючий металл, содержащий алюминий, где шихта термитной реакции (7) адаптирована так, чтобы реагировать при скорости реакции, обеспечивающей время реакции от 8 до 15 сек для шихты термитной реакции весом от 30 до 100 кг от момента инициализации шихты термитной реакции до тех пор, пока не прореагирует, по меньшей мере, 90% шихты термитной реакции, предпочтительно от 9 до 14 сек и более предпочтительно от 10 до 13 сек.

Выражение «шихта термитной реакции, находящаяся под давлением, равным давлению *in situ* >5 МПа», используемое в изобретении, означает, что шихта термитной реакции подвергается воздействию давления окружающей среды, по меньшей мере, 5 МПа, когда она находится на месте в скважине, где должен быть сформирован скважинный барьер. Требуемое повышение давления может быть получено за счет

применения несущего термитную шихту инструмента, находящегося под давлением за счет закачки газа или за счет использования поршня и др., прикладываемого давления на термитную шихту и др., или, альтернативно, за счет применения несущего термитную шихту инструмента, давление которого выровнено с давлением окружающей среды в скважине. Последнее может быть достигнуто, например, за счет наличия поршня, который подвергается гидростатическому давлению окружающей среды. Если окружающее давление в скважине в месте, где должен быть сформирован барьер, невелико, давление в скважине может быть повышено путем закачки в скважину газа. Более того, в одном альтернативном варианте могут быть применены газы, первоначально выработанные термитной реакцией, чтобы получить необходимое повышение давления во время реакции основного объема шихты термитной реакции.

Термин «поперечный скважинный барьер между породами», используемый здесь, означает, что элементы скважинного барьера находятся в контакте с горной породой и связаны с ней, а, следовательно, блокируют всю площадь поперечного сечения ствола скважины.

Термин «обсадная колонна», используемый здесь, означает стальную трубу, собранную и вставленную в недавно пробуренный участок скважины для защиты и поддержки потока флюидов. Нижнюю часть (а иногда и всю) обычно удерживают на месте с помощью цемента. В конструкции обсадной колонны могут быть секции с двумя или более коаксиально перекрывающимися обсадными колоннами, разделенными кольцевым пространством, которое может быть или не быть зацементировано в месте, где должна быть сформирована пробка.

Термины «верх», «верхний», «нижний» и «низ», используемые здесь, относятся к относительному положению высоты внутри скважины.

Термин «подземное оборудование скважины», используемый здесь, включает, по меньшей мере, одну обсадную колонну и обсадной цемент, по меньшей мере, герметизирующий участок кольцевого пространства снаружи каждой обсадной колонны, использованной в подземном оборудовании скважины. Если скважина, подлежащая тампонированию, представляет собой добывающую скважину, добывающая труба должна быть удалена заранее, по меньшей мере, на участке, где должен быть сформирован скважинный барьер, чтобы обеспечить возможность вставки несущего термит инструмента.

Термин «термостойкая мостовая пробка в самой заглубленной обсадной колонне», используемый здесь, относится к необходимости наличия основания внутри обсадной колонны для размещения несущего термитную шихту инструмента, которое выдерживает нагревание и несет полученный в результате термитной реакции расплавленный металл/материалы до тех пор, пока они не затвердеют и не образуют элемент(ы) скважинного барьера. Мостовая пробка должна (то есть, должна быть способна) предупреждать падение/оседание расплавленного металла/материалов вниз в самую заглубленную обсадную колонну. Формирование и использование мостовой

пробки/платформы при герметизации скважин с использованием термита хорошо известно специалисту в данной области. В изобретении может быть применена любая известная или возможная мостовая пробка/платформа. Примером подходящей мостовой пробки является механическая мостовая пробка.

Изобретение в соответствии с первым аспектом схематично показано на ФИГ. 3а)-3е). Рисунки представляют собой виды в разрезе сбоку, иллюстрирующие один и тот же сегмент скважины, подлежащей тампонированию, на разных этапах заявляемого процесса тампониования. ФИГ. 3а) показывает участок скважины (1), подготовленный для тампониования и имеющий установленную мостовую пробку (5). В этом примере варианта осуществления скважина (1) проходит вертикально вниз в горную породу (2). Подземное оборудование скважины включает обсадную колонну (3) и обсадной цемент (4). Мостовую пробку (5) устанавливают любым удобным образом. Когда мостовая пробка (5) находится на месте, следующий этап состоит во вставке и размещению несущего термитную шихту инструмента (6). Это показано на ФИГ. 3б). В этом примере варианта осуществления несущий термитную шихту инструмент (6) представляет собой цилиндрический контейнер, выполненный из алюминия, заполненный термитной шихтой (7) из частиц оксида висмута с размером частиц 1-3 мм и частиц алюминия с размером частиц 1-2 мм. Количество алюминия в виде частиц находится в балансе с количеством алюминия в контейнере, чтобы получить стехиометрическое соотношение, или, по меньшей мере, близкое к стехиометрическому соотношению двух молей алюминия на моль оксида висмута. Воспламенитель (8), в данном случае относительно небольшая загрузка тонкодисперсного (в микрометровом интервале) термита, с механизмом нагрева электрическим сопротивлением, расположен в нижней части контейнера, но на некотором расстоянии выше нижней части/пола, чтобы исключить слишком быстрое сквозное расплавление у нижней части несущего термитную шихту инструмента (6), которое создает «маршрут выхода» для частично расплавленных и газообразных продуктов реакции. На верхнем конце несущего термит инструмента имеется стыковочное приспособление для троса (9) или другой механизм крепления для подсоединения троса или другого средства для опускания несущего термитную шихту инструмента до его заданного положения. Длина/высота термитной шихты, $h_{\text{термит}}$, указана на ФИГ. 3с) стрелками и закрепленными линиями. ФИГ. 3с) и 3d) иллюстрируют распространение реакционной зоны (10), причем ФИГ. 3с) сразу же после воспламенения, а ФИГ. 3d) возможно на несколько сек позже.

ФИГ. 3е) показывает полученную пробку после окончания термитной реакции и когда тепло «проело себе путь» за счет расплавления подземного оборудования скважины, в данном случае обсадной колонны (3) и обсадного цемента (4), и позволило несмешиваемым жидким фазам, расплавленному висмуту, расплавленной стали и расплавленному шлаку, затвердеть в первый элемент скважинного барьера между породами (11) из висмута, второй элемент скважинного барьера между породами (12) из стали и третий элемент скважинного барьера между породами (13) из шлака.

Преимущество настоящего изобретения состоит в том, что благодаря повышению давления и замедленной скорости реакции термит адаптирован для взаимодействия при высокой температуре, которая может достигать до около 3000°C , с достаточно большой продолжительностью, чтобы эффективно выплавлять все оставшееся подземное оборудование скважины на относительно длинном участке скважины, что позволяет всем трем материалам формировать скважинный барьер между породами. Длина зоны соединения, то есть длина зоны контакта между горной породой и элементами скважинного барьера указана на ФИГ. 3e) стрелками и закрепленными линиями. Другое преимущество изобретения состоит в том, что из-за того, сталь и висмут имеют довольно разные температуры плавления (сталь затвердевает первой), так что по мере их последовательного затвердевания лежащий ниже висмут, который расширяется во время затвердевания, проникает и заполняет зазор, образованный между породой и сталью, которая перед этим сжимается при затвердевании. Таким образом, сочетание фаз затвердевающих висмута и стали гарантирует, что второй скважинный барьер из стали между породами обеспечивает прекрасный контакт с породой без каких-либо или с ограниченными путями утечки вдоль границы раздела сталь/порода, а также защиту от коррозии, будучи «покрытым» висмутом, проникающим и заполняющим зазоры, образовавшиеся между сталью и породой.

Термитные композиции из висмута и алюминия обладают высокой экзотермичностью и потенциально взрывоопасны. Wang с соавторами [Ссылка 3] изучал влияние наноразмерных и микроразмерных частиц Al вместе с синтезированным наноразмерным Bi_2O_3 . Смесь дает нагнетание давления от 9 до 13 МПа, которое получают всего через 0,01 мсек с наноразмерным Al (размер частиц 100 нм). Это соответствует скорости повышения давления 3200 ГПа/сек, что делает термитную композицию очень взрывоопасной. С частицами Al 70 мкм скорость повышения давления, как установлено, на четыре порядка ниже, что, однако, также находится во взрывоопасном интервале. Другая проблема заключается в том, что термитные смеси из тонко измельченных висмута и алюминия чувствительны и могут быть относительно легко воспламенены, например, с помощью разряда статического электричества. Тонко измельченные висмут и алюминий, таким образом, классифицируются как взрывоопасные материалы, требующие принятия серьезных мер безопасности при хранении, транспортировке и обращении с ними.

Взрывоопасная природа мелкодисперсных термитов из оксида висмута и алюминия делает их менее пригодными для рассматриваемой цели. Замечено, что термитная реакция при использовании микроразмерных или наноразмерных термитных смесей является слишком бурной и взрывоопасной по своей природе, что приводит к невозможности формирования предполагаемого трехфазного скважинного барьера между породами, вероятно, из-за чрезмерного образования летучего газа и распространения продуктов реакции.

Отмечено, что более медленная скорость термитной реакции, по сравнению с

мелкодисперсной термитной смесью, действует намного лучше и вместе с эффектом повышения давления, по меньшей мере, до 5 МПа будет формировать предполагаемый трехфазный скважинный барьер между породами. То есть, получение предполагаемого скважинного барьера наблюдают, когда кинетика реакции настроена так, что шихта термитной реакции весом от 30 до 100 кг реагирует почти полностью в течение от 8 до 15 сек после воспламенения. Эксперименты, проведенные заявителем, указывают на то, что такое временное окно, по-видимому, является необходимым балансом между потребностью в относительно большом выделении тепла для получения необходимого физического тепла, чтобы «съесть» эксплуатационное оборудование скважины, и потребностью в ограничении продуктов реакции и выделяемого тепла.

Скорости химических реакций, как правило, растут экспоненциально с повышением температуры. Термитная реакция не является исключением. Не будучи связанным теорией, считают, что быстрое повышение температуры во время термитной реакции вызывает сильный экспоненциальный рост скорости реакции, так что именно начальная сторона реакции с относительно гораздо более медленной кинетикой реакции, чем на более поздних стадиях, определяет время, необходимое для реагирования массы термита. Какова бы ни была причина, отмечено, что относительно количеств похожих (одинаковые размер частиц, состав, плотность и т.д.) шихт термитной реакции требуется приблизительно одинаковое время, чтобы прореагировать почти полностью и дать заметное снижение давления в реакционной зоне. Количество похожих шихт термитной реакции из V_2O_3 и Al , применяемых для формирования трехфазного скважинного барьера между породами, как правило, будет находиться в интервале от 30 до 100 кг. Эксперименты, проведенные заявителем, с похожими шихтами термитной реакции из V_2O_3 и Al в соответствии со вторым аспектом изобретения в количестве 38,5, 70 и 90 кг показывают время реакции 13, 12 и 10 сек, соответственно, при реагировании в испытаниях по тампонированию, где термит находится под давлением 150 бар перед воспламенением. Результаты испытаний представлены в графической форме на ФИГ. 6. Как видно на графике, развитие давления показывает начальный период приблизительно 7-8 сек с медленным нарастанием давления перед тем как наблюдают сильное и быстрое нарастание с достижением максимума приблизительно через 10-13 сек, прежде чем снова немного упасть, когда термитная реакция теряет момент из-за небольшого количества реагентов, оставшихся для подпитки реакции. Полагают, что при наблюдаемом пиковом давлении, по меньшей мере, 90% термитной шихты прореагировало и было превращено в продукты реакции. Таким образом, термин «время реакции», используемый здесь, относится к промежутку времени от момента инициализации термитной реакции, когда реакции протекает в формирующем скважинный барьер инструменте, находящемся под давлением, по меньшей мере, 5 МПа, до момента, когда основная часть (по меньшей мере, 90%) шихты термитной реакции прореагировала и давление начинает падать. Время реакции предпочтительно может составлять от 8 до 15 сек, предпочтительно от 9 до 14 и более предпочтительно от 10 до 13 сек.

Особенность повышения давления шихты термитной реакции до давления, по меньшей мере, 5 МПа (50 бар) перед воспламенением смеси термитной реакции приводит к существенному повышению точки кипения висмута, образующегося в термитной реакции. Это приводит к эффекту снижения количества испаряющегося висмута и к повышению температуры как объема жидкого висмута, так и образовавшихся паров висмута на несколько сотен градусов выше нормальной температуры кипения 1564°C. Без привязки к какой-либо теории полагают, что именно относительно высокое физическое тепло продукта реакции, обогащенного находящимся под давлением висмутом, со всеми его составляющими жидкого и газообразного состояний, управляет подачей достаточного тепла, чтобы эффективно расплавить все соседнее подземное оборудование скважины. Относительно высокое физическое тепло, как полагают, является результатом повышения точки кипения, вызванного повышением давления, обеспечивающим как относительно горячую жидкую фазу, так и аналогично горячую (и плотную) газообразную фазу, обеспечивающую высвобождение достаточных количеств скрытого тепла при конденсации, что дает относительно длительное «плато нагревания» вокруг повышенной температуры конденсации/кипения V_i . Экспериментально установлено, что, если давление становится существенно ниже 5 МПа и/или термитная реакция протекает со значительно большей или меньшей скоростью реакции, чем оптимальная, то структура типа сэндвича из трех элементов скважинного барьера между породами не образуется. Либо из-за того, что продукты реакции «выносятся» (вверх по скважине), либо из-за недостаточного расплавления подземного оборудования, чтобы обеспечить формирование трехфазного скважинного барьера между породами. Таким образом, начальное давление должно составлять, по меньшей мере, 5 МПа, предпочтительно, по меньшей мере, 6 МПа, более предпочтительно, по меньшей мере, 8 МПа, более предпочтительно, по меньшей мере, 10 МПа и наиболее предпочтительно, по меньшей мере, 12 МПа. В изобретении может быть применен любой известный или возможный способ повышения давления шихты термитной реакции. Примеры подходящих способов включают использование поршня, закачивание газа и т.д. Если скважинный барьер должен быть установлен в заполненных жидкостью скважинах на глубинах, имеющих гидростатическое давление выше 5 МПа, давление шихты термитной реакции может быть выровнено с гидростатическим давлением на заданной глубине.

Как указано выше, полагают, что именно сочетание реакции под давлением, что значительно повышает температуру образующегося жидкого металла выше его нормальной (при одной атмосфере) точки кипения, и относительно низкой скорости реакции (по сравнению с обычно мелкозернистыми термитными шихтами из оксида висмута и алюминия) позволяет эффективно плавить все подземное оборудование скважины, находящее в скважине на достаточной глубины, чтобы сформировать трехфазный скважинный барьер. Таким образом, термитная шихта из оксида висмута и алюминия должна быть адаптирована так, чтобы она реагировала соответственно медленнее, чем наиболее часто применяемые термитные шихты.

Адаптация шихты термитной реакции для замедления скорости реакции может быть выполнена несколькими путями, известными специалисту. В изобретении может быть применено любое решение, известное специалисту в данной области техники для адаптации шихты термитной реакции с целью получения желаемой кинетики реакции. Примером является адаптация шихты термитной реакции путем добавления нереакционноспособного компонента, как правило, одного или нескольких конечных соединений, образующихся в результате термитной реакции. То есть, одного или обоих из числа Al и Bi_2O_3 . Другим примером является нанесение на частицы оксида висмута и/или алюминия покрытия, например, из силиконовых эластомеров, растворимого стекла. Адаптация также может быть проведена за счет увеличения размера частиц оксида висмута и/или алюминия. Специалист в данной области техники вполне способен адаптировать термитную смесь, например, методом проб и ошибок, чтобы получить термитную смесь из оксида висмута и алюминия, которая реагирует со скоростью реакции, обеспечивающей время реакции от 8 до 15 сек для шихты термитной реакции весом от 30 до 100 кг от момента инициализации шихты термитной реакции до тех пор, пока не прореагирует, по меньшей мере, 90% шихты термитной реакции.

Эксперименты, проведенные авторами изобретения, показывают, что увеличение размеров частиц оксида висмута и алюминия снижает скорость термитной реакции. Однако неожиданно оказалось, что увеличение размера частиц свыше 1-3 мм для частиц Bi_2O_3 и 1-2 мм для частиц алюминия в дальнейшем не оказывает никакого значительного влияния на скорость горения. Влияние размера частиц на скорость реакции, по-видимому, нивелируется при некотором размере частиц и с этого размера остается относительно постоянной с увеличением размеров частиц. Экспериментальные данные, полученные авторами, указывают на то, что нет границы верхнего размера частиц оксида висмута и алюминия, который могли бы вступать в реакцию и поддерживать термитную реакцию при заданной скорости горения, пока давление окружающей среды составляет, по меньшей мере, 5 МПа и существует достаточная площадь контакта между реагентами. Однако более крупные частицы заполняют меньшее доступное пространство во внутренней камере, чем более мелкие частицы. Таким образом, в одном примере варианта осуществления адаптация шихты термитной реакции может быть достигнута с помощью шихты термитной реакции, содержащей частицы оксида висмута с размером частиц в интервале от 1 мм до 1 см и частицы алюминия с размером частиц в интервале от 1 мм до 1 см, предпочтительно частицы оксида висмута с размером частиц в интервале от 1 до 7 мм и частицы алюминия с размером частиц в интервале от 1 до 7 мм, более предпочтительно частицы оксида висмута с размером частиц в интервале от 1 до 5 мм и частицы алюминия с размером частиц в интервале от 1 до 5 мм, более предпочтительно частицы оксида висмута с размером частиц в интервале от 1 до 3 мм и частицы алюминия с размером частиц в интервале от 1 до 3 мм, и наиболее предпочтительно частицы оксида висмута с размером частиц в интервале от 1 до 3 мм и частицы алюминия с размером частиц в интервале от 1 до 2 мм. Экспериментально установлено, что такие относительно

большие размеры частиц оксида висмута и/или алюминия обеспечивают приемлемую кинетику реакции, соответствующую времени реакции от 8 до 15 сек для шихты термитной реакции весом от 30 до 100 кг.

Размеры частиц, как используется здесь, представляют собой диаметр частицы, определенный по стандарту ISO 9276-1:1998 для частиц неправильной формы, исходя из объема частицы. То есть, диаметр частицы определяют как равный диаметру сферы, имеющей тот же объем, что и частица неправильной формы. На практике неизбежно, что некоторое количество более мелких или более крупных частиц, чем заданный размер, присутствует в материале в форме частиц. Термин «размер частиц», используемый здесь, следовательно, представляет собой диаметр частицы, определенный по стандарту ISO 9276-1:1998, указанный для медианного размера частицы (d_{50}), определенного по стандарту ISO 9276-2:2001.

В другом примере варианта осуществления адаптация термитной шихты в соответствии со вторым аспектом изобретения может быть получена с помощью термитной шихты, содержащей, по меньшей мере, один монолитный диск из прессованных частиц оксида висмута и, по меньшей мере, один монолитный объект из твердого алюминия. Диски оксида висмута преимущественно могут иметь наружный диаметр немного меньше, например, на 1-10 мм, чем внутренний диаметр внутренней камеры несущего термитную шихту инструмента, предназначенного для подведения термитной шихты в положение формирования скважинного барьера, чтобы эффективно заполнять термитной шихтой доступное пространство камеры несущего термит инструмента. То есть, диаметр дисков из прессованного оксида висмута будет на 1-3 см меньше внутреннего диаметра самой заглубленной обсадной колонны. Монолитные диски из оксида висмута могут быть изготовлены путем изостатического прессования частиц оксида висмута в твердый диск плотностью в интервале от 50 до 99%, предпочтительно от 55 до 95%, более предпочтительно от 60 до 90%, более предпочтительно от 65 до 85% и наиболее предпочтительно от 70 до 80% от теоретической максимальной плотности $8,9 \text{ г/см}^3$. Толщина дисков оксида висмута может лежать в интервале от 0,5 до 20 см, предпочтительно от 1 до 17,5 см, более предпочтительно от 1,5 до 15 см, более предпочтительно от 2 до 12,5 см и наиболее вероятно от 3 до 10 см.

По меньшей мере, один монолитный объект из алюминия в одном варианте осуществления может представлять собой плоский круглый диск, имеющий такой же диаметр, как и применяемый(е) диск(и) из прессованного оксида висмута, чтобы обеспечить формирование равномерной гребенчатой стопки из чередующихся дисков оксида висмута и алюминия. Алюминиевые диски преимущественно могут иметь такой же диаметр, как и диски оксида висмута, и толщину, подобранную так, чтобы обеспечить стехиометрическое соотношение с дисками оксида висмута. Как правило, толщина алюминиевых дисков будет находиться в интервале от 10 до 25% от толщины дисков оксида висмута в зависимости от плотности диска из прессованного оксида висмута. Если несущий термитную шихту инструмент содержит алюминий, который вступает в контакт

с оксидом висмута, это содержание алюминия также может составлять часть стехиометрического баланса, в результате оказывая влияние (снижая) на толщину алюминиевых дисков.

Большим преимуществом применения термитной шихты, содержащей твердые монокристаллические объекты из прессованного оксида висмута и металлического алюминия, является то, что термитная шихта нечувствительна к механическим ударам, нагреванию до нескольких сотен градусов и/или статическим электрическим разрядам и имеет очень небольшой риск случайного воспламенения или этот риск вообще отсутствует. Этот вариант позволяет легко хранить и транспортировать монокристаллические объекты из оксида висмута и монокристаллические объекты из алюминия отдельно, а затем собирать шихту термитной реакции на месте, например, путем составления стопки из чередующихся дисков прессованного оксида висмута и дисков алюминия, приспособленных для размещения и покрытия поперечного сечения внутренней цилиндрической камеры несущего термит инструмента, как схематично показано на ФИГ. 4.

ФИГ. 4 представляет собой вид сбоку в разрезе несущего термитную шихту инструмента (6), включающего алюминиевый контейнер цилиндрической формы, имеющий нижнюю часть (15), боковую стенку (16) и верхнюю часть (17), внутреннюю цилиндрическую камеру (18), стыковочное приспособление для троса (9) на верхней части, вход/выход газа (19) с комбинированным запорно-выпускным клапаном (20), приспособленным так, чтобы позволять газу поступать через вход/выход (19) и предупреждать вытекание газа до тех пор, пока давление газа внутри камеры меньше, чем заданное повышение давления газа, Δp . Внутреннюю камеру (18) почти полностью заполняют стопкой чередующихся монокристаллических дисков оксид висмута (21) и монокристаллических алюминиевых дисков (22). Диски (21, 22) имеют диаметр немного меньше, например, на 1-5 мм, предпочтительно на 1,5-3 мм, более предпочтительно на 1,5-2,5 мм и наиболее предпочтительно на 2 мм, чем внутренний диаметр цилиндрической внутренней камеры (18), так что стопка заполняет почти все доступное пространство внутренней камеры. Толщина монокристаллических дисков оксида висмута (21), как правило, может находиться в интервале от 1 до 10 см, предпочтительно от 2 до 8 см, более предпочтительно от 2,5 до 6 см и наиболее предпочтительно от 3 до 5 см. Толщина монокристаллических алюминиевых дисков может быть подобрана в зависимости от толщины дисков из оксида висмута, чтобы получить стехиометрическое соотношение оксида висмута и алюминия, включая содержание алюминия нижней части (15), боковой стенки (16) и верхней части (17) внутренней цилиндрической камеры (18). В один монокристаллический диск из оксида висмута встроен дистанционно управляемый воспламенитель (8), приспособленный для нагревания окружающего оксида висмута и алюминия для запуска термитной реакции.

В одном примере варианта осуществления шихта термитной реакции может быть адаптирована за счет термитной шихты, содержащей диски (30) из прессованного порошка оксида висмута, спрессованные до той же плотности и имеющие аналогичные (наружный) диаметр и толщину, как указано выше, но где диски имеют сквозной

центральный канал (31), расположенный на оси вращательной симметрии диска и параллельно ей. При укладке двух или более таких дисков будет образовываться вертикально ориентированный центральный канал, проходящий через всю стопку, как схематично показано на ФИГ. 5а). На рисунке показано изображение двух дисков (30) сбоку и сверху в разобранном виде. Ось вращательной симметрии показана скрепленной линией, обозначенной А и А'. В этом варианте нет необходимости в алюминиевых дисках в стопке. Вместо них алюминий может быть предусмотрен в центральном канале (31). Диаметр центрального канала преимущественно может быть приспособлен для обеспечения достаточного пространства, чтобы получить место для размещения стехиометрического количества алюминия. Преимущество такого решения состоит в том, что термитную реакцию воспламеняют и запускают в центре объемной массы шихты термитной реакции, так что несущий термитную шихту инструмент испытывает меньшую тепловую нагрузку на раннем этапе реакции и, следовательно, сохраняет механическую целостность несколько дольше, прежде чем он будет разрушен чрезвычайно горячими продуктами реакции. Это обеспечивает эффект более равномерного нагревания и плавления по высоте несущего термитную шихту инструмента, облегчая эффективное плавление подземного оборудования скважины.

Адаптация шихты термитной реакции в одном примере варианта осуществления также может включать добавление шлакообразующих соединений, которые после реакции образуют шлаковую фазу, имеющую температуру плавления между 1800 и 1200°C, предпочтительно между 1700 и 1200°C, более предпочтительно между 1600 и 1200°C, более предпочтительно между 1500 и 1200°C и наиболее предпочтительно между 1400 и 1200°C. При испытаниях отмечено, что если шлаковая фаза имеет температуру плавления значительно выше 1800°C, то на раннем этапе формирования скважинного барьера может быть сформирована затвердевшая фаза шлака на внутренней стороне обсадной колонны, действующая как тепловой экран, предотвращающий полное расплавление стальной трубы по всей предполагаемой длине. Адаптация шлаковой фазы может быть достигнута, например, путем частичной или полной замены Al-топлива топливом на основе Ca, Mg и/или Si. Степень замещения Al-топлива преимущественно может лежать в интервале от 1 до 32% масс. Mg и от 1 до 68% масс. CaSi₂, предпочтительно от 5 до 32% масс. Mg и от 10 до 68% масс. CaSi₂, более предпочтительно от 10 до 32% масс. Mg и от 20 до 68% масс. CaSi₂, и наиболее предпочтительно от 15 до 32% масс. Mg и от 30 до 68% масс. CaSi₂. Массовый процент рассчитывают исходя из общей массы горючих металлов, то есть, исходя из суммы Al, Mg, Si и Ca, присутствующих в термитной шихте. Наиболее часто применяемым обсадным цементом является портландцемент, который в основном содержит двухкальциевые силикаты и трикальциевые силикаты, (CaO)₂SiO₂ и (CaO)₃SiO₂, соответственно. В примере варианта осуществления при адаптации состав образующегося шлака может быть успешно сбалансирован с учетом ожидаемого количества обсадного цемента, который впоследствии будет расплавлен и станет частью шлаковой фазы, будучи по существу затвердевшим в третьем элементе скважинного барьера между породами. С

другой стороны адаптация шлаковой композиции может быть достигнута за счет добавления CaO, MgO, SiO₂ или их смесей к термитной шихте. Это будет давать комбинированный эффект снижения кинетики термитной реакции за счет разбавления инертным материалом и снижения температуры плавления получаемой шлаковой фазы. Количество добавленных CaO, MgO, SiO₂ или их смесей предпочтительно может быть подобрано так, чтобы после реагирования термитной шихты получать шлаковую фазу, имеющую температуру плавления между 1800 и 1200°C, предпочтительно между 1700 и 1200°C, более предпочтительно между 1600 и 1200°C, более предпочтительно между 1500 и 1200°C и наиболее предпочтительно между 1400 и 1200°C.

В третьем аспекте изобретение относится к несущему термитную шихту инструменту (6), где несущий термитную шихту инструмент включает контейнер цилиндрической формы, имеющий:

нижнюю часть (15),

боковую стенку (16),

верхнюю часть (17),

цилиндрическую внутреннюю камеру (18) и

стыковочное приспособление для троса (9) на верхней части (17),

причем несущий термитную шихту инструмент (6) дополнительно содержит:

шихту термитной реакции (7) в соответствии со вторым аспектом изобретения, размещенную во внутренней камере (18), и

воспламенитель (8), выполненный с возможностью воспламенения шихты термитной реакции (7).

Контейнер несущего термитную шихту инструмента предпочтительно может быть выполнен из известного термитного горючего металла, или стали, или комбинации обоих. Примеры горючих металлов включают алюминий, магний, цинк, медь.

В одном варианте несущий термитную шихту инструмент дополнительно содержит поршень, размещенный во внутренней камере и предназначенный для прижимания находящейся в ней шихты термитной реакции (7). Поршень может приводиться в действие с помощью исполнительного механизма, соединенного с поршнем, под действием силы тяжести на груз, расположенный над поршнем, и др.

В одном аспекте несущий термитную шихту инструмент может также содержать обратный клапан (20), расположенный на входе/выходе газа (19), причем обратный клапан (20) выполнен с возможностью обеспечивать нагнетание газа для получения и поддержания давления газа p_i , по меньшей мере, 5 МПа, предпочтительно, по меньшей мере, 6 МПа, более предпочтительно, по меньшей мере, 8 МПа, более предпочтительно, по меньшей мере, 10 МПа и наиболее предпочтительно, по меньшей мере, 12 МПа. В другом аспекте клапаном (20) может быть комбинированный обратный и выпускной клапан, выполненный с возможностью обеспечивать нагнетание газа для получения и поддержания давления газа p_i , по меньшей мере, 5 МПа, предпочтительно, по меньшей мере, 6 МПа, более предпочтительно, по меньшей мере, 8 МПа, более предпочтительно,

по меньшей мере, 10 МПа и наиболее предпочтительно, по меньшей мере, 12 МПа, а также открываться и выпускать газ, если давление газа p внутри камеры (18) становится $p > p_i + \Delta p$, где Δp равна 0,1 МПа, предпочтительно 0,15 МПа, более предпочтительно 0,2 МПа, более предпочтительно 0,3 МПа, более предпочтительно 0,5 МПа и наиболее предпочтительно 1 МПа.

ФИГ. 5b) представляет собой рисунок, схематично иллюстрирующий пример варианта осуществления несущего термитную шихту инструмента, загруженного стопкой таких дисков (30) и где алюминий представлен в виде стержня (32), выполненного с возможностью вставки в вертикальный центральный канал, образованный выровненными центральными отверстиями, и заполнения канала. Предпочтительно могут быть использованы два алюминиевых стержня (32), предназначенных для того, чтобы вместе с воспламенителем (8) заполнять всю длину вертикального центрального канала (31).

Функция несущего термитную шихту инструмента в основном состоит в том, чтобы быть транспортным инструментом, который переносит и помещает шихту термитной реакции в положение внизу в самой заглубленной обсадной колонне, где должен быть установлен скважинный барьер и устройство контроля давления, а также действует как механическая опора, содержащая термитную реакционную смесь и обеспечивающая высокое давление газа на начальной фазе реакции (до расплавления/выгорания инструмента). В изобретении может быть применен любой известный или возможный несущий термитную шихту инструмент, пока он имеет внутреннюю камеру, способную содержать термитную реакционную массу под (начальным) давлением газа, по меньшей мере, 5 МПа.

Примером варианта осуществления несущего термитную шихту инструмента является удлиненный трубчатый металлический контейнер или из стали, или из алюминия, закрытый с обоих концов. Несущий термитную шихту инструмент его верхним концом прикрепляют к подъемному механизму, который вставляет и опускает несущий термитную шихту инструмент в заданное положение внутри самой заглубленной обсадной колонны, и, как правило, будет иметь воспламенитель, расположенный на противоположном нижнем конце. Если несущий термитную шихту инструмент изготовлен из алюминия, стенки внутреннего контейнера будут реакционноспособными относительно оксида висмута и будут вносить вклад в термитную реакцию. В этом примере варианта осуществления может быть выгодно включать массу стенок контейнера в термитную композицию, то есть, снижать соответственно количество алюминия в виде частиц, чтобы получить стехиометрическую термитную композицию с учетом как Al-частиц, так и Al в стенках инструмента.

В одном примере варианта осуществления несущий термитную шихту инструмент содержит клапан сброса давления, настроенный на открывание и высвобождение газа, если давление газа внутри контейнера увеличивается выше предполагаемого увеличения давления газа, то есть, если $p > p_i + \Delta p$, где p означает давление газа внутри контейнера, p_i означает начальное давление газа внутри контейнера перед воспламенением, а Δp

означает предполагаемое увеличение давления газа. Клапан сброса давления уменьшает движущую силу (увеличение давления газа), которая выдавливает расплавленный материал за пределы оставшегося несущего термитную шихту инструмента после плавления/прожигания. Увеличение давления, Δp , при котором клапан сброса давления может открываться, может составлять 0,1 МПа, предпочтительно 0,15 МПа, более предпочтительно 0,2 МПа, более предпочтительно 0,3 МПа, более предпочтительно 0,5 МПа и наиболее предпочтительно 1 МПа.

Общим для всех вариантов окончательного тампонирувания скважин является определение подходящего места в скважине, где можно установить скважинный барьер. Эта оценка учитывает конфигурацию скважины, глубины, наклоны, обсадные колонны, обсадные цементы, боковые стволы, стратиграфические последовательности ствола скважины и другие факторы с целью установления подходящего места в скважине для формирования пробки. Ключевым фактором является поиск геологически подходящего интервала формации. Подходящая формация должна обладать достаточными свойствами перекрывающей породы вдоль ожидаемой длины барьера [ссылка 2, стр. 19]. Несмотря на то, что определение места установки скважинного барьера - жизненно важный этап для успешного тампонирувания, это не является частью настоящего изобретения, поскольку определение места установки пробки является общим для любого процесса тампонирувания и хорошо известно специалисту в данной области техники, а также из-за того, что настоящее изобретение относится к тому, как сделать скважинный барьер, и к его структуре. В одном примере при определении места размещения скважинного барьера главным образом может быть принято во внимание, что обсадная(ые) колонна(ы) может/могут преимущественно иметь цементную обсадную колонну. Благодаря этой особенности обсадной цемент не подвергается плавлению, чтобы герметизировать кольцевое пространство ниже желаемого места формирования скважинного барьера и, следовательно, предупреждает стекание жидкого металла и/или шлака, образующихся в результате термитной реакции, вниз по кольцевому пространству после плавления через обсадную колонну и затвердевание ниже желаемого места формирования скважинного барьера.

В четвертом аспекте изобретение относится к поперечному скважинному барьеру между породами в стволе скважины, где ствол скважины содержит подземное оборудование скважины, включающее, по меньшей мере, обсадную колонну, и где поперечный скважинный барьер между породами включает:

первый элемент скважинного барьера между породами (11) из висмута,

второй элемент скважинного барьера между породами (12) из стали поверх первого элемента скважинного барьера (11), и

третий элемент скважинного барьера между породами (13) шлака поверх второго элемента скважинного барьера (12).

Поперечный скважинный барьер между породами может быть получен способом в соответствии с первым аспектом изобретения с применением термитной шихты в

соответствии с третьим аспектом изобретения.

Перечень фигур

ФИГ. 1 представляет собой точную копию ФИГ. 2.2 [Ссылка 2], показывающую типичную конструкцию скважины, включающей подземное оборудование.

ФИГ. 2 представляет собой точную копию ФИГ. 4.21 [Ссылка 2], показывающую чертеж структуры постоянного скважинного барьера между породами в соответствии с предшествующим уровнем техники, полученного с помощью термита из оксида железа и алюминия.

ФИГ. 3а)-3е) представляют собой чертежи, если смотреть сбоку, схематично иллюстрирующие способ формирования постоянного скважинного барьера между породами по настоящему изобретению.

ФИГ. 4 представляет собой чертеж, если смотреть сбоку, иллюстрирующий пример варианта осуществления несущего термитную шихту инструмента, содержащего пример варианта осуществления термитной шихты в соответствии с изобретением.

ФИГ. 5а) представляет собой чертеж, если смотреть сбоку и сверху, иллюстрирующий вид с разнесенными частями примера варианта осуществления дисков, изготовленных из оксида висмута, которые применены в другом примере варианта осуществления термитной шихты в соответствии с изобретением.

ФИГ. 5b) представляет собой чертеж, если смотреть сбоку, несущего термитную шихту инструмента, загруженного шихтой термитной реакции с применением дисков, показанных на ФИГ. 5а).

ФИГ. 6 представляет собой диаграмму, показывающую измеренное развитие давления в трех полномасштабных испытаниях шихт термитной реакции в соответствии со вторым аспектом изобретения.

ФИГ. 7 представляет собой чертеж, показывающий конструкцию тестирующего инструмента, применяемого для испытания барьер-формирующей способности шихт термитной реакции в соответствии со вторым аспектом изобретения.

ФИГ. 8-11 представляют собой фотографии, показывающие полученные трехфазные скважинные барьеры между породами, созданные в испытаниях с применением шихт термитной реакции в соответствии со вторым аспектом изобретения.

ФИГ. 12а) и 12b) представляют собой диаграммы, показывающие измеренное давление относительно времени (12а)) и измеренные градиенты температур относительно времени (12b)) в сравнительных испытаниях.

ФИГ. 13а) и 13b) показывают фотографии полученного барьера (13а)) и разрушенного верха испытательного стенда (13b)) при неудачном испытании.

Проверка изобретения

Изобретение описано более подробно с помощью проверочных испытаний.

Эксперимент 1

Проведена серия проверочных испытаний в полужаводском масштабе. В каждом испытании применяют цилиндрический тестирующий инструмент, выполненный так, как

показано на рисунке 7. Рисунок представляет собой вид сбоку в разрезе.

Тестирующий инструмент готовят путем цементирования породы цилиндрической формы (101) с наружным диаметром приблизительно 20 см и длиной приблизительно от 0,5 до 1,0 м в цилиндрический бетонный блок (100) с наружным диаметром приблизительно 40 см и высотой 1 м. Порода предпочтительно должна иметь сравнимые физические и химические свойства с типичными горными породами в реальных местах формирования скважинного барьера. В этих испытаниях породой является коммерчески доступный сланец из Oppdal, Norway.

Центральное отверстие с внутренним диаметром 108 мм, коаксиальное с осью симметрии вращения цилиндрического корпуса, выполнено так, что оно проходит через цилиндрическую породу, зацементированную в бетоне. Затем стальную трубу (102) с наружным диаметром 88,9 мм выравнивают коаксиально центральному отверстию, а зазор между стенкой отверстия и внешней поверхностью стальной трубы заполняют портландцементом (103), который выполняет функцию обсадного цемента. Стальная труба имеет внутренний диаметр 76,3 мм (то есть, стальная труба имеет толщину 6,3 мм) и составляет около 2 м в длину так, что она выступает приблизительно на 1 м выше центрального отверстия.

Стальная труба (102) в ее нижней части снабжена мостовой пробкой (104). Мостовая пробка может быть выполнена из цемента или стали. Тепловой экран (105) из графита укладывают на мостовую пробку. Затем полый несущий термитную шихту инструмент цилиндрической формы (106), закрытый на обоих концах, вставляют в стальную трубу и помещают на мостовую пробку. Тампонажный инструмент выполнен из алюминия и имеет наружный диаметр 70,0 мм и толщину стенки 3,0 мм, то есть, внутренний диаметр равен 66,0 мм.

Внутреннее пространство (107) частично заполняют 10 кг шихты термитной реакции из частиц оксида висмута и частиц алюминия (108), где частицы оксида висмута имеют размер частиц от 1 до 3 мм, а частицы алюминия имеют размер частиц от 1 до 2 мм. Шихта термитной реакции имеет высоту приблизительно 80 см. Воспламенитель по электрическому сопротивлению (109) размещают внутри шихты термитной реакции. Давление внутреннего пространства (107) перед воспламенением повышают до давления газа 235 бар путем введения газообразного азота. В одном из испытаний применяют клапан сброса давления (110), установленный на высвобождение газа при давлении выше 245 бар.

ФИГ. 8 показывает фотографию тестирующего инструмента, разрезанного пополам и уложенного бок-о-бок, после поджигания шихты термитной реакции и после охлаждения. На фотографии видно, что тепло от шихты термитной реакции полностью расплавляет участок, отмеченный позицией (200), обсадной колонны (102) вместе с обсадным цементом, а полученная пробка «проедает себе путь» в сланец (101) и, таким образом, получают скважинный барьер между породами. Барьер, как видно, состоит из трех фаз, нижней фазы из висмута (201), промежуточной фазы из стали/расплавленной

обсадной колонны (202) и верхней фазы из шлака (203), состоящего в основном из оксида алюминия. Все три фазы, как видно имеют контакт от породы к породе. Фотография показывает также оставшуюся часть тампонажного инструмента (106) и мостовой пробки (104). В этом испытании графитовый тепловой экран (105) отрывается и всплывает вверх в шлаковую фазу.

ФИГ. 9 представляет собой фотографию, показывающую сравнение результатов испытания в испытании, показанном на ФИГ. 8 (здесь он показан как средний результат испытания), с 4 аналогичными результатами испытаний, которые все проведены, как описано выше. Как видно на фотографиях, во всех образцах получен предполагаемый трехфазный скважинный барьер между породами.

Эксперимент 2

Проводят серию аналогичных испытаний, как описано в примере 1, с шихтой термитной реакции, содержащей гребенчатую стопку из чередующихся дисков оксида висмута и алюминиевых дисков. Диски оксида висмута готовят из порошка оксида висмута, прессованного до плотности, по меньшей мере, 60% от теоретической максимальной плотности, и имеют толщину 25 мм и диаметр 64 мм. Алюминиевые диски имеют толщину 7 мм и диаметр 64 мм. Термитная шихта состоит из 9,4 кг оксида висмута и 1,1 кг алюминия. Начальное давление устанавливают на 1,5 МПа, и используют клапан сброса давления, который открывается при давлении газа 1,51 МПа. В остальных условиях испытаний и применяемые инструменты такие же, как в случае примера 1.

ФИГ. 10 представляет собой фотографию полученного трехфазного барьера между породами. На фотографии ясно видно формирование первого скважинного барьера (201) из металлического висмута, промежуточного скважинного барьера (202) из стали и третьего скважинного барьера (203) из шлака/оксида алюминия.

ФИГ. 11 представляет собой фотографию, показывающую полученный трехфазный барьер между породами в полномасштабном испытании с 90 кг термита, содержащего гребенчатую стопку из чередующихся дисков оксида висмута и алюминиевых дисков. Диски оксида висмута готовят из порошка оксида висмута, прессованного до плотности, по меньшей мере, 60% от теоретической максимальной плотности, и имеют толщину 25 мм и диаметр 99 мм. Алюминиевые диски имеют толщину 7 мм и диаметр 99 мм. Термитная шихта состоит из 80 кг оксида висмута и 10 кг алюминия. Начальное давление устанавливают на 15 МПа, и используют клапан сброса давления, который открыт при давлении газа 15,1 МПа.

Тестирующий инструмент подобен тестирующему инструменту в испытаниях, описанных в примере 1, за исключением того, что он имеет большие размеры. Длина тестирующего инструмента равна 2 м, сланцевый блок Orpdal имеет длину 1,8 м и диаметр 320 мм, а центральное отверстие имеет внутренний диаметр 220 мм. Обсадная колонна имеет наружный диаметр 140 мм и внутренний диаметр 122 мм. Несущий термитную шихту инструмент выполнен из алюминия, имеет наружный диаметр 110 мм и толщину стенки 5 мм, то есть, внутренний диаметр равен 100 мм.

Как видно макроскопически на фотографии, самой нижней фазой является висмут, которая имеет четкую (плотную границу) со сталью, затем над ней располагается темная, более объемная фаза оксида. Высота барьера от верхней части до нижней составляет 1570 мм. Также можно увидеть, что труба обсадной колонны выплавлена как в интервале барьера, так и значительные части трубы обсадной колонны выплавлены еще на 500 мм над верхней частью барьера.

Сравнительные испытания

Проводят серию мелкокомасштабных испытаний с термитными шихтами весом от 600 до 800 г в тестирующем инструменте при давлении 1,5 МПа. Тестирующий инструмент имеет цилиндрическую форму, высоту около 420 мм и наружный диаметр 220 мм. Внутренняя камера имеет высоту приблизительно 210 мм и диаметр 160 мм (4,2 л). В камеру загружают тигель, состоящий из Al_2O_3 . Тигель имеет внутренний объем для термита около 140 мм в высоту и 70 мм в диаметре. Когда тигель загружен термитом, имеется приблизительно литр или около того свободного объема в ячейке для испытания. В разных местах ячейки есть один датчик давления и несколько датчиков температуры. Давление в ячейке повышают с помощью N_2 -газа, а термит воспламеняют с использованием запала в форме небольшой капсулы термита, которую инициируют с помощью электричества.

В первом испытании используют термитную шихту из частиц оксида висмута и алюминия с размером частиц 50 мкм, во втором испытании используют термитную шихту из частиц оксида олова и алюминия с размером частиц 50 мкм, в третьем испытании используют термитную шихту из частиц оксида висмута и магния с размером частиц 1-2 мм, в четвертом испытании используют термитную шихту из частиц оксида висмута и алюминия с размером частиц 2 мм, а в пятом испытании используют термитную шихту из дисков толщиной 25 мм из порошкообразного оксида висмута, прессованного, по меньшей мере, до 60% от теоретической максимальной плотности, и алюминиевые диски толщиной 7 мм.

На ФИГ. 12а) представлена диаграмма, иллюстрирующая измеренное давление в испытательном инструменте в виде функции времени. Первое испытание (кривая, обозначенная « BiO_x+Al (50 мкм)») показывает очень быстрое повышение давления, сравнимое со взрывом, от 1,5 до приблизительно 3,2 МПа меньше чем за секунду. Второе испытание (кривая, обозначенная « SnO_x+Al (50 мкм)») также показывает очень быстрое повышение давления от 1,5 до приблизительно 2,6 МПа меньше чем за секунду. Третье испытание (кривая, обозначенная «на основе горючего BiO_x+Mg (1-2 мм)») также показывает быстрое повышение после несколько десятых секунды задержки до приблизительно 2,5 МПа. В четвертом и пятом испытаниях (кривые, обозначенные «Гранула 2 мм» и «Диск 7 мм», соответственно) используют термитную шихту, сравнимую с термитной шихтой, применяемой в экспериментах 1 и 2. Как видно на ФИГ. 12а), эти термитные шихты обеспечивают значительно более медленное и более контролируемое нарастание давления.

ФИГ. 12b) представляет собой диаграмму, отображающую измеренное нарастание давления, показанное в виде градиента давления в бар/сек, для серии из пяти мелкомасштабных испытаний с термитной шихтой от 600 до 800 г, в которой используют частицы оксида висмута с размером частиц 1-3 мм и частицы алюминия с разными размерами частиц. Кривая, обозначенная «А», показывает измеренный градиент давления с частицами алюминия 0,05 мм, кривая, обозначенная «В», показывает измеренный градиент давления с частицами алюминия от 0,125 до 1 мм, кривая, обозначенная «С», показывает измеренный градиент давления с частицами алюминия от 0,5 до 1,5 мм, кривая, обозначенная «D», показывает измеренный градиент давления с частицами алюминия от 1 до 2 мм, и кривая, обозначенная «Е», показывает измеренный градиент давления с частицами алюминия 2 мм. Как и ожидалось, кинетика реакции значительно увеличивается при меньших размерах частиц горючего металлического алюминия.

Другой результат мелкомасштабных испытаний состоит в том, что, если давление перед воспламенением снижают, газовое состояние термита становится все больше и больше, пока в конце концов предохранительная разрывная мембрана на ячейке давления фактически не прокалывается из-за попадания на него горячего конденсированного газа V_i . То есть, необходимо сдерживать давление в тестирующем инструменте, тогда в конечном итоге большая часть термитных продуктов конденсируется и скапливается в виде разделенных по плотности твердых частиц.

ФИГ. 13a) представляет собой фотографию, показывающую полученный барьер, сформированный в испытаниях в половинном масштабе приблизительно с 10 кг той же самой термитной шихты из частиц оксида висмута и магния с размером частиц 1-2 мм, используемой в мелкомасштабном испытании, представленном на ФИГ. 12a). Испытания проводят в аналогичном тестирующем инструменте, что и инструмент, используемый в эксперименте 1, с начальным повышением давления до 1,5 МПа. Как видно из фотографии 13a), испытание провалилось из-за невозможности расплавить обсадную колонну (102), так что скважинный барьер не становится барьером между породами и состоит только из двух фаз, нижней фазы висмута (201), расположенной на мостовой пробке (104), и шлаковой фазы (203), состоящей главным образом из оксида магния. Фотография также указывает на то, что шлак с силой выбрасывается вверх в обсадной колонне. Это подтверждается фотографией на ФИГ. 13b), на которой показана верхняя часть испытательного стенда после испытания со скоплением гранулированного материала, который, как оказалось, является продуктами термитной реакции. То есть, часть формирующего пробку материала выносится, поэтому продукты термитной реакции, накапливаются только на нескольких см в основании испытательного стенда, а обсадная колонна не плавится, доказывая, что потеря контроля за термитной реакцией (слишком высокая кинетика реакции) вряд ли приведет к успешному созданию барьера.

Приведенные выше результаты, показывающие, что термитная шихта «на основе горючего $BiO_x + Mg$ (1-2 мм)» не формирует предполагаемый трехфазный барьер между породами, тогда как термитная шихта «гранула 2 мм» формирует такой барьер, указывают

на то, что граница того, как быстро может протекать термитная реакция (и нарастать давление), находится где-то между скоростью реакции/градиентом давления для термита из частиц оксида висмута и магния 1-2 мм и термита из оксида висмута и алюминия 2 мм.

Таким образом, вкратце, эти результаты испытаний (и другие, не представленные здесь) указывают на то, что скорость реакции, соответствующая градиенту давления менее 5 МПа/сек, обеспечивает контролируемый термит, способный формировать предполагаемый трехфазный скважинный барьер между породами. Это соответствует скорости реакции, дающей время реакции для шихты термитной реакции весом от 30 до 100 кг от 8 до 15 сек с момента инициализации шихты термитной реакции до тех пор, пока не прореагирует, по меньшей мере, 90% (см. ФИГ. 6).

Ссылки

- 1 World Oil Magazine February 2020, retrievable on the internet: <http://www.worldoil.com/magazine/2020/february-2020/-special-focus/special-focus-2020-forecast-international-drilling-and-production>
2. Khalifeh, M. и Saasen, A., «Introduction to Permanent Plug and Abandonment of Wells», Springer Open, 2020, <https://doi.org/10,1007/978-3-030-39970-2>, ISBN 978-3-030-39969-6. <http://creativecommons.org/licenses/by/4,0/>
3. Wang, L. et al., «The behaviour of nanothermite reaction based on Bi₂O₃/Al», Journal of Applied Physics 110, 074311 (2011); <https://doi.org/10,1063/1,3650262> <https://aip.scitation.org/doi/abs/10,1063/1,3650262?ver=pdfcov&journalCode=jap>.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Шихта термитной реакции, содержащая оксид висмута, Bi_2O_3 , и горючий металл, содержащий алюминий,

отличающаяся тем, что

шихта термитной реакции (7) адаптирована с возможностью реагировать при скорости реакции, обеспечивающей время реакции от 8 до 15 сек для шихты термитной реакции весом от 30 до 100 кг от момента инициализации шихты термитной реакции до тех пор, пока не прореагирует, по меньшей мере, 90% шихты термитной реакции, предпочтительно от 9 до 14 сек и более предпочтительно от 10 до 13 сек.

2. Шихта термитной реакции по п. 1, в котором шихта термитной реакции (7) адаптирована путем применения частиц оксида висмута с размером частиц в интервале от 1 мм до 1 см и горючего металла, содержащего частицы алюминия с размером частиц в интервале от 1 мм до 1 см, предпочтительно частиц оксида висмута с размером частиц в интервале от 1 до 7 мм и частиц алюминия с размером частиц в интервале от 1 до 7 мм, более предпочтительно частиц оксида висмута с размером частиц в интервале от 1 до 5 мм и частиц алюминия с размером частиц в интервале от 1 до 5 мм, наиболее предпочтительно частиц оксида висмута с размером частиц в интервале от 1 до 3 мм и частиц алюминия с размером частиц в интервале от 1 до 3 мм, где размеры частиц определяют по стандарту ISO 9276-1:1998, указывая для медианного размера частица (d50), определенного по стандарту ISO 9276-2:2001.

3. Шихта термитной реакции по п. 1 или 2, в котором шихта термитной реакции (7) адаптирована путем применения частиц оксида висмута, имеющих размер частиц в интервале от 1 до 3 мм, и горючего металла, содержащего частицы алюминия, имеющие размер частиц в интервале от 1 до 2 мм, где размеры частиц определяют по стандарту ISO 9276-1:1998, указывая для медианного размера частица (d50), определенного по стандарту ISO 9276-2:2001.

4. Шихта термитной реакции по п. 1, в котором шихта термитной реакции содержит:

монолитный плоский твердый диск (21) из оксида висмута, где:

- диск из оксида висмута спрессован до плотности в интервале от 50 до 99%, предпочтительно от 55 до 95%, более предпочтительно от 60 до 90%, более предпочтительно от 65 до 85% и наиболее предпочтительно от 70 до 80% от теоретической максимальной плотности $8,9 \text{ г/см}^3$,

- диск из оксида висмута имеет толщину от 0,5 до 20 см, предпочтительно от 1 до 17,5 см, более предпочтительно от 1,5 до 15 см, более предпочтительно от 2 до 12,5 см и наиболее вероятно от 3 до 10 см, и наружный диаметр, приспособленный для установки во внутреннюю камеру несущего термитную шихту инструмента,

и

горючий металл, содержащий, по меньшей мере, один металлический твердый объект (22) из алюминия.

5. Шихта термитной реакции по п. 4, в котором шихта термитной реакции (7) содержит:

набор, по меньшей мере, из двух монокристаллических плоских твердых дисков (21) из оксида висмута, и

горючий металл, содержащий набор, по меньшей мере, из двух монокристаллических твердых объектов (22) из алюминия, каждый из которых имеет форму плоского твердого диска, имеющего наружный диаметр, аналогичный монокристаллическим твердым дискам (21) из оксида висмута,

где

монокристаллические плоские твердые диски (21) из оксида висмута и монокристаллические твердые объекты (22) из алюминия уложены друг на друга в чередующуюся стопку из чередующихся дисков оксида висмута и алюминия.

6. Шихта термитной реакции по п. 5, в которой толщина монокристаллических твердых объектов (22) из алюминия подобрана так, чтобы получить стехиометрическое соотношение $Bi:Al$ в пересчете на:

либо общее содержание оксида висмута и алюминия шихты термитной реакции, либо содержание оксида висмута шихты термитной реакции и содержание алюминия шихты термитной реакции и содержание алюминия несущего термитную шихту инструмента, применяемого для вставки шихты термитной реакции в скважину.

7. Шихта термитной реакции по п. 5, в которой шихта термитной реакции содержит:

набор, по меньшей мере, из двух монокристаллических плоских твердых дисков (21) из оксида висмута, где каждый диск имеет сквозной центральный канал (31), расположенный на оси симметрии вращения диска и параллельно ей, и

горючий металл, содержащий один монокристаллический твердый объект (22) из алюминия, имеющий форму стержня, приспособленного для установки в сквозной центральный канал (31) и заполнения канала монокристаллических плоских твердых дисков (21) из оксида висмута,

где

набор, по меньшей мере, из двух монокристаллических плоских твердых дисков (21) оксида висмута нанизывают на алюминиевый стержень, и

внутренний диаметр центрального канала (31) и наружный диаметр алюминиевого стержня (32) оба подобраны так, что когда алюминиевый стержень (32) заполняет центральный канал (31), общее количество алюминия и висмута, присутствующего в шихте термитной реакции, соответствует стехиометрическому соотношению $Bi:Al$.

8. Шихта термитной реакции по любому из предыдущих пунктов, в которой горючий металл шихты термитной реакции (7) содержит Al с Ca , Mg и/или Si в количестве, дающим горючую смесь из Al , Ca , Mg и Si , содержащую от 1 до 32% масс. Mg и от 1 до 68% масс. $CaSi_2$, предпочтительно от 5 до 32% масс. Mg и от 10 до 68% масс. $CaSi_2$, более предпочтительно от 10 до 32% масс. Mg и от 20 до 68% масс. $CaSi_2$, и

наиболее предпочтительно от 15 до 32% масс. Mg и от 30 до 68% масс. CaSi₂, причем % масс. указан в пересчете на общую массу Al, Mg, Si и Ca, присутствующих в термитной шихте.

9. Шихта термитной реакции по любому из предыдущих пунктов, в котором шихта термитной реакции (7) также содержит CaO и/или SiO₂ в количестве, подобранном так, чтобы после реагирования термитной шихты получить шлаковую фазу, имеющую температуру плавления между 1800 и 1200°C, предпочтительно между 1700 и 1200°C, более предпочтительно между 1600 и 1200°C, более предпочтительно между 1500 и 1200°C и наиболее предпочтительно между 1400 и 1200°C.

10. Способ герметизации скважины с помощью поперечного скважинного барьера между породами, где скважина содержит подземное оборудование скважины, включающее, по меньшей мере, обсадную колонну, причем способ включает:

- установку термостойкой мостовой пробки в самой заглубленной обсадной колонне в месте, где должно быть сформировано уплотнение,
- размещение несущего термитную шихту инструмента поверх термостойкой мостовой пробки, где несущий термитную шихту инструмент имеет внутреннюю камеру, заполненную шихтой термитной реакции, и воспламенитель, и

- воспламенение шихты термитной реакции,

отличающийся тем, что:

- способ также включает применение шихты термитной реакции по любому из пунктов 1-9, где шихта термитной реакции находится под давлением, равным давлению in-situ, по меньшей мере, 5 МПа.

11. Способ по п. 10, в котором давление in-situ составляет предпочтительно, по меньшей мере, 6 МПа, более предпочтительно, по меньшей мере, 8 МПа, более предпочтительно, по меньшей мере, 10 МПа и наиболее предпочтительно, по меньшей мере, 12 МПа.

12. Способ по п. 10 или 11, в котором давление in-situ получают до воспламенения шихты термитной реакции путем нагнетания газа во внутреннюю камеру несущего термитную шихту инструмента.

13. Способ по п. 10 или 11, в котором давление in-situ получают:

либо нагнетанием газа во внутреннюю камеру несущего термитную шихту инструмента до воспламенения шихты термитной реакции,

либо прессованием шихты термитной реакции во внутренней камере несущего термитную шихту инструмента с помощью поршня до воспламенения шихты термитной реакции,

либо использованием для повышения давления газа начальной фазы термитной реакции.

14. Несущий термитную шихту инструмент (6), где несущий термитную шихту инструмент включает контейнер цилиндрической формы, имеющий нижнюю часть (15),

боковую стенку (16)
 верхнюю часть (17),
 цилиндрическую внутреннюю камеру (18),
 стыковочное приспособление для троса (9), расположенное на верхней части (17), и
 воспламенитель (8), предназначенный для воспламенения шихты термитной
 реакции (7),

отличающийся тем, что

несущий термитную шихту инструмент (6) также включает:

шихту термитной реакции (7) по любому из пунктов 1-9, расположенную во
 внутренней камере (18).

15. Несущий термитную шихту инструмент по п. 14, в котором несущий
 термитную шихту инструмент (6) также включает поршень, расположенный во
 внутренней камере (18), предназначенный для прессования находящейся в ней шихты
 термитной реакции (7).

16. Несущий термитную шихту инструмент по п. 15, в котором поршень
 активируют за счет давления окружающей среды в скважине.

17. Несущий термитную шихту инструмент по п. 15, в котором несущий
 термитную шихту инструмент (6) также включает один или несколько клапанов (20),
 обеспечивающих нагнетание газа во внутреннюю камеру (18) для получения и
 поддержания давления, p , во внутренней камере (18), по меньшей мере, 5 МПа,
 предпочтительно, по меньшей мере, 6 МПа, более предпочтительно, по меньшей мере, 8
 МПа, более предпочтительно, по меньшей мере, 10 МПа и наиболее предпочтительно, по
 меньшей мере, 12 МПа, и где обратный и выпускной клапан (20) также предназначен для
 открывания и высвобождения газа из внутренней камеры (18), если давление p внутри
 внутренней камеры (18) становится $p > p_1 + \Delta p$, где Δp равна 0,1 МПа, предпочтительно 0,15
 МПа, более предпочтительно 0,2 МПа, более предпочтительно 0,3 МПа, более
 предпочтительно 0,5 МПа и наиболее предпочтительно 1 МПа.

18. Поперечный скважинный барьер между породами в стволе скважины, где ствол
 скважины содержит подземное оборудование скважины, включающее, по меньшей мере,
 одну обсадную колонну, и

отличающийся тем, что

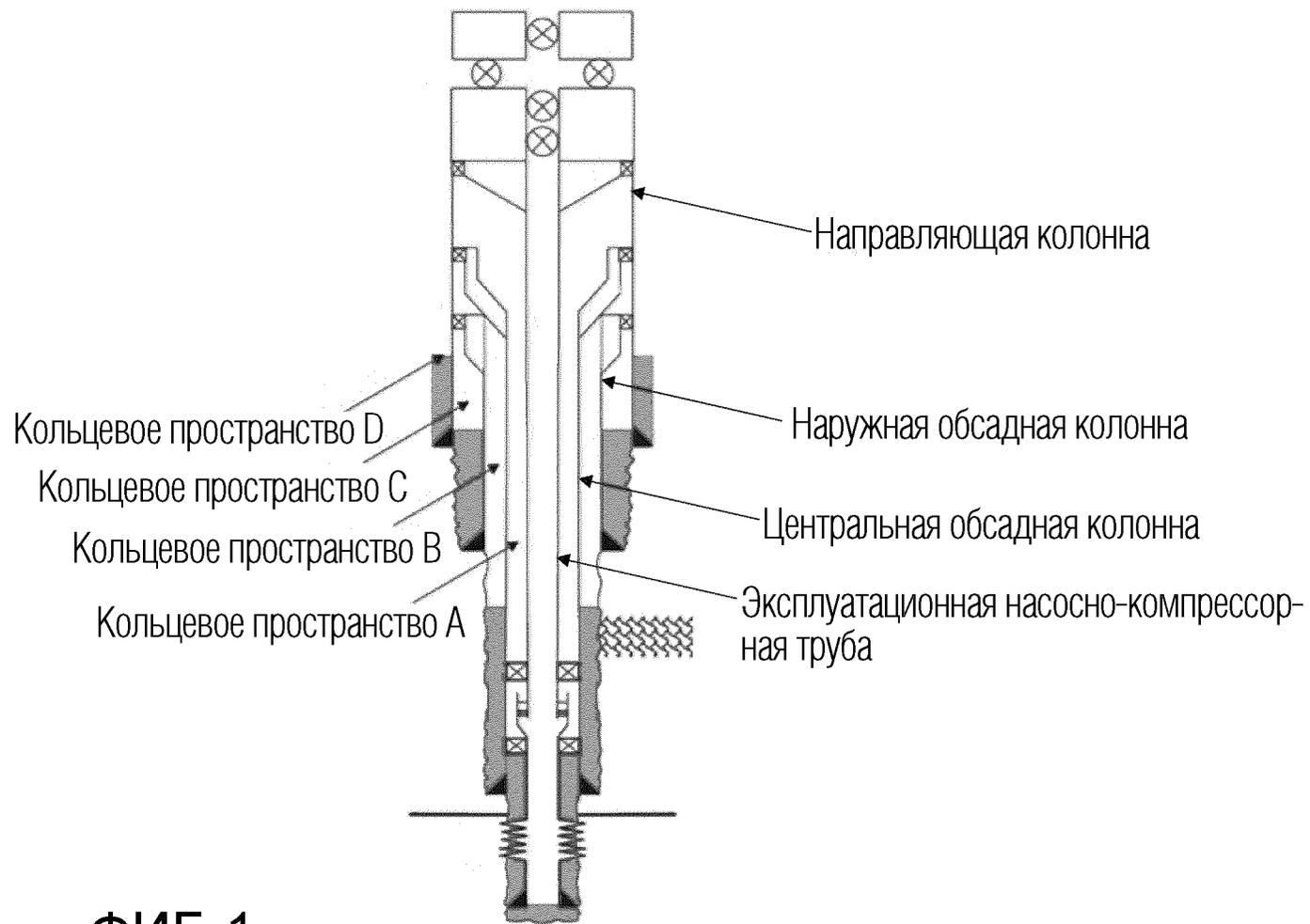
поперечный скважинный барьер между породами содержит:

первый элемент скважинного барьера между породами (11) из висмута,

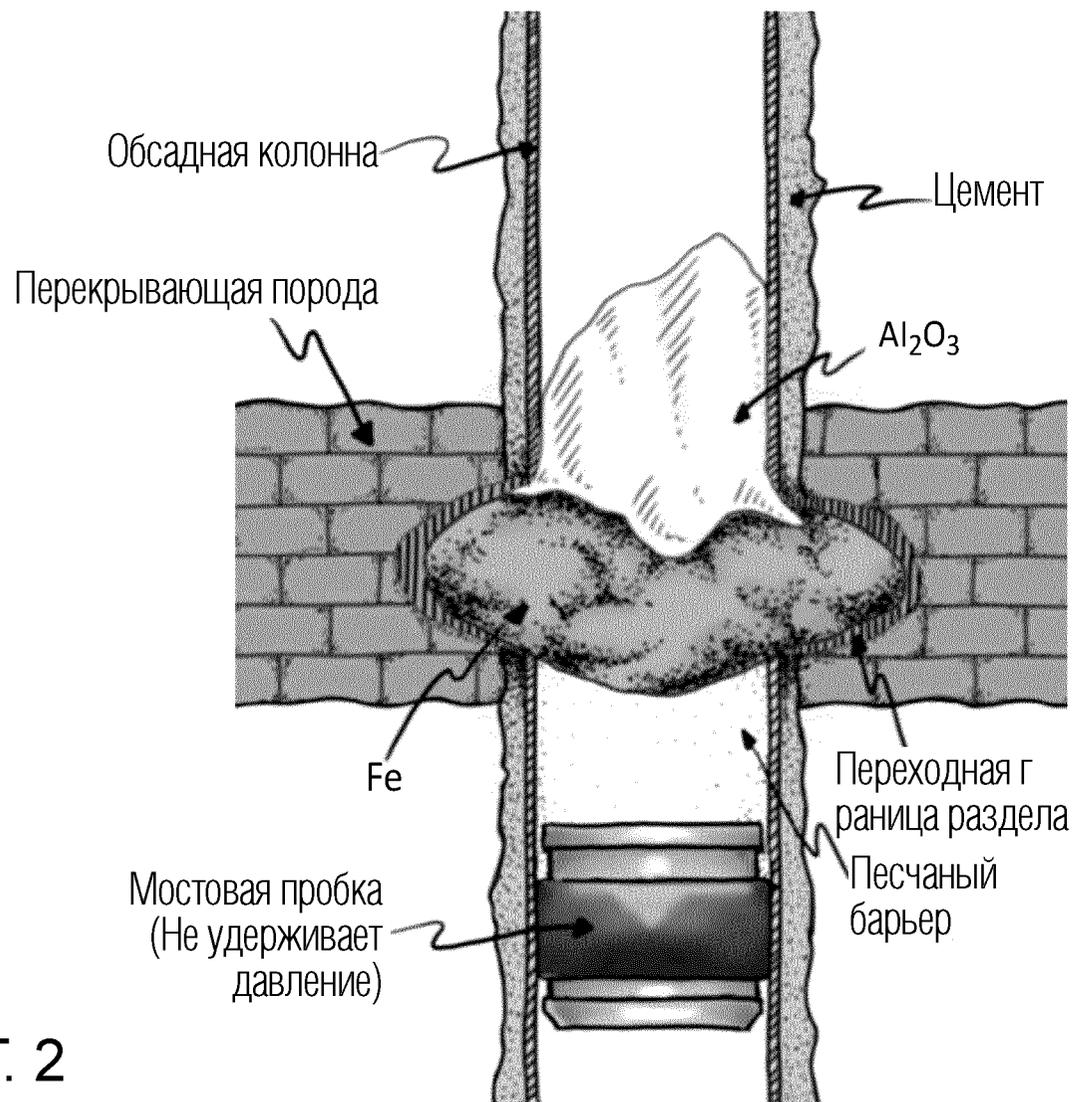
второй элемент скважинного барьера между породами (12) из стали поверх первого
 элемента скважинного барьера (11), и

третий элемент скважинного барьера между породами (13) из шлака из стали
 поверх второго элемента скважинного барьера (12).

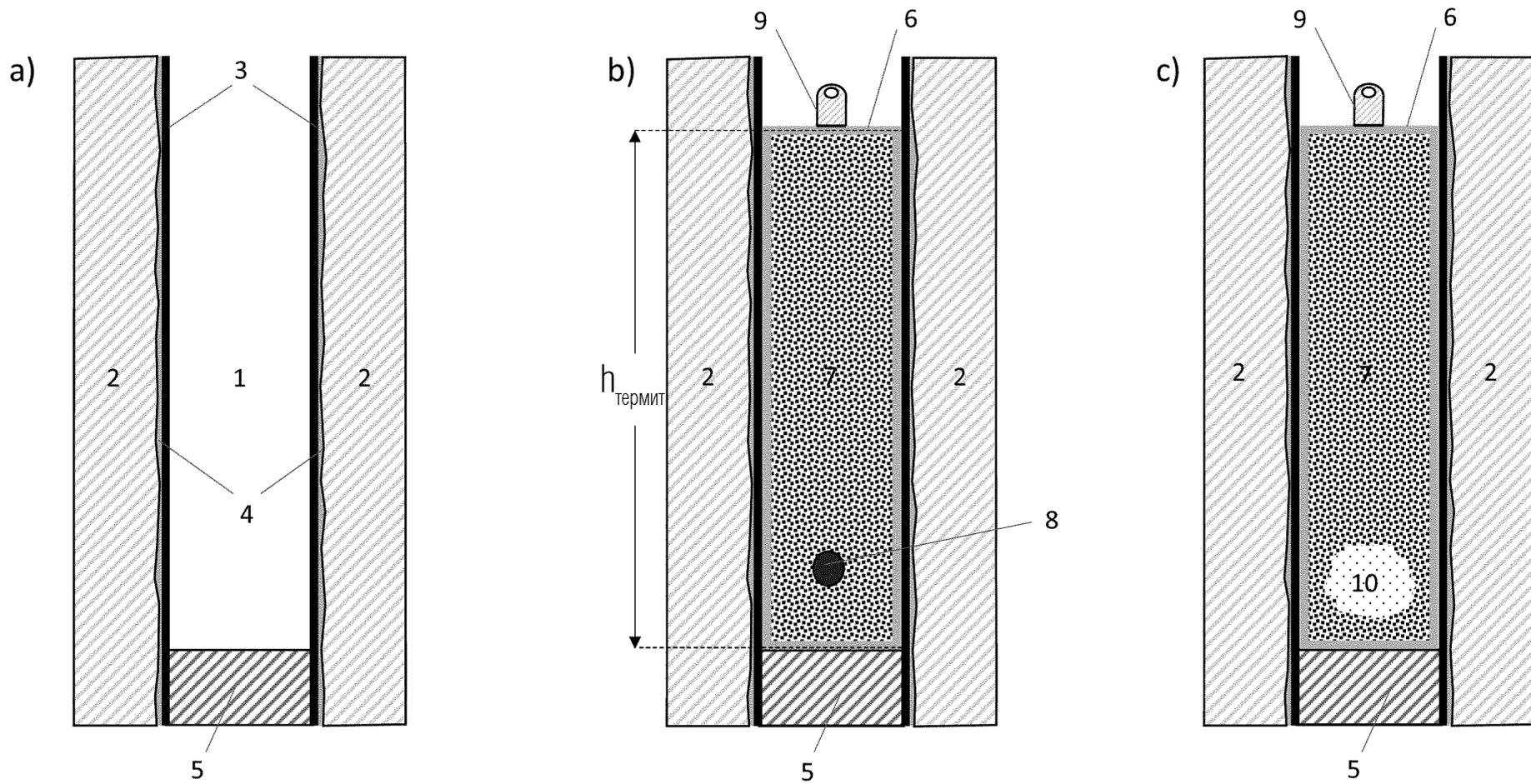
19. Поперечный скважинный барьер между породами по п. 18, в котором
 поперечный скважинный барьер между породами получают в соответствии с любым из
 пунктов 10-13.



ФИГ. 1

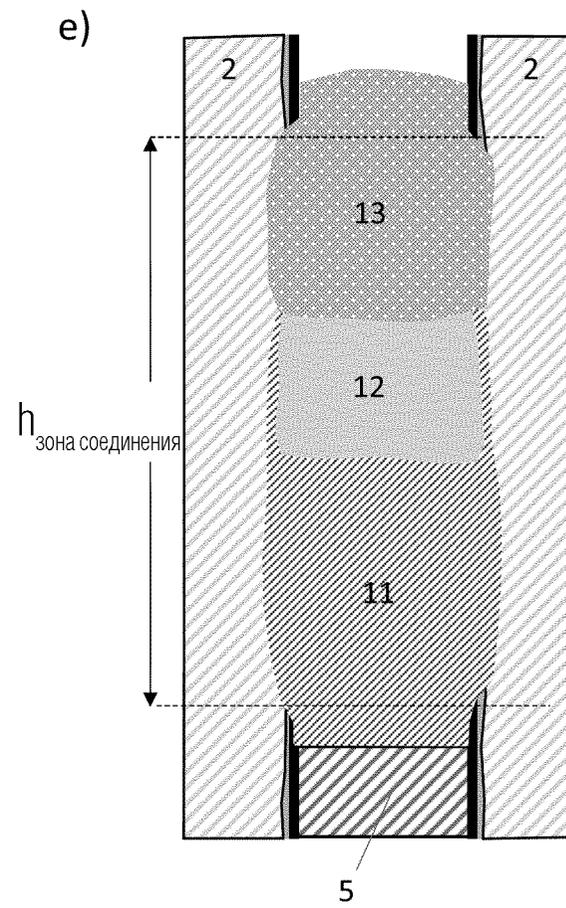
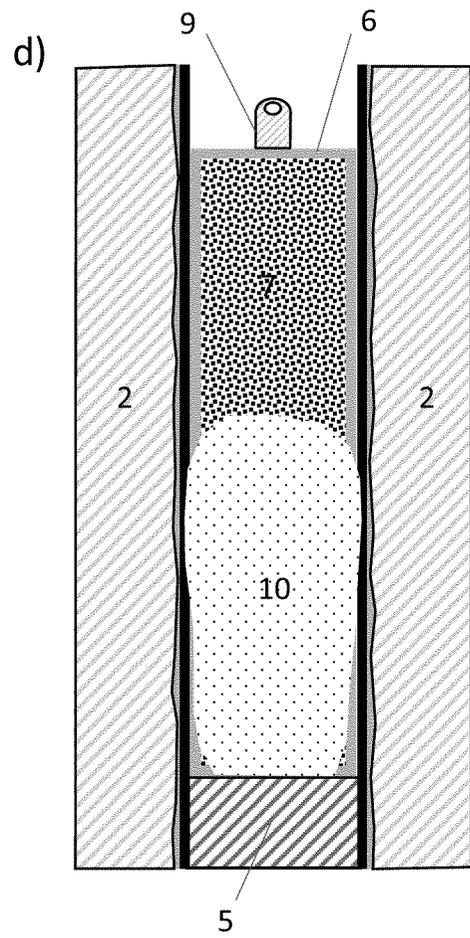


ФИГ. 2

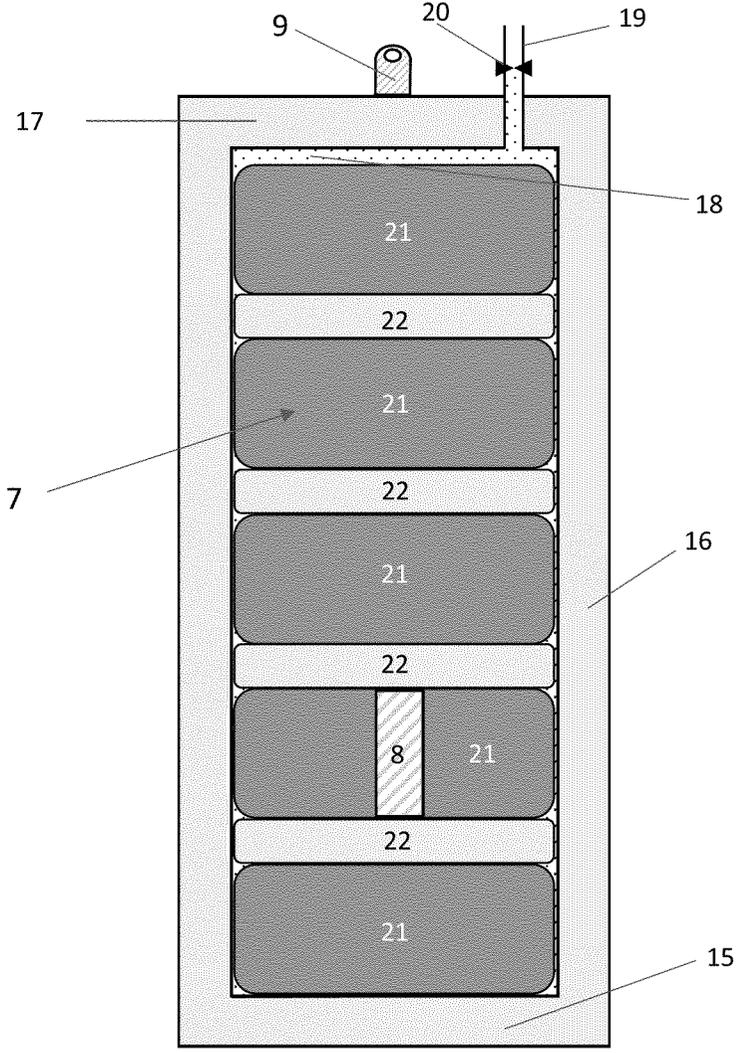


3/14

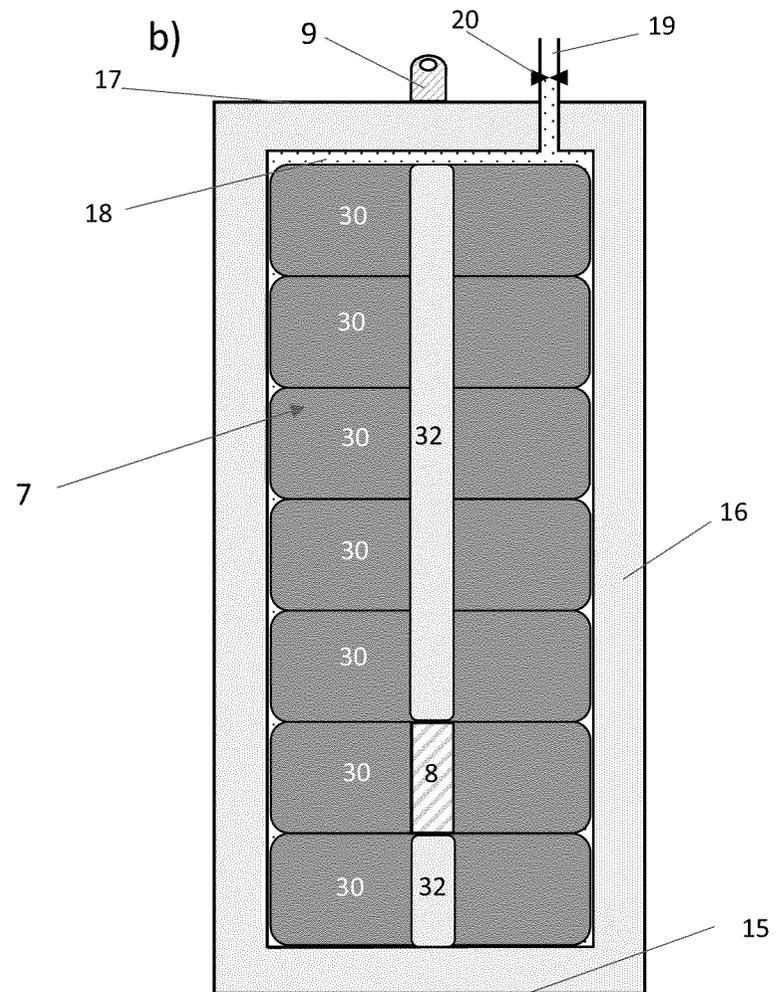
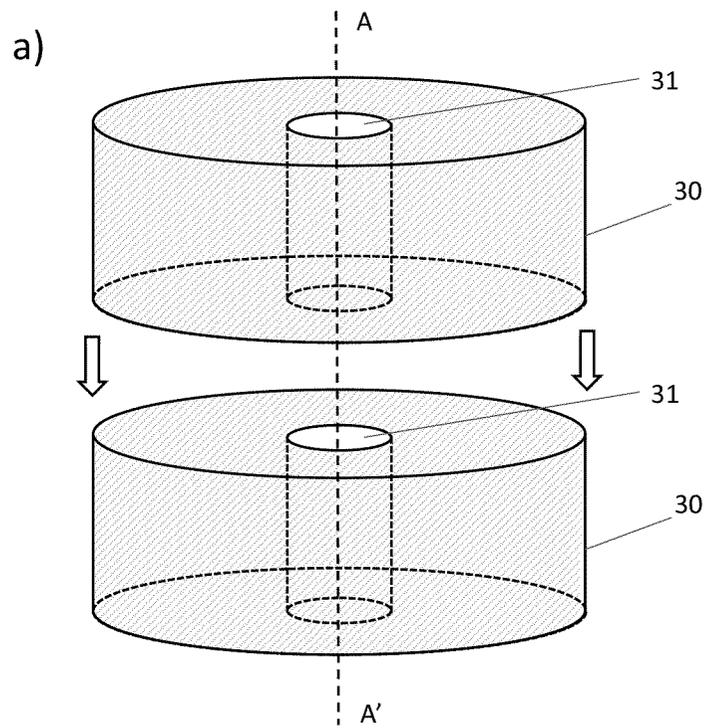
ФИГ. 3



ФИГ. 3



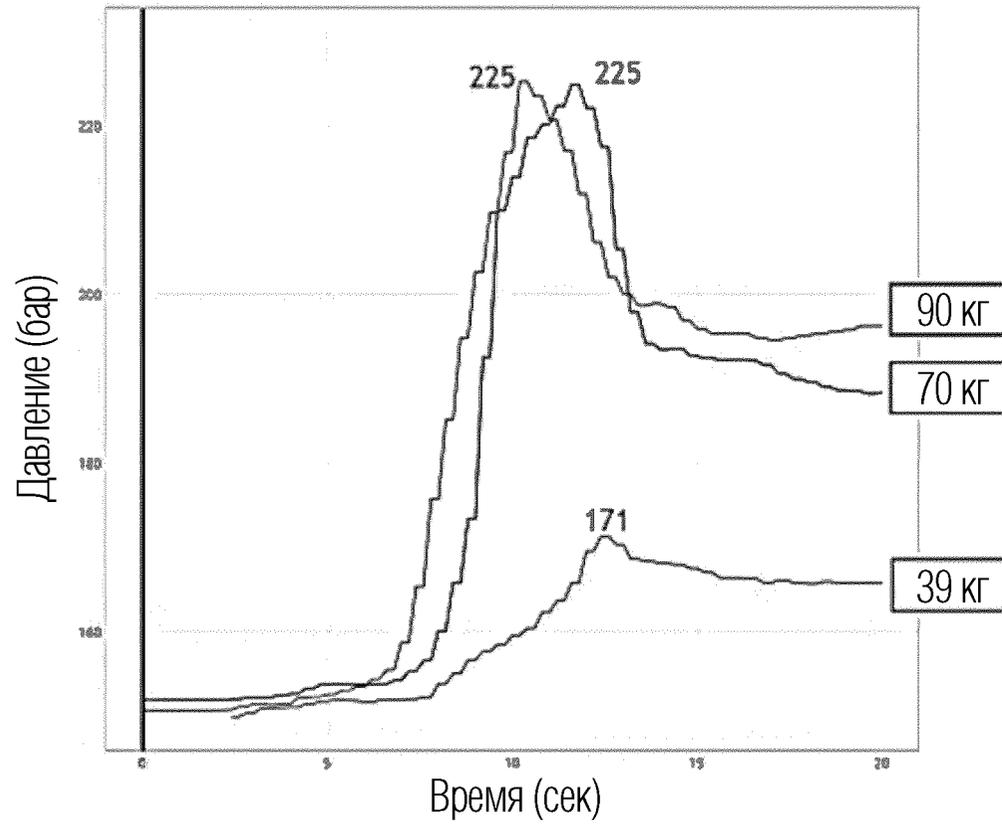
ФИГ. 4



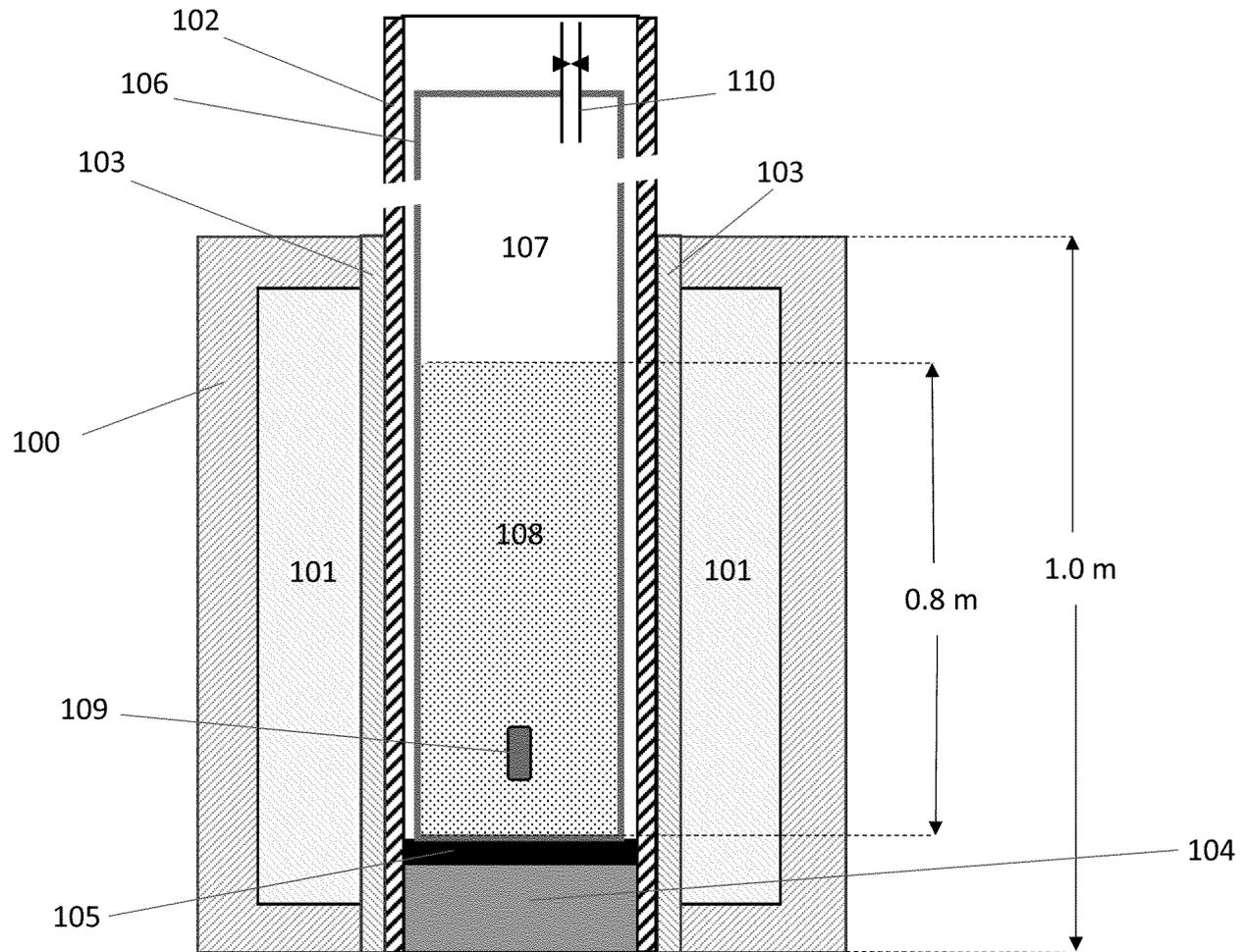
6/14

ФИГ. 5

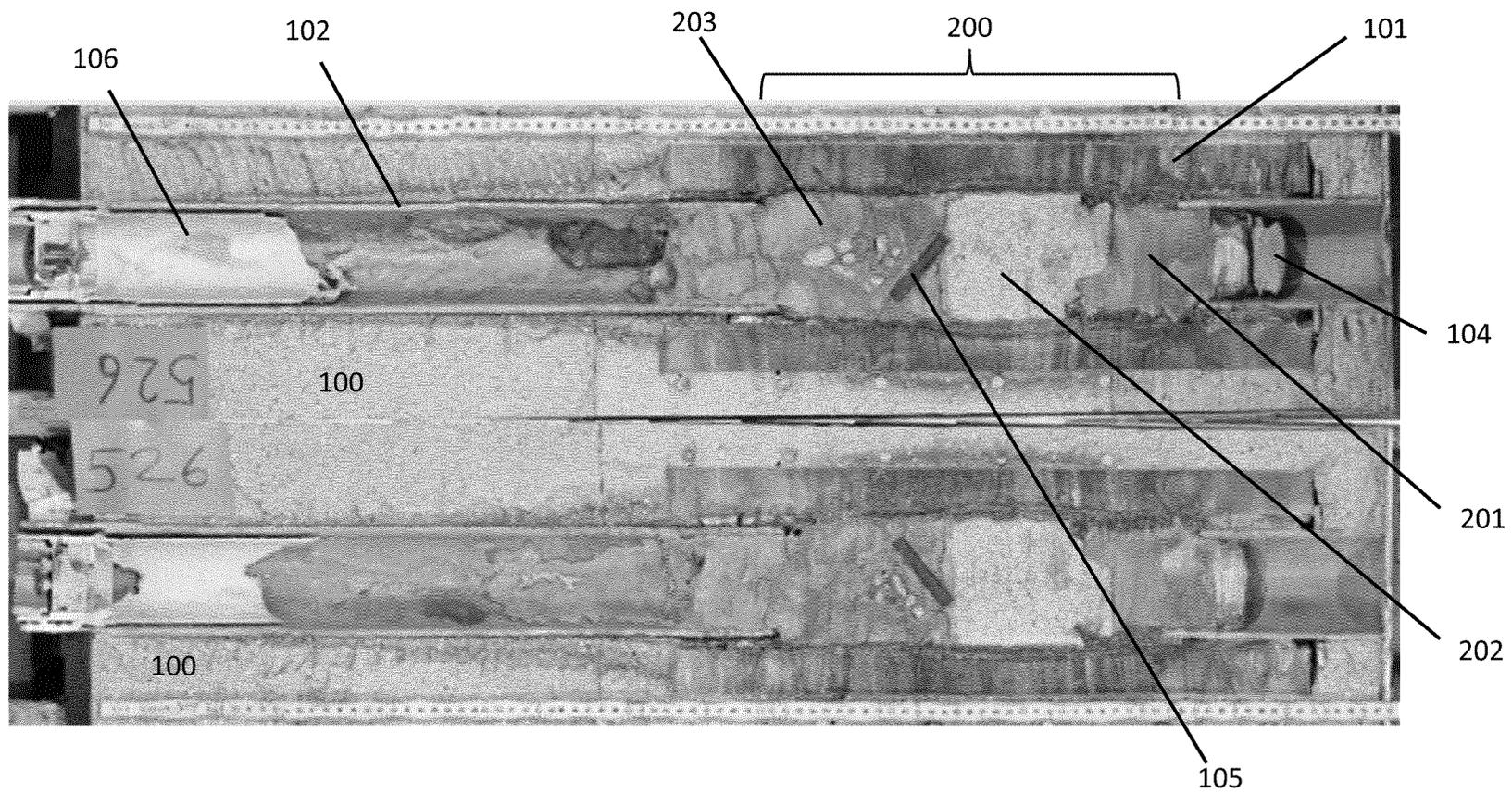
FST Журнал давления



ФИГ. 6

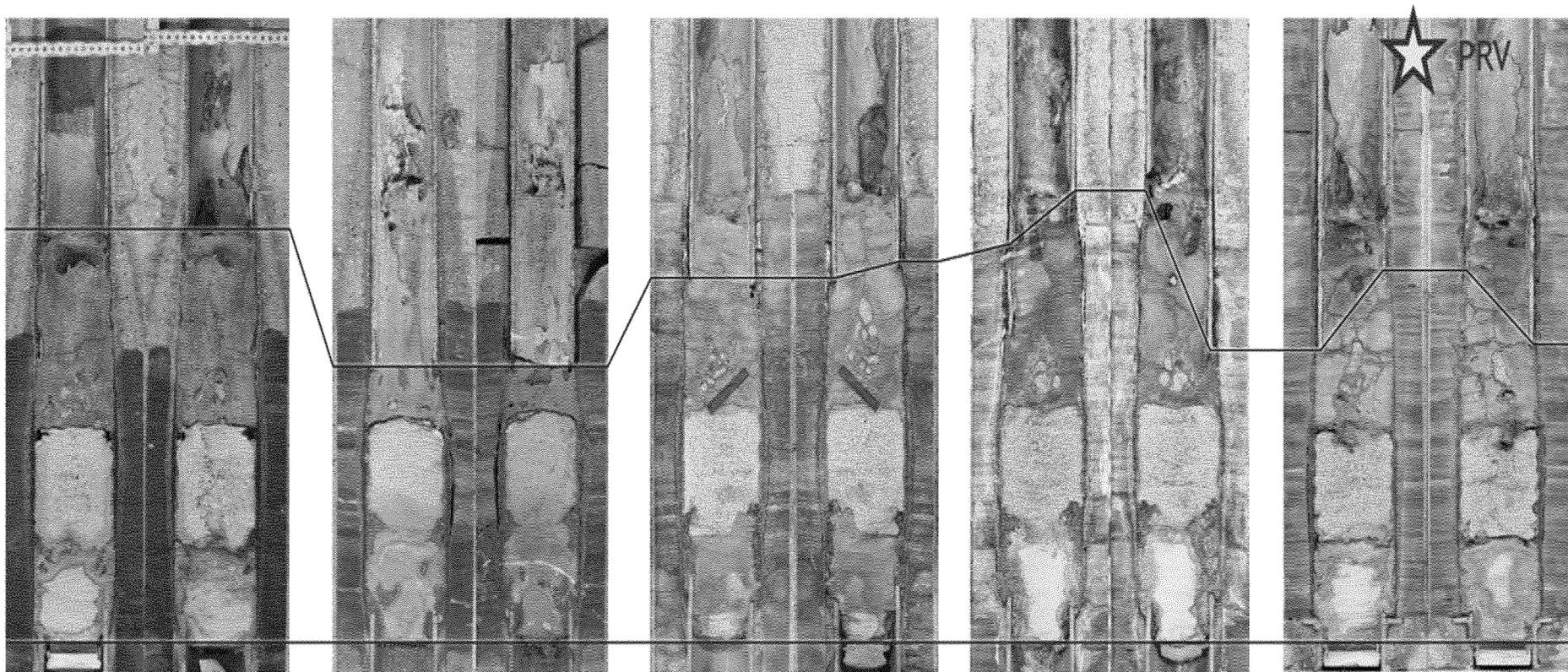


ФИГ. 7



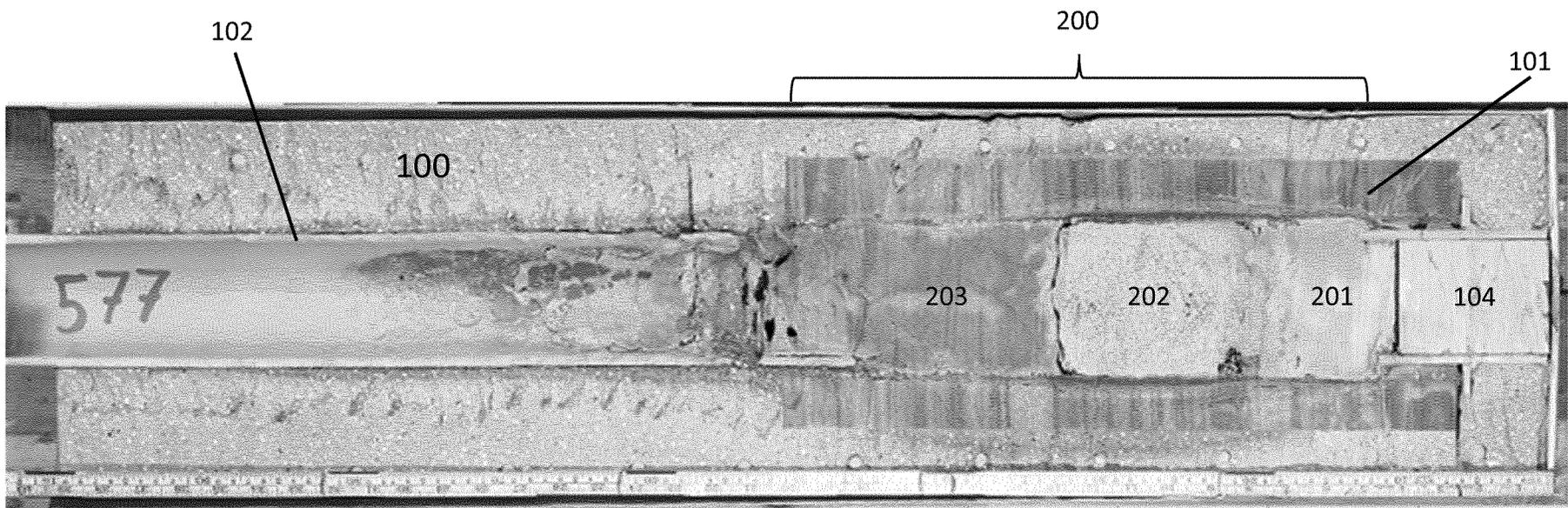
9/14

ФИГ. 8



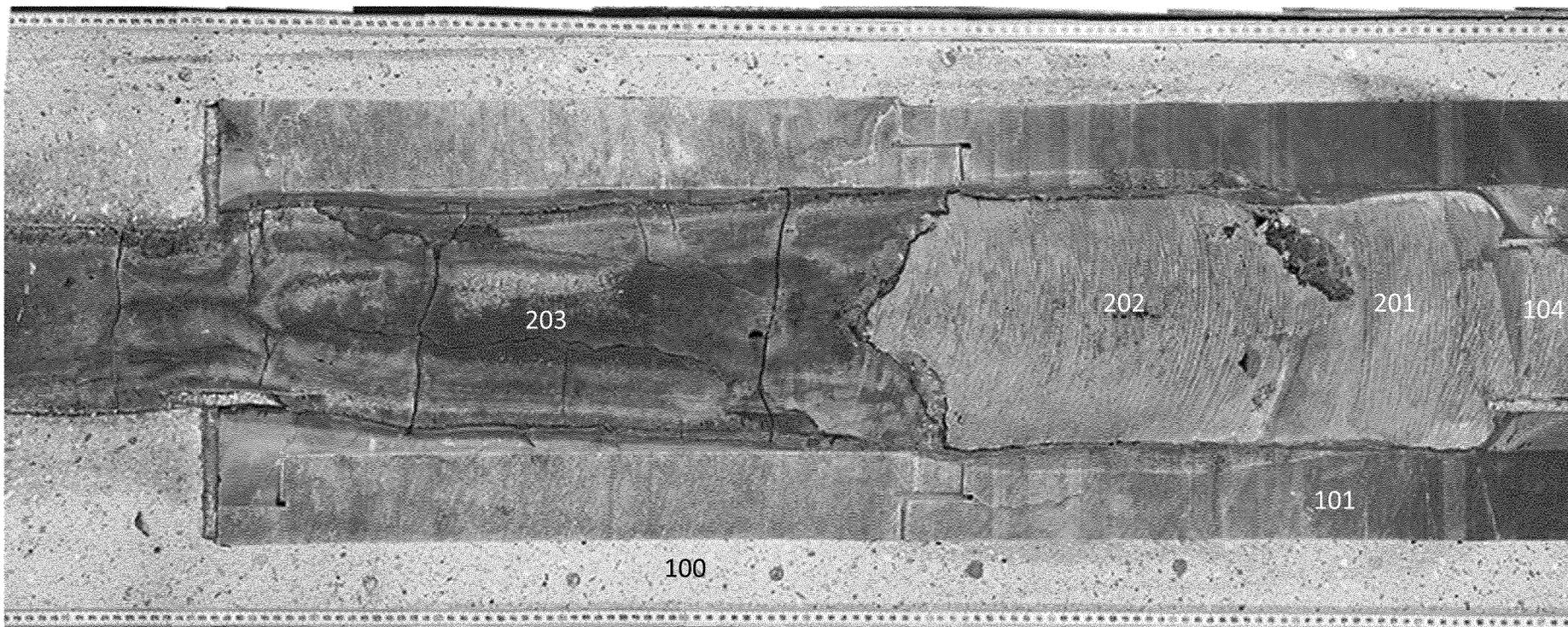
ФИГ. 9

10/14



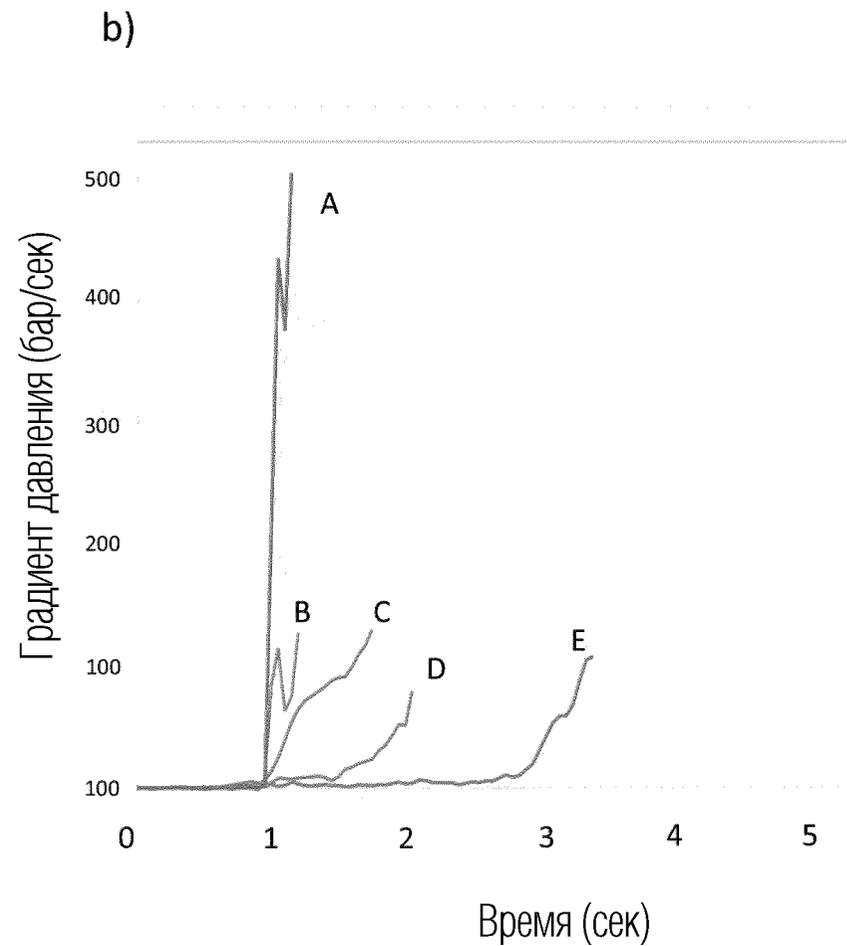
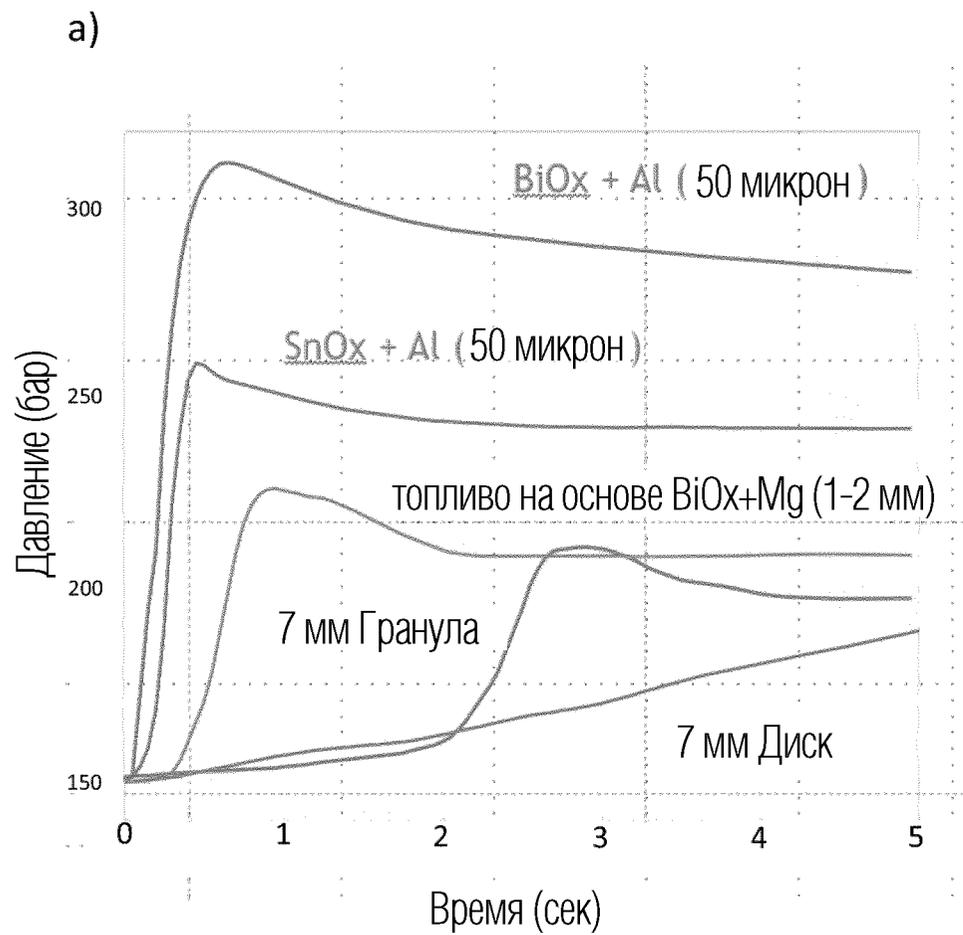
11/14

ФИГ. 10



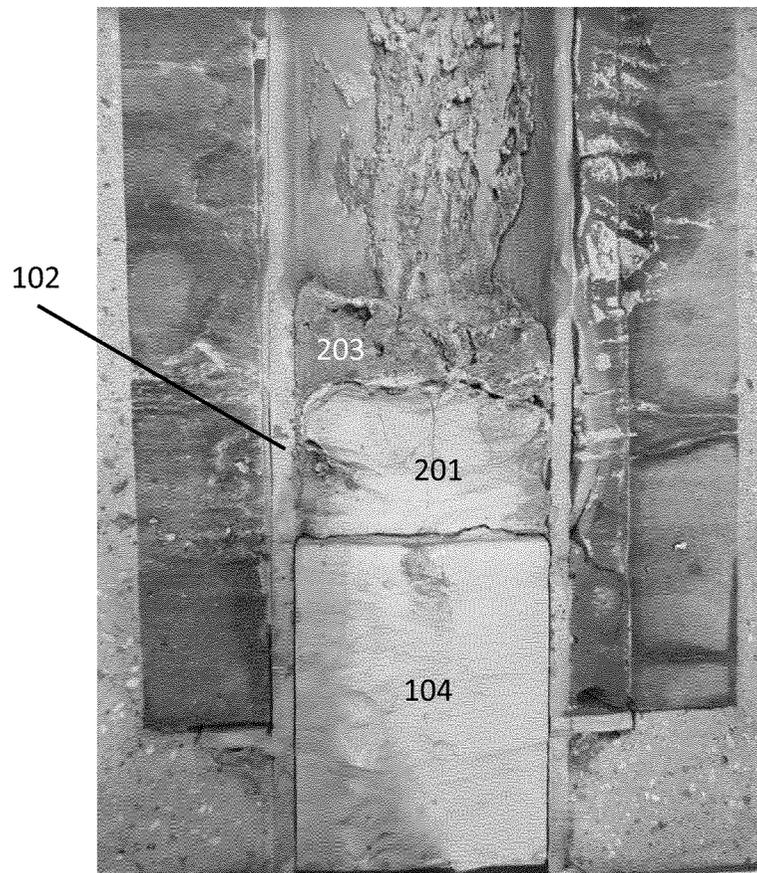
12/14

ФИГ. 11



ФИГ. 12

a)



b)



ФИГ. 13