



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2014151494, 03.06.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
03.06.2013Дата регистрации:
05.09.2017

Приоритет(ы):

(30) Конвенционный приоритет:
01.06.2012 FR 1255132

(43) Дата публикации заявки: 27.07.2016 Бюл. № 21

(45) Опубликовано: 05.09.2017 Бюл. № 25

(85) Дата начала рассмотрения заявки РСТ на
национальной фазе: 12.01.2015(86) Заявка РСТ:
EP 2013/061407 (03.06.2013)(87) Публикация заявки РСТ:
WO 2013/178826 (05.12.2013)Адрес для переписки:
191002, Санкт-Петербург, а/я 5, ООО "Ляпунов
и партнёры"

(72) Автор(ы):

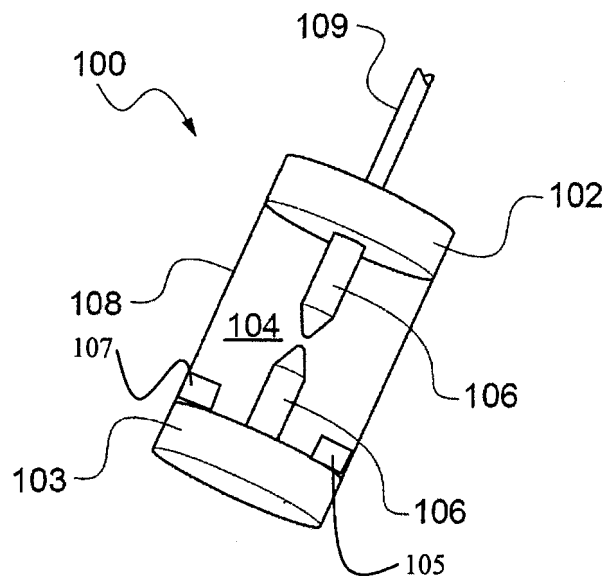
РЕ-БЕТБЕДЕР Франк (FR),
МАРТЕН Жюстен (FR),
РЕСС Тьерри (FR),
СИЛЬВЕСТР ДЕ ФЕРРОН Антуан (FR)(73) Патентообладатель(и):
ТОТАЛЬ С.А. (FR)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: WO 2009073475 A2, 11.06.2009. RU
2090747 C1, 20.09.1997. RU 2263775 C1,
10.11.2005. RU 76256 U1, 20.09.2008. RU
2373387 C1, 20.11.2009. US 4343356 A,
10.08.1982. US 4345650 A, 24.08.1982. US
20010011590 A1, 09.08.2001.

(54) УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГИДРОРАЗРЫВ ПЛАСТА

(57) Реферат:

Изобретение относится к устройству и способу для гидроразрыва геологического пласта углеводородов, а также к способу добычи углеводородов и способу калибровки устройства. Предложено устройство для гидроразрыва геологического углеводородного пласта, содержащее два пакера (102, 103), образующих между собой замкнутое пространство (104) в скважине, пробуренной в пласте, регулятор для регулирования температуры текучей среды в указанном замкнутом пространстве, пару из двух

электродов (106), расположенных в указанном замкнутом пространстве, и электрическую цепь для генерации электрической дуги между указанными двумя электродами. Указанная цепь содержит по меньшей мере один источник напряжения, соединенный с электродами (106), и индукционную катушку между источником напряжения и одним из двух электродов. Технический результат заключается в повышении эффективности гидроразрыва пласта. 4 н. и 13 з.п. ф-лы, 23 ил.



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(21)(22) Application: **2014151494, 03.06.2013**(24) Effective date for property rights:
03.06.2013Registration date:
05.09.2017

Priority:

(30) Convention priority:
01.06.2012 FR 1255132(43) Application published: **27.07.2016** Bull. № 21(45) Date of publication: **05.09.2017** Bull. № 25(85) Commencement of national phase: **12.01.2015**(86) PCT application:
EP 2013/061407 (03.06.2013)(87) PCT publication:
WO 2013/178826 (05.12.2013)Mail address:
**191002, Sankt-Peterburg, a/ya 5, OOO "Lyapunov i
partnery"**

(72) Inventor(s):

**RE-BETBEDER Frank (FR),
MARTEN Zhyusten (FR),
RESS Terri (FR),
SILVESTRE DE FERRON Antuan (FR)**

(73) Proprietor(s):

TOTAL S.A. (FR)(54) **ADVANCED ELECTRICAL HYDROLYSIS OF THE PLASTER**

(57) Abstract:

FIELD: mining.

SUBSTANCE: device for fracturing a geological hydrocarbon formation is provided comprising two packers (102, 103) forming a closed space (104) between each other in a well drilled in the formation, a regulator for regulating the temperature of the fluid in said enclosed space, a pair of two electrodes (106) located in said enclosed space and an electric circuit

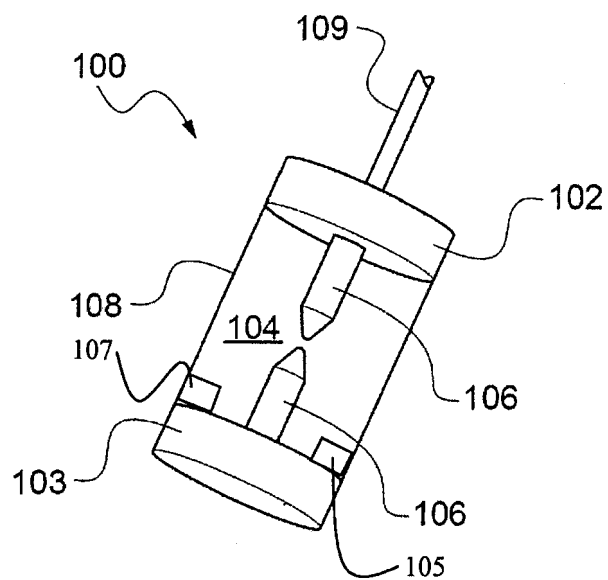
for generating an electric arc between said two electrodes. The circuit comprises at least one voltage source connected to the electrodes (106) and an induction coil between the voltage source and one of the two electrodes.

EFFECT: Increasing the efficiency of hydraulic fracturing.

17 cl, 23 dwg

RU
2 630 000
C2

C2
2 630 000
RU



Фиг. 1

Настоящее изобретение относится к устройству и способу для гидроразрыва геологического пласта углеводородов, а также к способу добычи углеводородов и способу калибровки устройства.

При добыче углеводородов проницаемость и/или пористость материала, образующего
5 пласт, влияет на добычу углеводородов, в частности на скорость добычи и на рентабельность. Об этом, главным образом, написано в статье «Porosity and permeability of Eastern Devonian Shale gas», Soeder, D.J., опубликованной в SPE Formation Evaluation, 1988, vol. 3, №1, с. 116-124, которая представляет собой исследование восьми образцов
10 девонского сланцевого газа бассейна Аппалачей. В данной статье объясняется, в частности, что добыча этого сланцевого газа затруднена тем, что проницаемость пласта (то есть материала, из которого состоит пласт) является низкой.

Для повышения скорости добычи углеводородов, особенно в пласте с низкой проницаемостью и низкой пористостью, существуют различные методы. В данных методах используют статический или динамический гидроразрыв пласта.

15 Статический разрыв представляет собой направленное смещение пласта при помощи закачки текучей среды под очень высоким давлением для появления разлома в породе. Гидроразрыв осуществляют в результате механического "напряжения", возникающего под воздействием гидравлического давления, полученного посредством текучей среды, закачанной под высоким давлением из скважины, пробуренной с поверхности.
20 Используют также термины «ГРП», «разрыв пласта», или более общий термин «фрекинг», или «массированный гидравлический разрыв пласта». В документе US 2009/044945 A1, в частности, описан способ статического гидроразрыва пласта, как описано выше.

Статический гидроразрыв имеет недостаток, заключающийся в том, что такой
25 гидроразрыв пласта является, как правило, однонаправленным. Таким образом, обеспечивают более быструю добычу только тех углеводородов, которые находятся в части пласта, расположенного вокруг трещины, являющейся глубокой, но очень локальной.

Для получения более широко распространяющегося разлома используют
30 динамический или электрический гидроразрыв. При электрическом гидроразрыве генерируют электрическую дугу в скважине, пробуренной в пласте (обычно в эксплуатационной скважине). Электрическая дуга вызывает волну давления, которая обеспечивает разрыв пласта во всех направлениях вокруг волны, увеличивая тем самым его проницаемость.

35 Электрический гидроразрыв описан в нескольких документах. Например, в документе US 4074758 представлен способ, состоящий в генерации электрогидравлической ударной волны в жидкости ствола скважины, с целью увеличения коэффициента извлечения нефти. В документе US 4164978 предложено направлять следом за ударной волной ультразвуковую волну. В документе US 5106164 также описан способ генерации взрыва
40 плазмы для разрыва породы, но только для отверстий небольшой глубины, для применения в горном деле, но не для добычи углеводородов. В документах US 4651311 и US 4706228 описано устройство для генерации электрического разряда посредством электродов в камере, содержащей электролит, при этом находящиеся в нем электроды не подвержены эрозии от плазменного разряда. В документе WO 2009/073475 описан
45 способ генерации акустической волны в жидкой среде, содержащейся в скважине, с использованием устройства, содержащего два электрода между верхним пакером и нижним пакером, образующими замкнутое пространство. В данном документе раскрыто, что акустическую волну поддерживают в состоянии «не ударной волны» в целях

повышения гидроразрыва пласта, не объясняя при этом различий между «обычной» акустической волной и «ударной» волной.

Ни один из этих документов не предлагает полностью удовлетворительного гидроразрыва пласта. Следовательно, существует потребность в усовершенствованном способе гидроразрыва углеводородного пласта.

Для решения данной задачи предложено устройство для гидроразрыва геологического углеводородного пласта, причем устройство содержит два пакера, образующих между собой замкнутое пространство в скважине, пробуренной в пласте, регулятор для регулирования температуры текучей среды в указанном замкнутом пространстве, пару из двух электродов, расположенных в указанном замкнутом пространстве, и электрическую цепь для генерации электрической дуги между двумя электродами. Цепь содержит по меньшей мере один источник напряжения, соединенный с электродами, и катушку индуктивности между источником напряжения и одним из двух электродов.

В разных вариантах устройство может содержать один или несколько из следующих признаков:

- температурный регулятор выполнен с возможностью регулирования температуры текучей среды для оптимизации энергетической эффективности фазы предварительного разряда во время генерации электрической дуги;

- температурный регулятор выполнен с возможностью поддержания температуры текучей среды в диапазоне значений от 45 до 67°C, предпочтительно выше 50°C и/или ниже 62°C;

- устройство дополнительно содержит регулятор для регулирования давления текучей среды таким образом, чтобы поддерживать его по существу на уровне атмосферного давления;

- температурный регулятор содержит систему охлаждения текучей среды;

- индукционная катушка имеет настраиваемую индуктивность, предпочтительно от 1 мкГн до 100 мГн, более предпочтительно от 10 мкГн до 1 мГн;

- расстояние между двумя электродами является настраиваемым, предпочтительно в диапазоне от 0,2 до 5 см, более предпочтительно от 1 до 3 см;

- источник напряжения содержит конденсатор, имеющий емкость более 1 мкФ, предпочтительно более 10 мкФ;

- мощность конденсатора является настраиваемой, предпочтительно в диапазоне менее 1000 мкФ, более предпочтительно менее 200 мкФ;

- цепь дополнительно содержит генератор Маркса и ферриты, образующие

- насыщающийся индуктор в канале, идущем от конденсатора непосредственно к индуктору, причем ферриты насыщаются, когда генератор Маркса разряжен;

- конденсатор отделен от индуктора искровым промежутком, иницируемым импульсным генератором;

- электроды имеют радиус от 0,1 мм до 50 мм, предпочтительно от 1 мм до 30 мм;

- устройство содержит систему сброса; и/или

- устройство содержит несколько пар электродов.

Также предложен способ гидроразрыва геологического углеводородного пласта.

Способ содержит электрический гидроразрыв пласта путем генерации электрической дуги посредством описанной выше цепи, и одновременно регулирование температуры текучей среды в замкнутом пространстве устройства.

Также предложен способ добычи углеводородов, содержащий гидроразрыв геологического углеводородного пласта с использованием описанного выше способа.

Также предложен способ калибровки температурного регулятора описанного выше

устройства. Способ калибровки содержит следующие этапы: обеспечение наличия устройства, определение предпробойного напряжения, при превышении которого генерируется электрическая дуга, измерение напряжения пробоя на клеммах электродов и времени пробоя в зависимости от температуры текучей среды, путем приложения предпробойного напряжения и изменения температуры текучей среды, выведение на основе предыдущего этапа энергетической эффективности фазы предварительного разряда в зависимости от температуры, и определение целевой температуры или температурного диапазона для температурного регулятора в зависимости от максимальной энергетической эффективности, выведенной на предыдущем этапе.

Другие признаки и преимущества изобретения очевидны из нижеследующего подробного описания вариантов осуществления изобретения, приведенных исключительно в качестве примеров и со ссылкой на прилагаемые чертежи, на которых:

на фиг. 1-4 показаны примеры устройства;

на фиг. 5-17 показаны примеры измерений;

на фиг. 18-20 показаны блок-схемы, иллюстрирующие предложенные способы гидроразрыва; и

на фиг. 21-23 показан пример электрического гидроразрыва пласта способа гидроразрыва, проиллюстрированного на любой из фиг. 18-20.

Предложено устройство для гидроразрыва геологических углеводородных пластов.

Устройство содержит два пакера, образующих между собой замкнутое пространство в скважине, пробуренной в пласте (то есть данное пространство должно быть замкнутым по меньшей мере тогда, когда устройство установлено в скважине, пробуренной в пласте). Устройство содержит регулятор для регулирования температуры текучей среды в замкнутом пространстве. Устройство содержит пару из двух электродов,

расположенных в замкнутом пространстве. Устройство дополнительно содержит электрическую цепь (конфигурированную/предназначенную/предусмотренную) для генерации электрической дуги между двумя электродами. Цепь содержит по меньшей мере один источник напряжения, соединенный с электродами, и индукционную катушку между источником напряжения и одним из двух электродов.

Указанное устройство обеспечивает возможность осуществления гидроразрыва углеводородного пласта усовершенствованным способом. В частности, указанное устройство позволяет генерировать электрическую дугу между двумя электродами, и, таким образом, осуществлять электрический гидроразрыв пласта, когда устройство расположено в скважине, пробуренной в пласте. Индукционная катушка позволяет получить электрическую дугу, которая порождает волну давления, осуществляя, тем самым, усовершенствованный гидроразрыв пласта. Температурный регулятор обеспечивает настройку температуры и, тем самым, получение температуры, позволяющей создать волну давления, которая обеспечивает хороший гидроразрыв пласта.

Термин «электрическая дуга» обозначает электрический ток, созданный в изолирующей среде. Генерация электрической дуги вызывает «волну давления», то есть механическую волну, оказывающую давление на среду, через которую она проходит. Генерация дуги обеспечивает более рассеянный/разнонаправленный гидроразрыв пласта, чем при статическом гидроразрыве пласта. Таким образом, генерация электрической дуги приводит к появлению микротрещин во всех направлениях вокруг положения электрической дуги и повышает, тем самым, проницаемость пласта, как правило, с коэффициентом от 10 до 1000. Кроме того, данное увеличение проницаемости получают без использования средств для предотвращения закрытия микротрещин,

например, закачки проппанта. Кроме того, электрический гидроразрыв не требует значительного количества энергии или слишком большого количества воды. Поэтому нет необходимости в наличии специальной системы рециркуляции воды.

Таким образом, возможно получить доступ к углеводородам пласта, доступ к которым затруднен при использовании статического гидроразрыва. Сочетание статического гидроразрыва и электрического гидроразрыва позволяет обеспечить усовершенствованный гидроразрыв пласта в целом.

Электрическую дугу предпочтительно генерируют в текучей среде, содержащейся в скважине, пробуренной в пласте. Таким образом, волна давления, порождаемая электрической дугой, передается с меньшим затуханием. Скважина содержит текучую среду, которая, как правило, представляет собой воду. Другими словами, при успешном применении электрического гидроразрыва после бурения буровая скважина может быть автоматически заполнена водой, присутствующей в пласте. Если буровая скважина автоматически не заполняется водой, возможно ее искусственное заполнение.

Перед описанием указанного способа электрического гидроразрыва будет описано устройство. Однако, данный способ будет упомянут при описании устройства, при этом очевидно, что различные рабочие функции устройства (например, различные действия, которые оно позволяет выполнить) могут быть включены в способ, даже если они не включены в описание способа.

Цепь содержит по меньшей мере одну индукционную катушку между источником напряжения и электродом, с которым она соединена. Индукционная катушка представляет собой компонент, который вызывает временную задержку тока по отношению к напряжению. Значение индуктивности выражается в Генри. Индукционная катушка, как вариант, может быть намотана вокруг сердечника из ферромагнитного материала или ферритов. Индукционная катушка также известна под названиями «индуктивность» или «соленоид» или «катушка самоиндукции». Индуктивность сглаживает фронт тока в цепи. Это позволяет добиться увеличения времени нарастания волны давления, при этом такая волна давления лучше проникает в пласт. Таким образом, достигается более глубокий гидроразрыв пласта. В частности, индуктивность может быть больше 1 мкГн или 10 мкГн, и/или меньше 100 мГн или 1 мГн.

Пакеры могут быть выполнены так, чтобы повторять форму стенок ствола скважины, как правило цилиндрическую, образуя, тем самым, замкнутое пространство. В альтернативном или дополнительном варианте осуществления изобретения устройство может содержать мембрану, которая ограничивает замкнутое пространство. Мембрана может быть герметичной (или водонепроницаемой) и жесткой. Это обеспечивает возможность отделения давления в замкнутом пространстве от давления окружающей среды, например, от гидростатического давления в стволе скважины, если он затоплен (например, в результате гидравлического разрыва пласта). В этом случае мембрана предпочтительно выполнена из материала, обеспечивающего хорошую проводимость волны давления, для оптимизации электрического гидроразрыва. Таким образом, текучая среда может представлять собой текучую среду (например, воду), присутствующую в стволе скважины, или уже содержащуюся в устройстве перед его использованием. В последнем случае текучая среда может представлять собой деминерализованную воду (например, с проводимостью $\sigma=40$ мкСм/см). Это позволяет увеличить значение эквивалентного сопротивления замкнутой области и, таким образом, ограничить энергию пробоя. В устройстве может быть предусмотрено отверстие для пополнения запасов воды.

Под «замкнутым» пространством подразумевается, что данное замкнутое

пространство выполнено таким образом, что температура внутри него может быть изменена посредством температурного регулятора, и, опционально, таким образом, что давление внутри него также может быть изменено опционально посредством регулятора давления, выполненного с возможностью регулирования давления текучей среды в замкнутом пространстве (например, регулятора давления, содержащего насос, например, насос для повышения давления текучей среды). Данная(ые) регулировка(и) позволяет(ют) оптимизировать текучую среду, находящуюся в замкнутом пространстве, для облегчения возникновения электрической дуги между двумя электродами и/или для того, чтобы полученная электрическая дуга привела к возникновению хорошей волны давления относительно условий пласта или типа текучей среды. Таким образом, «замкнутость» может, но не обязательно, означать полное закрытие, и аналогично, герметизация может, но не обязательно, означать полную герметизацию.

Температурный регулятор представляет собой устройство, которое поддерживает (по меньшей мере приблизительно) температуру текучей среды равной целевому значению или в пределах целевого диапазона. Таким образом, температурный регулятор может содержать термостат. Целевое значение может быть предварительно задано или вычислено, опционально в зависимости от входных значений, например, значений, полученных на основании измерений, например, давления текучей среды. В частности, целевое значение может быть подобрано к условиям пласта и/или текучей среды в замкнутом пространстве и/или характеристикам устройства гидроразрыва и/или текучей среды таким образом, чтобы получить «наилучшую» температуру или «наилучший» температурный диапазон в зависимости от этих условий и/или характеристик. Таким образом, температурный регулятор может содержать температурный датчик и/или модуль управления с процессором, соединенным с запоминающим устройством, которое регистрирует целевое значение, или содержащим программу, обеспечивающую возможность вычисления целевого значения. Дополнительно, температурный регулятор может содержать систему нагревания текучей среды и/или систему охлаждения текучей среды для осуществления настройки. Данные компоненты известны специалисту в области техники.

Под «наилучшей» температурой или «наилучшим» температурным диапазоном подразумевается температура(ы), которая(ые), с учетом характеристик устройства и текучей среды, а также давления текучей среды, позволяет(ют) получить волну давления (возникающую в результате генерации электрической дуги), приводящую к более глубокому и/или более обширному гидроразрыву пласта. В результате испытаний, в том числе тех, что представлены ниже, неожиданно выяснилось, что указанная оптимальная температура существует, в то время, как можно было ожидать, что чем больше температуру текучей среды приближают к температуре кипения, при этом не достигая ее, тем эффективнее должен быть гидроразрыв пласта. Таким образом, температурный регулятор обеспечивает возможность регулирования температуры для ее поддержания в значении, близком к целевому значению, например, намного ниже температуры кипения текучей среды, и неожиданного получения усовершенствованного гидроразрыва пласта.

В частности, температурный регулятор может настраивать (может быть выполнен с возможностью настройки) температуру(ы) текучей среды для оптимизации энергетической эффективности фазы предварительного разряда во время генерации электрической дуги. Энергетическая эффективность фазы предварительного разряда представляет собой соотношение (или результат измерения, пропорциональный этому соотношению) между электрической энергией, необходимой для возбуждения волны

давления, порождаемой электрической дугой, и электрической энергией, вырабатываемой экспериментальным устройством (данная электрическая энергия определяется размером устройства). Чем выше энергетическая эффективность фазы предварительного разряда, тем больше после фазы предварительного разряда «остается» доступной энергии для самой фазы разряда, в результате чего волна давления является более мощной. Другими словами, целевое значение выбирают так, чтобы оптимизировать (по меньшей мере приблизительно) данный результат измерения.

Например, этого можно достичь путем использования способа калибровки (то есть конфигурации перед использованием) температурного регулятора устройства. Прежде всего, можно обеспечить наличие устройства, например, в реальных условиях в скважине, или же воспроизвести в лаборатории давление текучей среды, при котором предполагается использование устройства (другими словами, также обеспечивают наличие текучей среды). Также можно определить предпробойное напряжение устройства (то есть пороговое напряжение, приложенное между электродами, выше которого генерируется электрическая дуга). Это может быть выполнено различными способами, один из которых приведен ниже при описании испытаний, в частности со ссылками на фиг. 11-17. Затем можно измерить напряжение пробоя на клеммах электродов (то есть напряжение на клеммах электродов, необходимое для инициирования электрической дуги) и время пробоя (то есть промежуток времени, в течение которого должно быть приложено напряжение, необходимое для инициирования электрической дуги) в зависимости от температуры текучей среды (то есть осуществляют изменение температуры для выполнения различных измерений). Для этого прикладывают предпробойное напряжение (определенное ранее) и изменяют температуру текучей среды. После этого из предыдущего этапа можно вывести энергетическую эффективность фазы предварительного разряда в зависимости от температуры (один из вариантов выполнения данного этапа описан ниже, в частности, со ссылками на фиг. 11-17). Наконец, можно определить целевую температуру или температурный диапазон для температурного регулятора в зависимости от (то есть согласно) максимальной энергетической эффективности, выведенной из предыдущего этапа.

В одном примере температурный регулятор может поддерживать температуру текучей среды в диапазоне значений от 45 до 67°C, предпочтительно выше 50°C и/или ниже 62°C. Данные значения температуры текучей среды в замкнутом пространстве позволяют получить энергетическую эффективность фазы предварительного разряда больше 80% при атмосферном давлении. Таким образом, устройство соответственно содержит регулятор для регулирования давления текучей среды таким образом, чтобы поддерживать его по существу на уровне атмосферного давления.

Как указано выше, температурный регулятор может содержать систему охлаждения текучей среды. Это позволяет более эффективно использовать устройство, в частности поддерживая оптимальную температуру. Так как каждая сгенерированная электрическая дуга повышает температуру до значения выше целевого значения в результате выделения тепла, необходимо охлаждать воду после некоторого количества сгенерированных электрических дуг для того, чтобы поддерживать оптимальную температуру.

Устройство может быть выполнено с возможностью перемещения вдоль скважины и закрепления перед генерацией электрической дуги. Например, устройство может содержать средство перемещения, например, путем радиоуправления. Затем на устройство может быть подано напряжение из высоковольтного источника питания, расположенного на поверхности и соединенного с устройством посредством электрических кабелей, проложенных вдоль ствола скважины. Устройство может также

содержать систему сброса. Она позволяет оставлять устройство в стволе скважины, если оно оказывается заблокированным. После этого возможно восстановление скважины и/или бурильной колонны.

Устройство может иметь в целом вытянутую форму, что облегчает его перемещение 5 внутри скважины. Устройство может также содержать несколько пар электродов, расположенных на расстоянии друг от друга. На электроды может быть подано питание от различных накопительных конденсаторов. Это обеспечивает возможность более быстрого выполнения гидроразрыва. Одновременно может быть сгенерировано несколько электрических дуг между каждой парой электродов и выполнено несколько 10 гидроразрывов пласта одновременно.

Устройство, может содержать систему закачки химической добавки, содержащую резервуар для хранения добавки и насос для закачки добавки в замкнутый объем во время использования устройства. Устройство для нагревания может содержать источник 15 горячей текучей среды и подающий трубопровод, при этом указанный трубопровод имеет отверстие рядом с электродами, расположенное таким образом, чтобы во время работы устройства горячую текучую среду можно было направить от источника к электродам. Подающий трубопровод может проходить через один или оба электрода. Эти различные признаки позволяют оптимизировать условия для облегчения возникновения электрической дуги.

Ниже представлены другие потенциальные характеристики устройства гидроразрыва геологического углеводородного пласта со ссылками на фиг. 1-4, на которых показано устройство 100, представляющее собой пример описанного выше устройства для гидроразрыва геологического углеводородного пласта.

Показанное на фиг. 1 устройство 100 содержит два пакера 102 и 103, образующих 25 замкнутое пространство 104. Замкнутое пространство 104 ограничено здесь также мембраной 108. Устройство 100 также содержит два электрода 106, расположенных в замкнутом пространстве 104. Эти два электрода 106 в данном примере соединены, соответственно, с источником напряжения через вход 109 и с заземлением 103 (здесь совпадает с пакером 103) цепи, что позволяет создать электрическую дугу между двумя 30 электродами 106. Электроды могут иметь радиус от 0,1 мм до 50 мм, предпочтительно от 1 мм до 30 мм. Вход 109 может представлять собой изолированный кабель.

На фиг. 1 также схематично изображен температурный регулятор 105 для регулирования температуры текучей среды в замкнутом пространстве и регулятор 107 35 давления. Электрическая цепь для генерации электрической дуги между двумя электродами 106, ее источник напряжения и индуктор не показаны, но могут соответствовать показанным на фиг. 2-4, на которых схематично показаны примеры устройства 100.

Устройство 100, показанное на фиг. 2, содержит индукционную катушку 110. Источник напряжения содержит конденсатор 112. Как показано на схеме на фиг. 2, 40 когда конденсатор 112 разряжается, между электродами 106 может быть образована электрическая дуга. Конденсатор 112 может иметь емкость более 1 мкФ, предпочтительно более 10 мкФ. Указанная емкость обеспечивает возможность получения энергии, приводящей к появлению дозвуковой дуги.

Электрический разряд называется «дозвуковым» или «сверхзвуковым» в зависимости 45 от скорости его образования. «Дозвуковой» разряд, как правило, связан с тепловыми процессами: дуга распространяется через пузырьки газа, созданные путем нагрева воды. Распространение электрического разряда называют «медленным», если оно происходит со скоростью, как правило, порядка 10 м/с. Основные характеристики

дозвукового разряда связаны с высокими значениями используемой энергии (как правило, более нескольких сотен джоулей), с тепловыми процессами, связанными с длительным временем приложения напряжения, и с низкими уровнями напряжения (слабое электрическое поле). В этом режиме разряда волна давления распространяется в большом объеме газа до распространения в текучей среде. «Сверхзвуковой» разряд обычно ассоциируется с электронными процессами. Разряд распространяется в воде без термического процесса, имея нитевидную форму. Распространение электрического разряда называют «быстрым», если его скорость составляет порядка 10 км/с. Характеристики сверхзвукового разряда связаны с низкими значениями используемой энергии, с высокими напряжениями, связанными с коротким временем их приложения, и с сильными электрическими полями (МВ/см). Для данного режима разряда тепловыми эффектами можно пренебречь. Так как разряд не может развиваться непосредственно в жидкой фазе, для объяснения развития данного режима разряда может быть принято во внимание понятие микропузырьков. Объем используемого газа ниже, чем в случае дозвукового разряда.

Конденсатор 112 может иметь емкость менее 1000 мкФ, предпочтительно менее 200 мкФ.

Конденсатор 112 отделен от индуктора искровым промежутком 114, инициируемым импульсным генератором 116. Это обеспечивает возможность управления разрядом конденсатора 112 и, следовательно, волнами давления, создаваемыми посредством электрической дуги. В частности, импульсный генератор 116 может быть выполнен с возможностью повторения волн, как описано ниже.

Источник напряжения (то есть конденсатор 112) заряжается от зарядного устройства 120 высокого напряжения, расположенного во вспомогательной цепи 122, с напряжением U от 1 до 500 кВ, предпочтительно от 50 до 200 кВ. Вспомогательная цепь предпочтительно расположена на поверхности и, следовательно, может быть отделена от устройства.

Устройство 100, показанное на фиг. 3, отличается от примера, показанного на фиг. 2, тем, что конденсатор 112 и узел (искровой промежуток 114 + импульсный генератор 116) заменен генератором 118 Маркса. Генератор 118 Маркса во время своего разряда позволяет создать сверхзвуковую электронную дугу путем подачи более высокого напряжения, чем конденсатор 112.

В устройстве 100, показанном на фиг. 4, источник напряжения содержит конденсатор 112, показанный на фиг. 2, и генератор 118 Маркса, показанный на фиг. 3. Однако, импульсный генератор 116 инициирует первый искровой промежуток 117 генератора 118 Маркса. Устройство 100 дополнительно содержит ферриты 119, образующие насыщающийся индуктор в канале, идущем от конденсатора непосредственно к индуктору. Ферриты 119 выполнены с возможностью насыщения после разряда генератора 118 Маркса. После насыщения ферритов 119 разряжается только конденсатор 112. Это обеспечивает возможность временной изоляции конденсатора 112 и, следовательно, прохождения (то есть переключения) сверхзвуковой дуги к дозвуковой дуге. Таким образом; устройство обеспечивает связь между сверхзвуковым и дозвуковым разрядом. Указанная комбинация двух режимов, дозвукового и сверхзвукового, обеспечивает возможность лучшей электроакустической эффективности, и, следовательно, усовершенствованный гидроразрыв пласта при меньшей электрической силе. Дозвуковой разряд, создаваемый конденсатором 112, происходит после задержки, соответствующей времени пробоя генератора 118 Маркса.

Переключение может произойти за время, меньшее, чем 1 секунда. Как правило,

продолжительность разряда, полученного от генератора 118 Маркса, очень мала, и составляет менее 1 микросекунды, а амплитуда составляет более 100 кВ.

Во всех трех примерах, показанных на фиг. 2-4, и как показано на чертежах, различные компоненты устройства 100 имеют настраиваемые характеристики, то есть их характеристики могут быть изменены перед использованием в зависимости от пласта, или во время использования, в соответствии с реакцией или протеканием гидроразрыва. Например, катушка 110 может иметь настраиваемую индуктивность. Характеристики генератора 118 Маркса (емкость каждого подключенного параллельно конденсатора, количество конденсаторов в работе) могут быть настраиваемыми. Расстояние между электродами 106, предпочтительно составляющее от 0,2 до 5 см, более предпочтительно от 1 до 3 см, также может быть настраиваемым. Емкость конденсатора 112 также может быть настраиваемой. Это позволяет получить устройство 100, выполненное с возможностью осуществления гидроразрыва любого типа пласта. Фактически, нет необходимости заменять устройство 100 в случае изменения пласта, подлежащего гидроразрыву (в случае отличия в материале), так как достаточно изменить один или несколько настраиваемых параметров. Это позволяет также оптимизировать гидроразрыв пласта путем изменения применяемых в данный момент параметров, опционально дистанционным образом.

Представленные выше разъяснения далее проиллюстрированы при помощи теоретических выкладок и испытаний, описанных со ссылками на фиг. 5-17 и, в частности, относящихся к устройству 100, показанному на фиг. 1-4.

Прежде всего, описан гидроразрыв пласта, усовершенствованный благодаря наличию индукционной катушки, со ссылками на фиг. 5-10.

Как показано на фиг. 5, где изображена нормализованная амплитуда напряжения на клеммах конденсатора 112, генерация волны давления может быть разложена на две фазы: фазу S100 предварительного разряда и фазу S110 послеразрядного состояния, разделенные появлением S105 дуги.

Во время фазы S100 предварительного разряда напряжение падает. Это падение соответствует разряду эквивалентной емкости электрической батареи или генератора Маркса на эквивалентном сопротивлении устройства 100. Чем больше эквивалентное сопротивление, тем лучше поддерживается уровень энергии в фазе предпробоя. Таким образом, конфигурация электродов в каждом случае (дозвуковом или сверхзвуковом) может обеспечить минимальные возможные потери энергии. Это соответствует оптимизации нагрева воды в одном случае и электрического поля в другом.

Во время фазы S110 разряда электрическая цепь может быть смоделирована с помощью RLC-цепи в режиме колебаний.

Уравнение изменения тока в последовательной RLC-цепи представлено ниже:

$$i(t) = \frac{U_B}{L\omega} \exp\left(-\frac{Rt}{2L}\right) \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$\text{Где } \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \quad (2)$$

где U_B представляет собой напряжение во время диэлектрического пробоя воды. Параметры L , C и R представляют собой, соответственно, индуктивность, емкость и сопротивление цепи.

Данный ток $i(t)$ зависит от напряжения пробоя U_B (диэлектрический пробой среды) конденсатора, индуктора и сопротивления цепи.

Опыты позволили продемонстрировать линейность пикового давления, создаваемого в зависимости от максимального тока в момент диэлектрического пробоя воды в двух режимах пробоя. Пример результатов приведен на фиг. 6 и 7, на которых показаны результаты измерения пикового давления, полученные в зависимости от максимального тока во время фазы S110 разряда и линейная регрессия измерений, соответственно в дозвуковом и сверхзвуковом режиме. Очевидно, что при одинаковом пиковом токе давление больше для «сверхзвукового» типа разряда. Это может быть частично объяснено процессами генерации электрической дуги в воде и объемом газа между электрической дугой и жидкостью, содержащейся в межэлектродном пространстве.

Дополнительные эксперименты показали влияние межэлектродного расстояния на пиковое значение волны давления, генерируемой в двух режимах диэлектрического пробоя. Выяснилось, что длина электрической дуги имеет прямое влияние на давление. Чем больше расстояние между электродами, тем большим представляется пиковое значение давления, как показано на графике на фиг. 8.

Некоторые эксперименты также выявили влияние геометрии электродов на волну давления. Результаты представлены на фиг. 9. Они позволяют сделать вывод, что форма электродов, используемых для генерации волны давления, по-видимому, не оказывает влияния на пиковое значение давления. С другой стороны, она может минимизировать электрические потери перед появлением электрической дуги.

Для визуализации форм волны давления, генерируемой в зависимости от частотного спектра, был использован датчик давления. Этот частотный спектр может быть изменен с помощью режима диэлектрического пробоя, параметров электрической цепи, объема газа и типа используемой жидкости. Были проведены испытания с двумя примерами частотного спектра, связанного с разрядом в дозвуковом и сверхзвуковом режимах.

Оказалось, что чем больше низких частот содержит спектр, тем менее распространенным является гидроразрыв.

Результат различных проведенных экспериментов показывает линейную зависимость $dP_{\max}/dt_p$ в зависимости от фронта тока $di_{\max}/dt_i$, как показано на фиг. 10. Фронт тока оказывает влияние на фронт давления. Чем медленнее фронт тока, тем более низкую частоту имеет давление.

Выполненные исследования также четко показывают эффект накопления гидроразрыва в зависимости от количества ударов. Таким образом, понятие повторения импульсов представляет собой критерий, влияющий на гидроразрыв.

Описанные выводы представлены ниже в виде уравнений.

Расчет пикового тока $i_{\max}$.

Для расчета тока $i_{\max}$ ставятся следующие условия:

$$\text{если } \sin(\omega t) = 1 \text{ и } \omega t = \frac{\pi}{2}$$

$$\text{то } i(t) = i_{\max}, \text{ где } t = \frac{\pi}{2\omega}$$

Используя уравнения (1) и (2), получаем:

$$i_{\max} = \frac{U_b}{Lw} \exp \frac{R\pi}{4Lw} \quad (3)$$

$$T_{\text{front}} = \frac{\pi}{2\sqrt{\frac{1}{LC}\left(\frac{R}{2L}\right)^2}} \quad (4)$$

Если значение w является приблизительным (очень низкое значение R):

$$w = \frac{\pi}{2\sqrt{\frac{1}{LC}\left(\frac{R}{2L}\right)^2}} \approx \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5)$$

$$i_{\max} = U_b \sqrt{\frac{C}{L}} \exp \frac{R\pi}{4} \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (6)$$

$$T_{\text{front}} \approx \frac{\pi\sqrt{LC}}{2} \quad (7)$$

Соотношение энергии:

$$E_b = \frac{1}{2}CU_b^2, \text{ тогда } U_b = \sqrt{\frac{2E}{C}} \quad (8)$$

где E_b представляет собой энергию, а U_b представляет собой напряжение во время электрической дуги.

Подставляя уравнение (8) в (3), получаем:

$$i_{\max} = \sqrt{\frac{2E_b}{L}} \exp \frac{R\pi}{4} \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (9)$$

Пиковый ток $i_{\max}$ контролируется энергией, доступной во время появления электрической дуги, обозначенной E_b , и индуктивностью L цепи, они являются двумя параметрами, на которые должен воздействовать пользователь. Сопротивление R считается очень слабым, а емкость C зависит от энергии E_b .

Соотношение между пиковым давлением и максимальным током.

На основании результатов, приведенных на фиг. 6, 7 и 9, можно вывести следующее выражение:

$$P_{\max} = k_1 I_{\max} \quad (10)$$

где k_1 зависит от межэлектродного расстояния и режима пробоя.

Чем больше межэлектродное расстояние, тем больше коэффициент k_1

Отсюда:

$$I_{\max} = \frac{P_{\max}}{k_1} \quad (11)$$

Подставляя уравнение (11) в (9), получаем:

$$\frac{P_{\max}}{k_1} = \sqrt{\frac{2E_b}{L}} \exp^{-\frac{R\pi}{4}\sqrt{\frac{C}{L}}} \quad (12)$$

$$P_{\max} = k_1 \sqrt{\frac{2E_b}{L}} \exp^{-\frac{R\pi}{4}\sqrt{\frac{C}{L}}} \quad (13)$$

Таким образом, полученное пиковое давление контролируется током $i_{\max}$ (параметры E_b и L) и коэффициентом k_1 (зависимость от межэлектродного расстояния и режима диэлектрического пробоя воды). Следовательно, можно воздействовать на E_b , L и k_1 , для получения необходимого давления.

Соотношение между $dP_{\max}/dt_p$ в зависимости от $di_{\max}/dt_i$.

Согласно фиг. 10 можно вывести следующее выражение:

$$\frac{dP_{\max}}{dt_p} = k_2 \frac{di_{\max}}{dt_i} \quad (14)$$

где k_2 зависит от межэлектродного расстояния и режима пробоя. Коэффициент k_2 соответствует физическому электроакустическому сочетанию.

Используя уравнения (11) и (14), получаем:

$$k_1 \frac{di_{\max}}{dt_p} = k_2 \frac{di_{\max}}{dt_i} \quad (15)$$

$$dt_p = \frac{k_2}{k_1} dt_i \quad (15)$$

$$dt_p = \frac{k_2}{k_1} \frac{\pi\sqrt{LC}}{2} \quad (18)$$

Следовательно, фронт волны давления контролируется коэффициентами k_1 и k_2 , а также значениями L и C (параметры электрической цепи).

Таким образом, для подведения итогов данных исследований следует отметить следующее:

- в обоих режимах пробоя максимум волны давления, возникающей в результате диэлектрического пробоя воды, зависит, в основном, от значения максимального тока, обозначенного $i_{\max}$;

- это значение пикового тока зависит от напряжения пробоя и полного сопротивления электрической цепи. Когда конфигурация цепи задана, единственным путем оптимизации тока является повышение напряжения пробоя интервала. Это позволяет максимально увеличить электрическую энергию, передаваемую в среду;

- когда цепь не является заданной, а коммутируемая электроэнергия поддерживается на постоянном уровне, амплитуда волны давления оптимизирована за счет уменьшения полного сопротивления цепи;

- форма подачи тока, режим диэлектрического пробоя и тип текучей среды оказывают влияние на динамику волны давления. Эта динамика и акустическая эффективность устройства могут быть также изменены путем закачки искусственных пузырьков и использования способа «двойного импульса» (дозвукового и сверхзвукового);

- при подаче тока постоянной величины значение пикового давления выше при

сверхзвуковом режиме, чем при дозвуковом режиме;

- при подаче тока постоянной величины значение пикового давления тем выше, чем больше межэлектродное расстояние.

Геометрия электродов при подаче тока постоянной величины не оказывает никакого влияния на генерируемое пиковое давление, но может играть роль в снижении потерь электроэнергии во время фазы предварительного разряда.

В заключение следует отметить, что вышеуказанные исследования подтверждают полезность установки индуктора между источником напряжения и одним из двух электродов с целью воздействия на волну давления, генерируемую в итоге. Исследования также подтверждают преимущество наличия настраиваемых параметров, например, индуктивности, емкости конденсатора, характеристик генератора Маркса. Поскольку волна давления зависит от этих параметров, возможность их настройки позволяет управлять волной давления.

Ниже описано усовершенствование гидроразрыва пласта путем регулирования температуры со ссылками на фиг. 11-17, на которых проиллюстрированы испытания, демонстрирующие данное усовершенствование.

Была разработана и построена замкнутая область для того, чтобы воссоздать в лаборатории термодинамические условия жидкости в условиях, присутствующих в стволе скважины.

Конфигурация электродов представляет собой два точечных электрода (радиус кривизны 2,5 мм) с межэлектродным расстоянием в 3 мм. Для того, чтобы увеличить значение эквивалентного сопротивления замкнутой области и, таким образом, ограничить энергию пробоя, была использована деминерализованная вода ($\sigma=40$ мкСм/см). Вода заменялась после каждой серии. Используемым для прохождения высокого напряжения изоляционным материалом был РЕЕК 450G.

С целью ограничения подаваемой в замкнутую область энергии испытания проводились с конденсаторной батареей с эквивалентной емкостью, $C=600$ нФ. Напряжение заряда этих конденсаторов не могло превышать 40 кВ. Таким образом, максимальная мощность составляла приблизительно 500 Дж, что гарантировало, с учетом геометрии используемых электродов, распространение разряда в дозвуковом режиме.

Диэлектрическая прочность воды характеризуется определением напряжения предварительного разряда U_{50} , значением напряжения, которое дает 50% сопротивлений и 50% разрядов. Используемый способ, позволяющий определить это напряжение U_{50} , называется способ «вверх и вниз». Уровни напряжения задают заранее и выполняют ряд испытаний на этих различных уровнях, при этом результат каждого испытания определяет следующий уровень: непосредственно следующий более высокий уровень в случае сопротивления, и непосредственно предшествующий более низкий уровень в случае разряда. Достаточно выполнить около пятидесяти испытаний для того, чтобы получить значение U_{50} . На всех приведенных кривых величина, обозначенная как U_{50} , представляет собой среднюю величину из серии в 50 ударов.

С учетом сложной геометрии элемента было использовано программное обеспечение COMSOL для того, чтобы оценить величину межэлектродной емкости для каждой экспериментальной конфигурации.

В результате получена емкость в 125 пФ для $D=1,5$ мм и в 120 пФ для $D=3$ мм. Значения эквивалентной емкости элемента НР (высокое давление) имеют порядок ста пикофард. В данном случае накопительная емкость имела высокое значение, равное

600 Ф (дозвуковой разряд): емкостный перенос был, таким образом, оптимальным.

Эквивалентное сопротивление воды было определено с использованием экспериментального способа и путем моделирования с использованием программного обеспечения COMSOL.

Во время разряда конденсатора в воде имеется фаза, называемая фазой предварительного разряда, в течение которой напряжение падает. Это падение соответствует разряду емкости на эквивалентное сопротивление межэлектродного промежутка устройства. Это эквивалентное сопротивление называется R_{water} ($R_{\text{воды}}$).

В случае дозвукового разряда R_{water} определяется измерением экспоненциального затухания волны напряжения, как показано на фиг. 11. Значение константы разряда соответствует времени, необходимому для падения на 37% начального значения напряжения конденсатора.

Для проводника, при заданной температуре, существует формула, позволяющая вычислить его сопротивление в зависимости от его размеров и материала (в данном случае воды), из которого он состоит:

$$R = \rho \frac{L}{s}, \text{ где } \rho = \frac{1}{\sigma}$$

где ρ - Удельное сопротивление воды (Ом*м);

σ - Удельная проводимость воды (См/м).

Так как удельная проводимость воды зависит от температуры воды, можно определить ее изменение в зависимости от типа воды, используемой в наших экспериментах, с использованием следующей формулы:

$$\sigma = \sigma_0(1 + \alpha(T - T_0))$$

где: σ_0 - Начальная проводимость (См/м);

α - Температурный коэффициент;

T_0 - Исходная температура (°K).

Необходимо отметить, что изменение удельной проводимости воды в зависимости от температуры не одинаково при различных типах используемой воды (например, чистая вода, деминерализованная вода, вода из крана или морская вода). Начальная удельная проводимость определяет влияние температуры на последующие изменения проводимости. В данном случае была использована деминерализованная вода, и начальные параметры были определены экспериментальным путем.

При использовании модуля электротермического соединения COMSOL сопротивление можно было определить на основании закона Ома.

Для этого предварительно был установлен электрический потенциал электрода НТ, также как и удельная проводимость воды (как определено в уравнении выше). COMSOL позволяет рассчитать значение тока путем интеграции суммарной плотности тока на поверхности воды, содержащейся в замкнутой области, и, таким образом, определить значение эквивалентного сопротивления R_{water} .

Изменение R_{water} в диапазоне абсолютного статического давления от 0 до 15 бар составляет: 1750 Ом для 0 бар, 1683 Ом для 5 бар, 1706 Ом для 10 бар и 1833 Ом для 15 бар. Анализ этих результатов позволяет сделать вывод о том, что статическое давление, очевидно, не влияет на сопротивление R_{water} .

Экспериментальные и смоделированные результаты, представляющие влияние температуры воды на сопротивление R_{water} , показаны на фиг. 12. Полученные кривые

показывают большое влияние температуры на эквивалентное сопротивление замкнутой области. От 25°C до 95°C значение сопротивления поделено на коэффициент 3.

Задачей данной части испытаний методом моделирования было охарактеризовать замкнутую область НР в зависимости от выдерживаемого напряжения и эквивалентного полного сопротивления (емкость и сопротивление).

Получение этих фундаментальных параметров позволяет предусмотреть форму волны, которая может быть получена на данной нагрузке (в данном случае элемент НР) для приложенного напряжения (и, следовательно, энергии), геометрии электродов и для четко определенных термодинамических условий воды. Эти параметры представляют большой интерес для исследования, поскольку емкость и эквивалентное сопротивление определяют перенос энергии из накопительной емкости на элемент.

Затем была дана характеристика диэлектрической прочности воды в зависимости от ее термодинамических параметров, и изучено влияние этих параметров на динамику волны давления. Один экспериментальный протокол представляет собой изучение изменения напряжения U_{50} в зависимости от температуры воды при атмосферном давлении. Эти результаты представлены на фиг. 13.

Установлено, что тепловые процессы играют ключевую роль в фазе предварительного разряда при дозвуковом режиме, так как электрическая дуга развивается в газовых пузырьках, созданных в результате испарения воды. Поэтому наблюдается снижение пробивного напряжения при увеличении температуры. Однако, данная тенденция гораздо более выражена, когда температура превышает примерно 60°C. При $T < 60^\circ\text{C}$ повышение температуры на 100% приводит к уменьшению менее, чем на 10% величины U_{50} , в то время, как при $T > 60^\circ\text{C}$, такое же изменение температуры приводит к снижению U_{50} примерно на 60%. Как правило, для электрических разрядов такое изменение наклона крутизны связано с изменением режима разряда. Здесь проблема более сложна, так как задействованы термодинамические явления, связанные с переходом из жидкой фазы в состояние водяного пара.

Поскольку энергия испарения воды уменьшается при увеличении T , возникает вопрос, снижаются ли с точки зрения энергии электрические потери за счет данного увеличения температуры (напомним, что акустическая энергия волны давления напрямую зависит от электротермических потерь во время фазы предварительного пробоя).

Чтобы ответить на этот вопрос, потребляемая энергия E_C в фазе предварительного пробоя может быть определена как:

$$E_C = \int_0^{T_b} p(t) \cdot dt = \int_0^{T_b} \frac{u^2(t)}{R_{\text{water}}} \cdot dt$$

где $p(t)$ - электрическая мощность,

$u(t)$ - приложенное напряжение,

R_{water} - эквивалентное сопротивление воды,

T_b - момент пробоя.

Однако

$$u(t) = U_{50} \cdot \exp\left(\frac{-t}{R_{\text{water}} \cdot C}\right)$$

Следовательно,

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_{50}^2 \cdot \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{T_b}{2 R_{water} C} \right) \right\} \quad (1)$$

Изначально накопленная общая электрическая энергия E_T выражается через
5 следующее уравнение:

$$E_T = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_{50}^2 \quad (2)$$

Таким образом, электротермические потери, связанные с нагревом, могут быть
10 определены следующим уравнением:

$$Потери = \frac{E_c}{E_T} = \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{T_b}{2 R_{water} C} \right) \right\} \quad (3)$$

Эффективность фазы предварительного разряда выражается через следующее
15 уравнение:

$$\eta = (1 - Потери) \times 100 \quad (4)$$

Таким образом, выражения (1), (2), (3) и (4) зависят от трех параметров U_{50} , T_b и
 R_{water} . Эквивалентное сопротивление R_{water} испытательной замкнутой области
20 определяется экспериментальным путем, исходя из экспоненциального падения
приложенного напряжения, показанного на фиг. 12. Результаты могут быть обобщены
в следующей таблице.

Температура (°C)	25,5	37	52,5	62	74	92
R_{water}	1750	1200	942	867	717	583

На фиг. 14 изображено изменение напряжения U_b пробоя и соответствующего времени
 T_b в зависимости от температуры воды и стандартных отклонений. Известно, что при
30 повышении температуры значение R_{water} уменьшается, что приводит к уменьшению
времени приложения волны напряжения. Поэтому наблюдается уменьшение параметра
 T_b с увеличением температуры.

Интерпретация изменения параметра U_b является более сложной. Здесь необходимо
принимать во внимание небольшую вариацию U_{50} в диапазоне 25°C - 60°C в сочетании
35 со значительным снижением продолжительности приложения волны напряжения.
Следовательно, напряжение U_b увеличивает этот диапазон температур. Выше этого
температурного диапазона напряжение пробоя значительно уменьшается при увеличении
температуры от 60°C до 90°C. Поскольку далее время приложения напряжения
40 уменьшается, напряжение U_b пробоя может только снижаться.

Все параметры, определенные в уравнении (1), теперь определены экспериментально.
Следовательно, можно построить кривую изменений потребляемой энергии E_c во время
фазы предварительного разряда, в зависимости от температуры, как показано на фиг.
15.

Энергия, потребляемая для создания электрической дуги, уменьшается вместе с
45 температурой. Для интерпретации этого результата можно предположить, что основная
часть этой энергии используется для создания газовой фазы (предположение в
значительной степени подтверждается тем фактом, что нескольких десятков

миллиджоулей достаточно для создания электрической дуги в воздухе при атмосферном давлении при миллиметровых расстояниях). Энергия, необходимая (при постоянном атмосферном давлении) для испарения массы воды, первоначально имеющей температуру T_i , задается выражением:

$$E = m \cdot c_p \cdot (T_f - T_i) + H \quad (5)$$

где H - энтальпия испарения на единицу массы,

c_p - изобарическая теплоемкость на единицу массы при температуре T_i .

Энтальпия испарения на единицу массы является постоянной при давлении в 1 бар, при этом изменения c_p в зависимости от температуры приведены в таблице воды. Таким образом, изменения E , заданные выражением (5), показывают, что чем больше возрастает температура, тем меньше энергии необходимо для испарения единицы массы воды, как показано на фиг. 16.

Таким образом, снижение энергии, потребляемой в фазе предварительного разряда при повышении температуры, можно, в упрощенном виде, интерпретировать с точки зрения энергии испарения. Вполне вероятно, что это объяснение не является достаточным, и что в энергетическом балансе участвуют другие параметры. В частности, для завершения энергетического баланса изменение количества пузырьков в зависимости от температуры является важным параметром (кривая, представленная на фиг. 16, получена при постоянной массе, то есть при постоянном объеме для всех температур).

Следует также отметить, что кривая, показанная на фиг. 16, изображена при помощи напряжения пробоя U_{50} , получаемого при каждой температуре. Это минимальная энергия, необходимая для инициирования процесса возникновения электрической дуги. Это означает, что, если изначально накопленная энергия E_T фиксируется путем зарядки батареи конденсаторов при постоянном напряжении, то избыточная энергия ($E_T - E_C$), доступная для послеразрядной фазы, увеличивается с температурой.

Рассмотрим теперь энергетическую эффективность фазы предварительного разряда в зависимости от температуры, как показано на фиг. 17.

Экспериментальные результаты показывают, что эффективность предварительного разряда имеет оптимальное значение при температуре от 45 до 67°C или, более конкретно, выше 50°C и/или ниже 62°C. Данное оптимальное значение эффективности, является, в основном, результатом изменения наклона кривой $U_{50}=f(T)$ при $T > 60^\circ\text{C}$, в то время как потребляемая энергия остается почти постоянной.

При $T \approx 60^\circ\text{C}$ для послеразрядной фазы доступно примерно 80% энергии, часть которой будет преобразована в акустическую энергию. Только 30% от начальной энергии доступно для послеразрядной фазы, если температура воды установлена на $T = 25^\circ\text{C}$. Этот результат представляет собой большой интерес для целей оптимизации электроакустической эффективности способа электрического гидроразрыва пласта.

Таким образом, приведенное выше исследование, проиллюстрированное на фиг. 11-17, показывает преимущество регулирования температуры текучей среды в замкнутом пространстве для повышения энергетической эффективности и генерации волны давления, при том условии, что размеры устройства фиксированы, что обеспечивает усовершенствованный гидроразрыв.

Как указано выше, устройство для гидроразрыва пласта может быть использовано при применении способа гидроразрыва геологического углеводородного пласта. Способ содержит электрический гидроразрыв пласта путем генерации электрической дуги посредством устройства, что создает волну давления, вызывающую гидроразрыв. В

то же время, способ может содержать регулирование температуры текучей среды в замкнутом пространстве устройства посредством температурного регулятора. Таким образом, устройство может быть также использовано для осуществления способа добычи углеводородов, содержащего гидроразрыв геологического углеводородного пласта с использованием предыдущего способа.

Как показано на фиг. 18, также предложен способ гидроразрыва геологического углеводородного пласта. Способ, показанный на фиг. 18, содержит статический гидроразрыв (S20) пласта посредством гидравлического давления. Способ, показанный на фиг. 18, также содержит до, во время или после статического гидроразрыва (S20) (эти три варианта показаны пунктирными линиями на фиг. 18) электрический гидроразрыв (S10) пласта путем генерации электрической дуги в стволе скважины, пробуренной в пласте, как это описано выше. Способ по фиг. 18 улучшает гидроразрыв пласта.

Статический гидроразрыв (S20) может представлять собой статический гидроразрыв любого типа, известного из уровня техники. Как правило, статический гидроразрыв (S20) может содержать, после опционального бурения скважины в пласте, закачку в скважину текучей среды под высоким давлением. Таким образом, статический гидроразрыв (S20) создает одну или несколько однонаправленных трещин, как правило, более глубоких, чем те, которые созданы путем электрического гидроразрыва (S10) пласта.

Текучая среда может представлять собой воду, буровой раствор или техническую текучую среду с контролируемой вязкостью, в которой добавлены твердые вещества (просеянный песок или керамические микрошарики), которые предотвращают закрывание линий разрыва во время падения давления.

Статический гидроразрыв (S20) может содержать первую фазу закачки в буровую скважину текучей среды гидроразрыва, содержащей загустители, и вторую фазу, которая включает в себя периодическую закачку проппанта (то есть расклинивающего агента) в текучую среду гидроразрыва для заполнения созданного разрыва проппантом. Таким образом формируются скопления проппанта в разрыве, которые предотвращают его закрытие и обеспечивают наличие каналов для потока углеводородов между этими скоплениями. Вторая фаза или ее подфазы включают в себя дополнительное введение в текучую среду гидроразрыва армирующего и/или отверждающего материала, тем самым увеличивая прочность скоплений проппанта. Указанный статический гидроразрыв (S20) позволяет получить разрывы, как правило, от 100 до 5000 метров.

Статический гидроразрыв (S20) может предшествовать электрическому гидроразрыву (S10). В таком случае волна давления, создаваемая посредством электрического гидроразрыва (S10) пласта может следовать за ходом текучей среды, закачиваемой в трещины, созданные посредством статического гидроразрыва (S20), и, таким образом, улучшать гидроразрыв. Также, такой порядок выполнения гидроразрывов (S20) и (S10) обеспечивает малую вероятность утечек. Например, статический гидроразрыв (S20) может быть выполнен до электрического гидроразрыва (S10) менее, чем за неделю.

Как показано на фиг. 19, также предложен способ гидроразрыва геологического углеводородного пласта, предварительно подвергнутого статическому гидроразрыву посредством гидравлического давления. Способ, показанный на фиг. 19, содержит только электрический гидроразрыв (S10) пласта и выполняется в пласте, в котором уже была пробурена скважина и который был подвергнут статическому гидроразрыву. Способ, показанный на фиг. 19, обеспечивает возможность выполнения гидроразрыва пластов, которые уже были использованы после статического гидроразрыва. Другими

словами, способ, показанный на фиг. 19, позволяет использовать пласт, который уже был покинут, потенциально путем повторного использования ранее пробуренной скважины. Следует отметить, что, в сочетании с таким предварительным статическим гидроразрывом способ, показанный на фиг. 19, соответствует способу, показанному на фиг. 18 (где статический гидроразрыв (S20) соответствует этому предварительному статическому гидроразрыву). Таким образом, предварительный статический гидроразрыв может быть выполнен с применением способа, показанного на фиг. 18.

Как показано на фиг. 20, предложен способ гидроразрыва геологического углеводородного пласта, содержащий специфический электрический гидроразрыв пласта (S10). Очевидно, что электрический гидроразрыв (S10), предложенный в способе, показанном на фиг. 20, может быть использован в способе, показанном на фиг. 18, и/или в способе, показанном на фиг. 19. Способ, показанный на фиг. 20, содержит, главным образом, электрический гидроразрыв (S10) путем генерации электрической дуги в текучей среде, содержащейся в скважине, пробуренной в пласте (то есть, в сочетании или нет со статическим гидроразрывом, например, статическим гидроразрывом (S20) способа, показанного на фиг. 1). Электрическая дуга вызывает волну давления, время нарастания которой составляет более 0Д мкс, предпочтительно более 10 мкс. Способ, показанный на фиг. 20, улучшает гидроразрыв пласта.

Время нарастания ударной волны представляет собой время, необходимое для того, чтобы волна давления достигла пикового давления, то есть максимального значения волны (также называемого «пиковое давление»). В данном случае, время нарастания составляющее более 0,1 мкс, предпочтительно более 10 мкс, соответствует волне давления, которая лучше проникает в пласт. Такая волна давления является особенно эффективной (то есть такая волна проникает глубже) в случае наличия материалов с меньшей пластичностью, как те, которые составляют пласт сланцевого газа. Предпочтительно, время нарастания составляет менее 1 мс, предпочтительно менее 500 мкс.

Ударная волна может иметь максимальное давление до 10 кбар, предпочтительно более 100 бар и/или менее 1000 бар. Это может соответствовать накопленной энергии от 10 Дж до 2 МДж, предпочтительно от 10 кДж до 500 кДж.

Ниже описаны различные варианты, применимые к любому из способов, показанных на фиг. 18, фиг. 19 или фиг. 20.

Скважина может быть горизонтальной. Например, скважина может быть горизонтальной и иметь длину предпочтительно от 500 до 5000 м, более предпочтительно от 800 до 1200 м, например, на глубине от 1000 до 10000 м, например, от 3000 до 5000 м.

Электрический гидроразрыв (S10) может быть повторен в различных зонах обработки вдоль скважины. При электрическом гидроразрыве (S10) ударная волна обычно проникает менее глубоко, чем при статическом гидроразрыве. Таким образом, при электрическом гидроразрыве (S10) обычно получают трещины длиной менее 100 м, как правило, менее 50 м и более 20 м. Для скважины, имеющей несколько сотен метров в длину, повторение электрического гидроразрыва (S10) вдоль скважины обеспечивает возможность осуществления гидроразрыва вдоль всей длины скважины и, таким образом, возможное улучшение эксплуатации пласта.

Также, в каждой зоне обработки (или в одной зоне обработки/если она является единственной) может быть получено подряд несколько дуг. Здесь генерация электрической дуги повторяется в приблизительно фиксированном положении. Повторение ударной волны улучшает гидроразрыв пласта. Генерируемые дуги могут

быть одинаковыми или различными. Например, в каждой зоне обработки полученные дуги вызывают волну давления, время нарастания которой сокращается. Например, последующие дуги могут иметь все более и более крутой фронт, вызывая, таким образом, волну давления, имеющую все более и более короткое время нарастания. В этом случае, первые импульсы имеют более медленные фронты для более глубокого проникновения, тогда как импульсы с более крутым фронтом обеспечивают более частые гидроразрывы ближе к месту генерации импульсов. Таким образом оптимизируется гидроразрыв.

Первые дуги могут, например, вызывать волну давления, время нарастания которой больше 10 мкс, предпочтительно больше 100 мкс. Последние дуги могут вызвать волну давления, время нарастания которой меньше времени нарастания первых дуг, например, менее 10 мкс или 100 мкс. Первые дуги содержат по меньшей мере одну дугу, предпочтительно их число меньше 10000 или даже 1000, а последние дуги содержат по меньшей мере одну дугу, предпочтительно их количество меньше 10000 или даже 1000.

Дополнительно, в каждой зоне обработки дуги могут быть получены при частоте менее 100 Гц, предпочтительно менее 10 Гц, и/или более 0,001 Гц, предпочтительно более 0,01 Гц. Предпочтительно, частота дуг может быть (по существу) равна резонансной частоте материала, подлежащего гидроразрыву в пласте. Это обеспечивает более эффективный гидроразрыв.

Пласт может иметь проницаемость менее 10 микродарси. Это может быть, в частности, пласт сланцевого газа. В таком типе пластов, газ, как правило, адсорбируется (до 85% в сланцевой породе Льюиса) и слабо улавливается в пустотах. Низкая проницаемость этого типа пластов не позволяет рассчитывать на прямую добычу газа, находящегося непосредственно в данной среде, возможна лишь добыча поверхностного газа (адсорбированный газ). Таким образом, для пласта сланцевого газа с проницаемостью порядка одного микродарси эффективный электрический гидроразрыв (S10) пласта в радиусе 30 м вдоль горизонтальной скважины длиной 1000 м позволил бы осуществить добычу газа, превышающую 50 МНм³ (если предположить добычу 26 Нм³ газа с 1 м³ породы, как изложено в упомянутой выше статье «Porosity and permeability of Eastern Devonian Shale gas»). Способ гидроразрыва, показанный на любой из фиг. 1-3, может, таким образом, быть включен в способ добычи углеводородов из пласта, как правило, пласта сланцевого газа.

Генерация электрической дуги может вызвать температурный градиент, создающий волну давления в текучей среде. Электрический гидроразрыв (S10) может содержать предварительную закачку в текучую среду агента, улучшающего пластичность материала пласта. Агент может содержать химическую добавку. Химической добавкой может быть агент, вызывающий разрыв пласта. Добавка может содержать пар. Это дополнительно улучшает гидроразрыв.

Пример электрического гидроразрыва (S10) способа гидроразрыва, показанного на любой из фиг. 18-20, описан ниже со ссылками на фиг. 21-23. В этом примере выполняют электрический гидроразрыв (S10) в пласте 40, в котором была пробурена горизонтальная скважина 43. Электрический гидроразрыв (S10) здесь сочетается со статическим гидроразрывом пласта, не проиллюстрированным отдельно и опционально выполненным ранее, что вызвало основные разрывы 41 в пласте. Данный способ гидроразрыва обеспечивает возможность добычи углеводородов посредством эксплуатационного трубопровода, расположенного на поверхности, в устье скважины 45. Электрическую дугу здесь генерируют в устройстве 47 гидроразрыва, которое может соответствовать устройству 100 для гидроразрыва, показанному на фиг. 1.

В примере, показанном на фиг. 21-23, электрический гидроразрыв (S10) вызывает

вторичные разрывы 42 в точке, где генерируют дугу. В примере вторичные трещины 42 являются более короткими, но распространяются более широко, чем основные разрывы 41. В данном примере электрический гидроразрыв (S10) повторяют в различных зонах обработки вдоль протяженности скважины. На фиг. 21 проиллюстрирована начальная фаза электрического гидроразрыва (S10) у конечного забоя скважины. На 5 фиг. 22 показана промежуточная фаза в середине скважины. На фиг. 23 показана заключительная фаза в верхней части скважины. Можно видеть развитие вторичных разрывов 42 при повторении электрического гидроразрыва. Таким образом, вторичные разрывы 42 рассредоточены вокруг всей скважины 43. После этого возможно 10 осуществление добычи углеводородов, расположенных вблизи данных вторичных разрывов 42, то есть углеводородов, которые потенциально удалены от основных разрывов 41 и, следовательно, с трудом подлежат добыче посредством одного статического гидроразрыва.

Подвижность устройства 47 гидроразрыва, которое может представлять собой 15 специальное устройство, позволяет осуществлять разрыв пласта вдоль всей длины скважины. В данном примере питание устройства 47 осуществляют посредством источника 44 высокого напряжения, расположенного на поверхности и соединенного с устройством 47 посредством кабелей 46.

Очевидно, что настоящее изобретение не ограничено описанными и 20 проиллюстрированными примерами, но может иметь многочисленные варианты, доступные специалисту в области техники. Например, приведенные выше принципы могут быть применены для получения сейсмических данных. Генерация электрической дуги может в альтернативном варианте вызвать волну давления, имеющую характеристики ниже тех, которые необходимы для гидроразрыва пласта. Это может 25 быть осуществлено, например, путем изменения напряжения заряда устройства гидроразрыва и напряжения заряда, а также путем регулировки индуктивности. Такой способ получения сейсмических данных может содержать прием отраженной ударной волны, при этом отраженная волна обычно является модулированной в результате ее прохождения через материал, образующий пласт. Способ получения сейсмических 30 данных может также содержать анализ отраженной волны для определения характеристик пласта. После этого на основании полученных данных может быть составлен сейсмический отчет.

(57) Формула изобретения

35 1. Устройство (100) для гидроразрыва геологического углеводородного пласта, причем устройство содержит:

- два пакера (102, 103), образующих между собой замкнутое пространство (104) в скважине, пробуренной в пласте;

- регулятор для регулирования температуры текучей среды в указанном замкнутом 40 пространстве;

- пару из двух электродов (106), расположенных в указанном замкнутом пространстве; и

- электрическую цепь для генерации электрической дуги между указанными двумя электродами, при этом указанная цепь содержит по меньшей мере один источник (112, 45 118) напряжения, соединенный с электродами (106), и индукционную катушку (110) между источником (112, 118) напряжения и одним из двух электродов.

2. Устройство по п. 1, причем температурный регулятор выполнен с возможностью регулирования температуры текучей среды для оптимизации энергетической

эффективности фазы предварительного разряда во время генерации электрической дуги.

3. Устройство по п. 2, причем температурный регулятор выполнен с возможностью поддержания температуры текучей среды в диапазоне значений от 45 до 67°C, предпочтительно выше 50°C и/или ниже 62°C.

4. Устройство по п. 3, причем устройство дополнительно содержит регулятор для регулирования давления текучей среды таким образом, чтобы поддерживать его, по существу, на уровне атмосферного давления.

5. Устройство по любому из пп. 1-4, причем температурный регулятор содержит систему охлаждения текучей среды.

6. Устройство по любому из пп. 1-4, причем индукционная катушка (110) имеет настраиваемую индуктивность, предпочтительно от 1 мкГн до 100 мГн, более предпочтительно от 10 мкГн до 1 мГн.

7. Устройство по любому из пп. 1-4, причем расстояние между двумя электродами (106) является настраиваемым, предпочтительно в диапазоне от 0,2 до 5 см, более предпочтительно от 1 до 3 см.

8. Устройство по п. 1, причем источник напряжения содержит конденсатор (112), имеющий емкость более 1 мкФ, предпочтительно более 10 мкФ.

9. Устройство по п. 8, причем емкость конденсатора является настраиваемой, предпочтительно в диапазоне менее 1000 мкФ, более предпочтительно менее 200 мкФ.

10. Устройство по п. 8 или 9, причем цепь дополнительно содержит генератор (118) Маркса и ферриты (119), образующие насыщающийся индуктор в канале, идущем от конденсатора непосредственно к индуктору, причем ферриты насыщаются, когда генератор Маркса разряжен.

11. Устройство по п. 8 или 9, причем конденсатор отделен от индуктора искровым промежутком (114), инициируемым импульсным генератором (116).

12. Устройство по любому из пп. 1-4, 8 или 9, причем электроды (106) имеют радиус от 0,1 до 50 мм, предпочтительно от 1 до 30 мм.

13. Устройство по любому из пп. 1-4, 8 или 9, причем устройство содержит систему сброса.

14. Устройство по любому из пп. 1-4, 8 или 9, причем устройство содержит несколько пар электродов.

15. Способ гидроразрыва геологического углеводородного пласта, причем способ содержит электрический гидроразрыв (S10) пласта путем генерации электрической дуги устройством по любому из пп. 1-14 и, одновременно, регулирование температуры текучей среды в замкнутом пространстве устройства.

16. Способ добычи углеводородов, содержащий гидроразрыв геологического углеводородного пласта с использованием способа по п. 15.

17. Способ калибровки температурного регулятора устройства по любому из пп. 1-14, содержащий следующие этапы:

- обеспечение наличия устройства;
- определение предпробойного напряжения, после превышения которого генерируется электрическая дуга; затем
- измерение напряжения пробоя на клеммах электродов и времени пробоя в зависимости от температуры текучей среды, путем приложения предпробойного напряжения и изменения температуры текучей среды;
- выведение на основе предыдущего этапа энергетической эффективности фазы предварительного разряда в зависимости от температуры; затем

- определение целевой температуры или температурного диапазона для температурного регулятора в зависимости от максимальной энергетической эффективности, выведенной на предыдущем этапе.

5

10

15

20

25

30

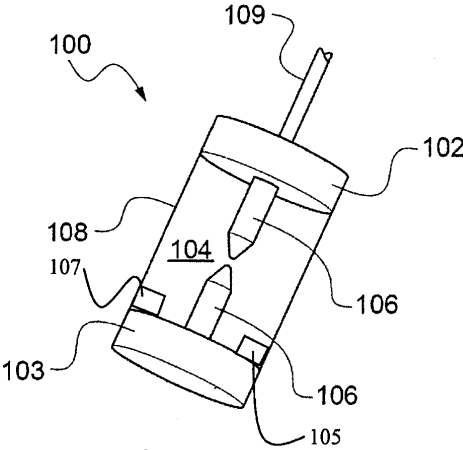
35

40

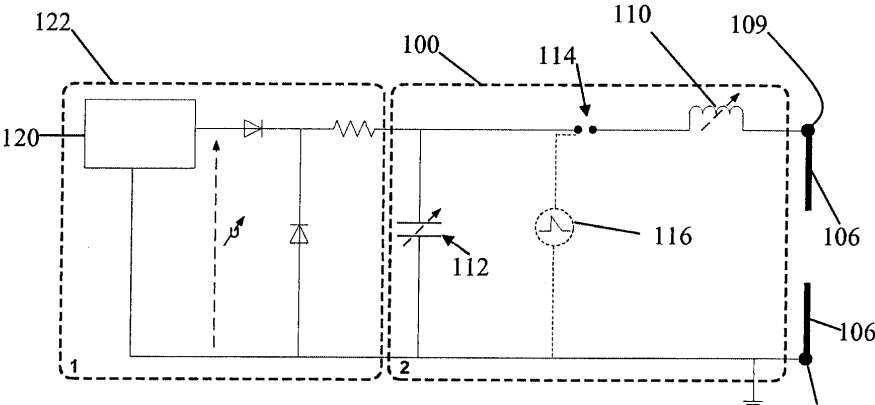
45

1

1/10



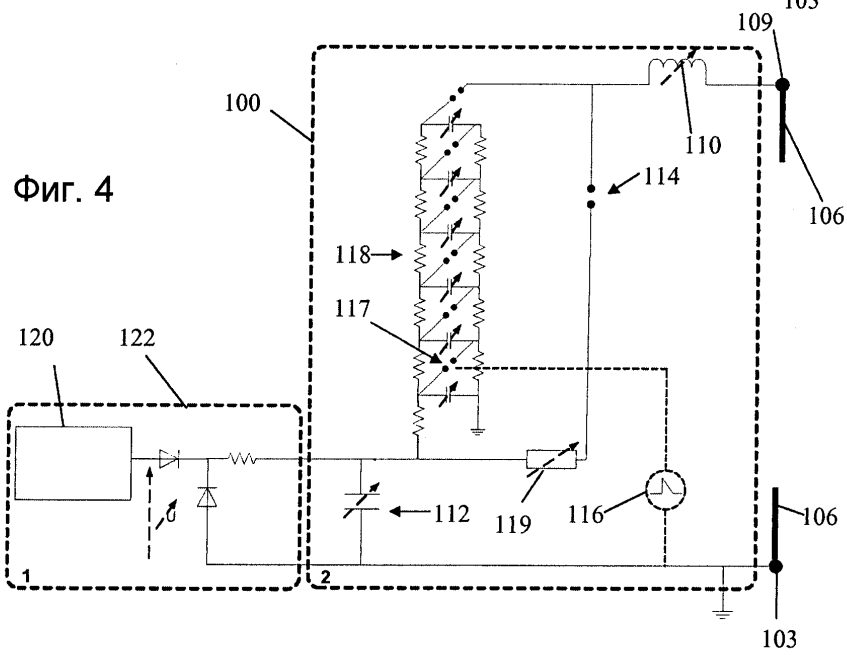
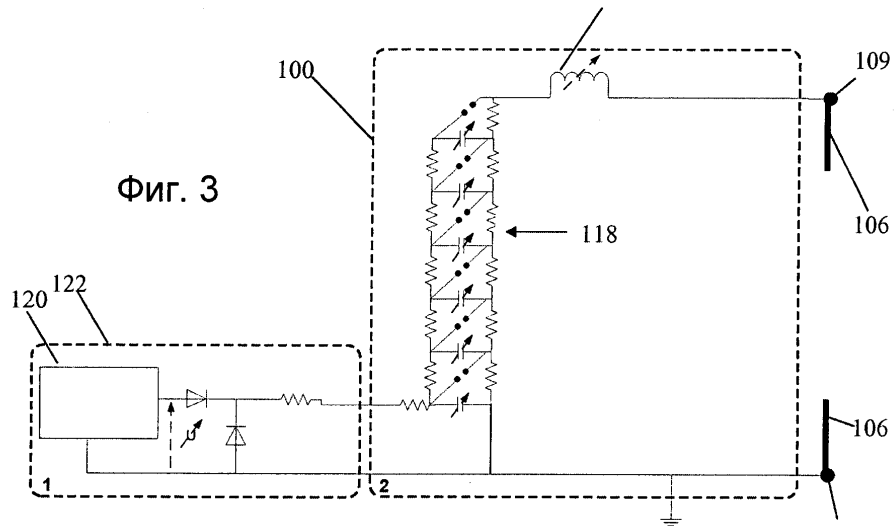
Фиг. 1

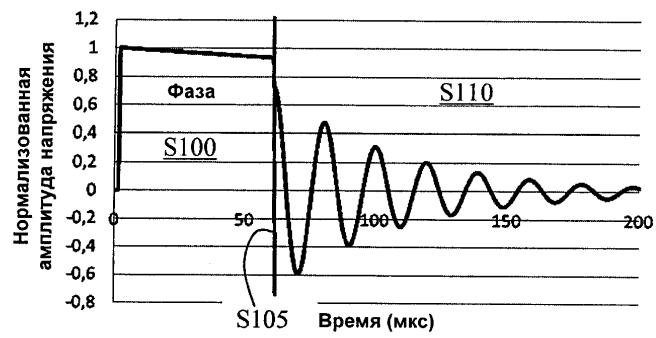


Фиг. 2

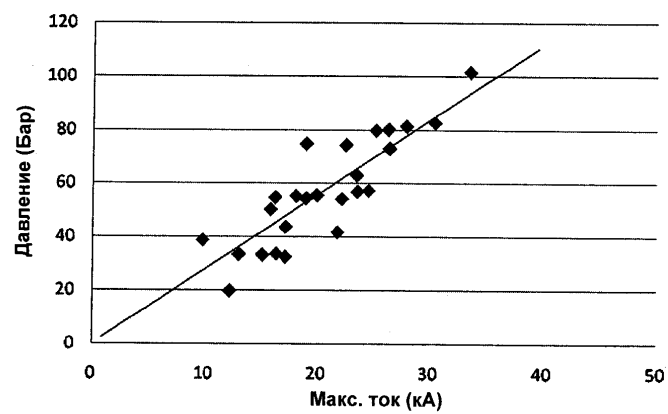
2

2/10



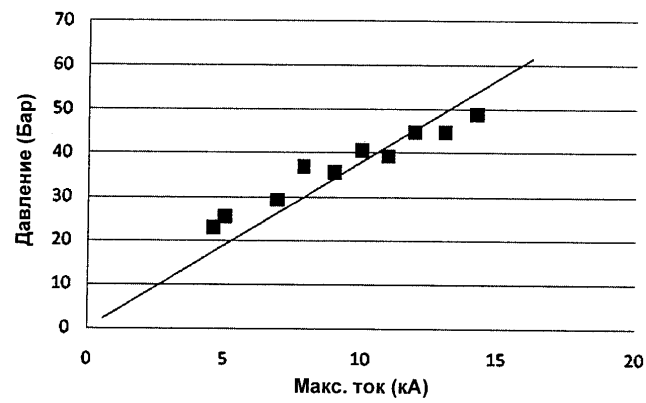


Фиг. 5

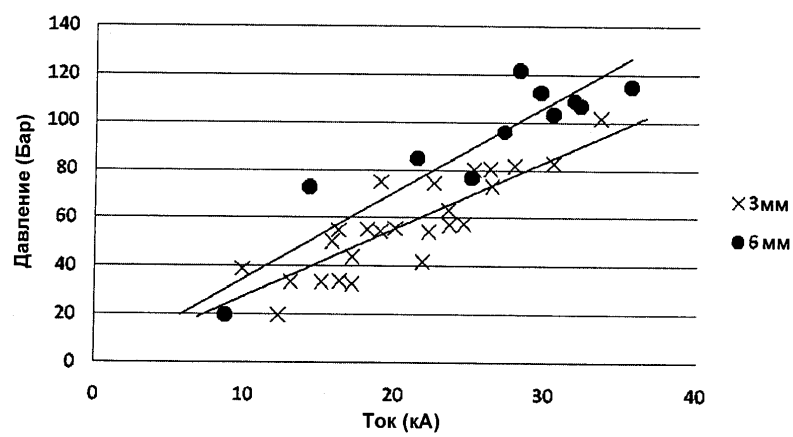


Фиг. 6

4/10

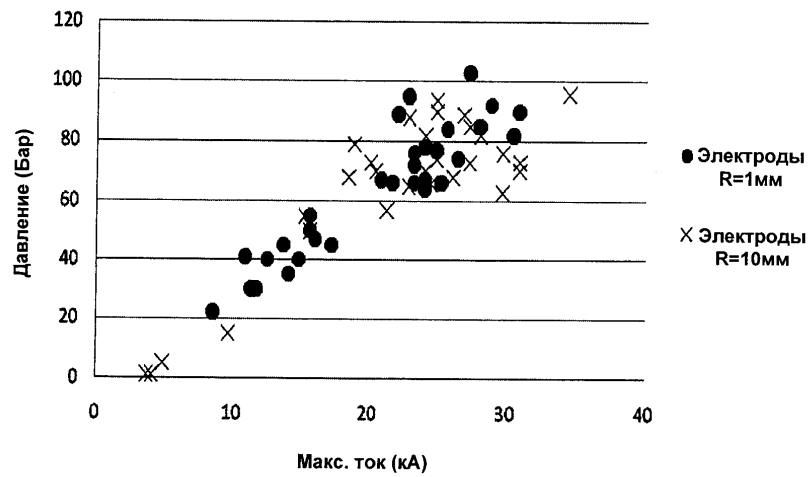


Фиг. 7

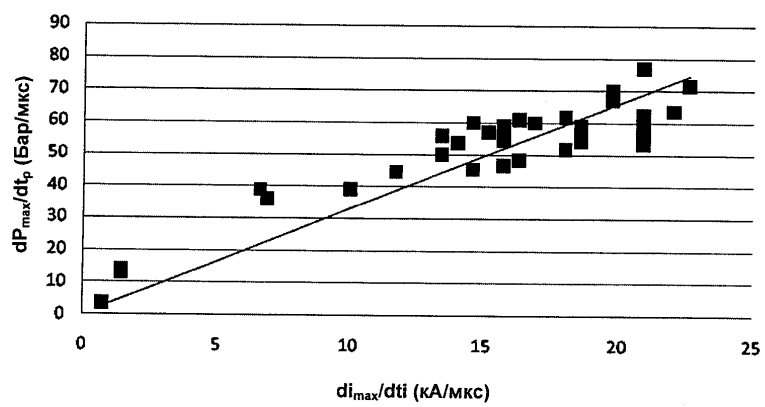


Фиг. 8

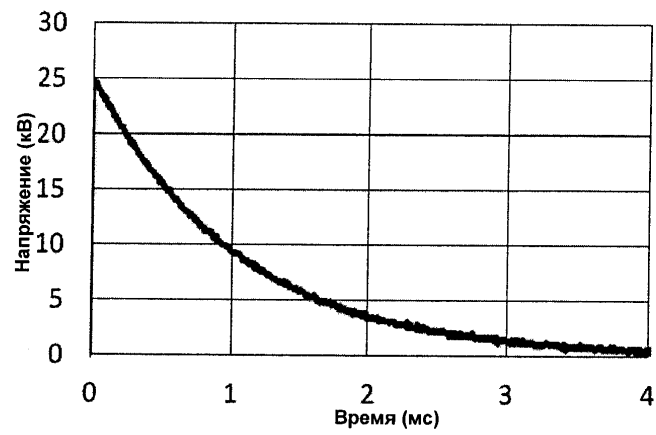
5/10



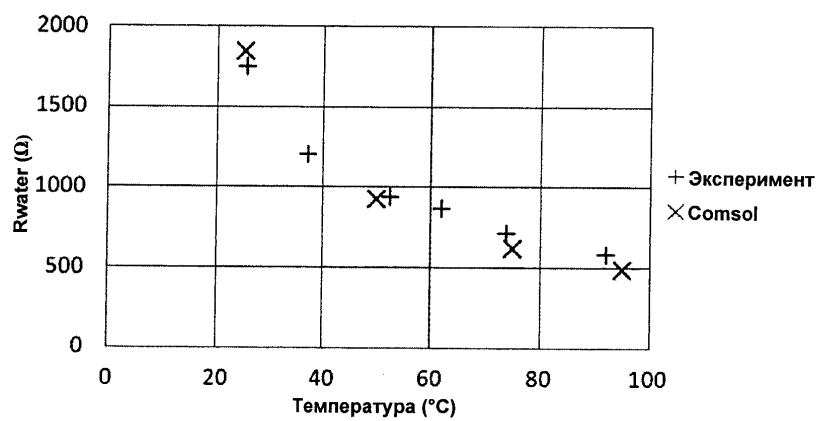
Фиг. 9



Фиг. 10

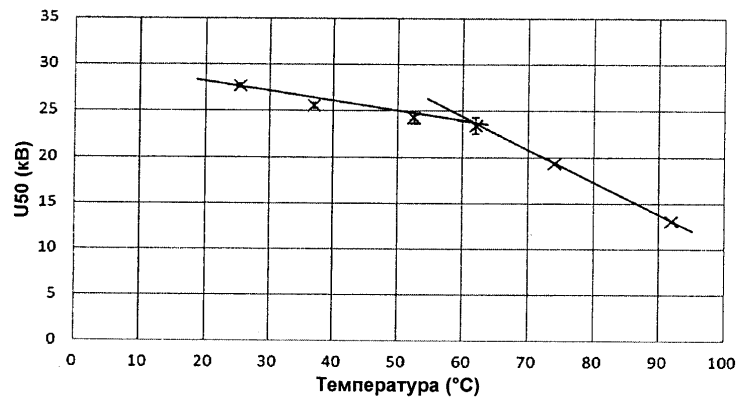


Фиг. 11

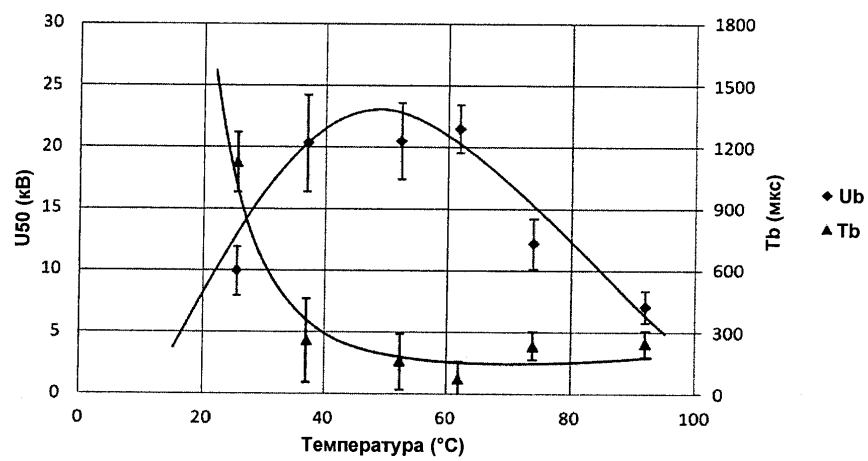


Фиг. 12

7/10

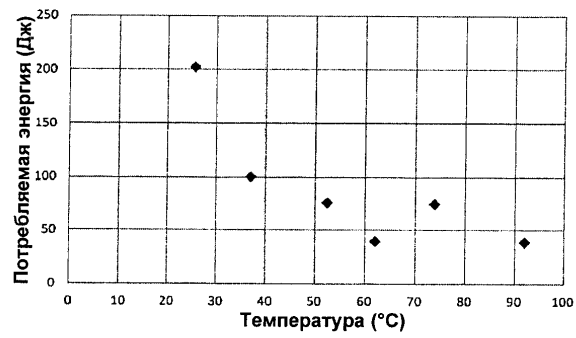


Фиг. 13

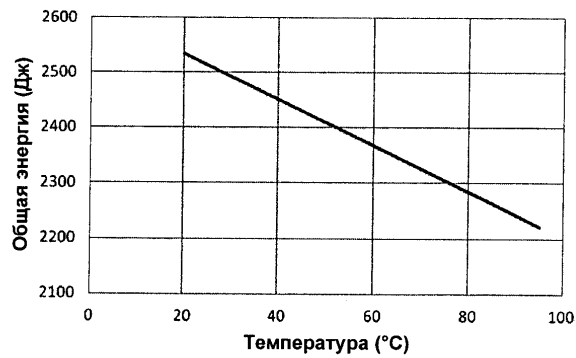


Фиг. 14

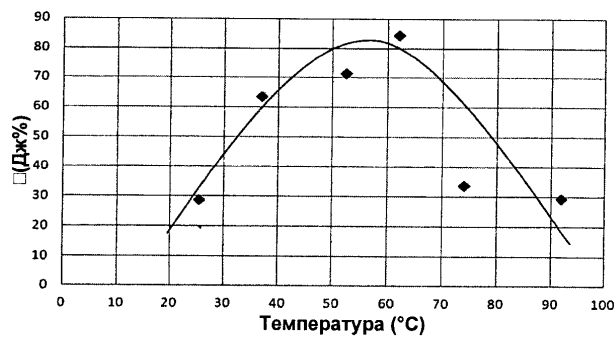
Фиг. 15

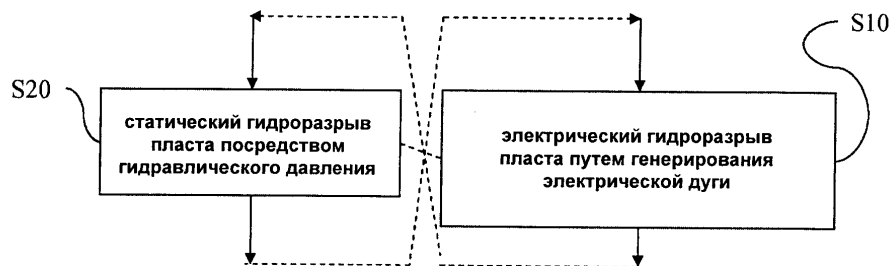


Фиг. 16

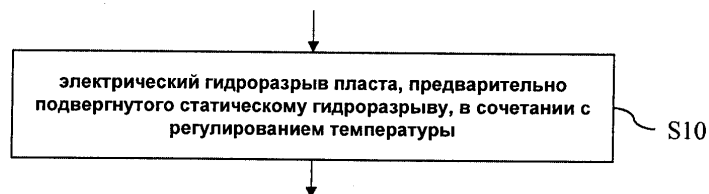


Фиг. 17

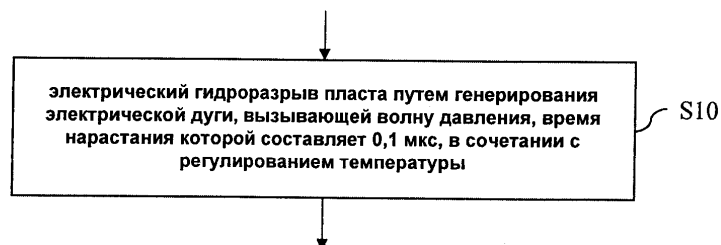




Фиг. 18

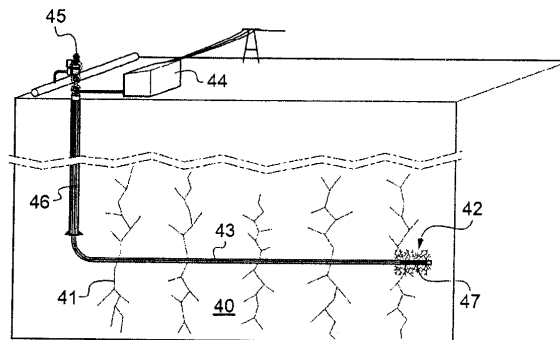


Фиг. 19

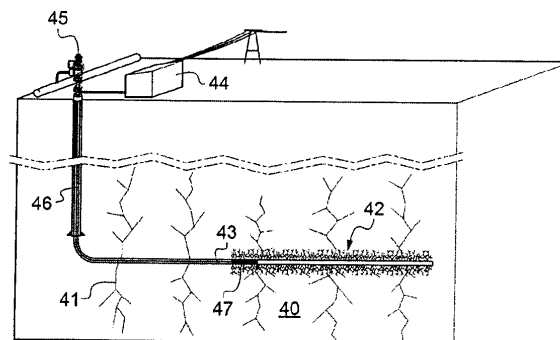


Фиг. 20

Фиг. 21



Фиг. 22



Фиг. 23

