

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(21) **202291761** (13) **A1**

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

(43) Дата публикации заявки  
2022.11.02

(51) Int. Cl. *E21B 43/267* (2006.01)  
*E21B 43/27* (2006.01)  
*G06F 30/20* (2020.01)

(22) Дата подачи заявки  
2019.12.19

**(54) ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПЛАСТА С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ КИСЛОТНОГО ТРАВЛЕНИЯ**

(86) PCT/RU2019/000981

(87) WO 2021/125999 2021.06.24

(71) Заявитель:  
**ШЛЮМБЕРГЕР ТЕКНОЛОДЖИ Б.В.**  
(NL)

(72) Изобретатель:  
**Романовский Ростислав  
Владимирович, Банников Денис  
Викторович, Емельянов Денис  
Юрьевич, Неввонен Ольга  
Владимировна, Петухова Галина  
Геннадьевна, Алексеев Алексей  
Владимирович, Кузнецов Дмитрий  
Сергеевич (RU)**

(74) Представитель:  
**Медведев В.Н. (RU)**

(57) Способ интенсификации добычи флюида из скважины содержит определение перспективной интенсифицирующей обработки, включающей закачку суспензии, содержащей кислоту и проппант, на основе измерений пласта. Развитие трещины и перенос жидкости в пласте моделируют с помощью метода "частица в ячейке". Моделируют травление породы, обусловленное закачкой кислоты. Моделируют уплотнение породы, включая уплотнение вокруг вытравленных и расклиненных частей трещины. Прогнозируемую проводимость по флюиду для кислотно интенсифицированной трещины рассчитывают на основе моделирования геометрии трещины, а конечную интенсифицирующую обработку определяют на основе прогнозируемой проводимости по флюиду. Суспензию кислота-проппант закачивают в пласт в соответствии с конечной интенсифицирующей обработкой.



**202291761  
A1**

**202291761  
A1**

## ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

2420-574812EA/072

### ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПЛАСТА С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ КИСЛОТНОГО ТРАВЛЕНИЯ

#### ОБЛАСТЬ ТЕХНИКИ

[1] Изобретение относится к добыче углеводородов и, в частности, к добыче углеводородов с помощью методов интенсификации скважин.

#### УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

[2] Углеводороды, такие как нефть и природный газ, обычно извлекают путем бурения скважин в углеводородсодержащие геологические пласты. Извлечение углеводородов таким способом может называться «добычей».

[3] Для некоторых скважин и пластов количество углеводородов, которое может быть добыто из коллектора, или скорость, с которой такие углеводороды можно добывать, могут быть улучшены посредством интенсификации скважины или коллектора с помощью различных методов. Примеры методов включают закачку под высоким давлением таких текучих сред, как вода, гели, кислоты или суспензии, содержащие волокна или проппанты. Такая практика обычно называется гидроразрывом пласта, и ее преимущество заключается в высокой проводимости трещин, которая сохраняется после закрытия трещины.

[4] Обычно цель такой интенсификации состоит в повышении проводимости пласта в отношении углеводородных флюидов, так что флюидам становится легче проходить через пласт к стволу скважины для добычи. Например, жидкость под давлением может создавать и физически расширять трещины в пласте, которые могут поддерживаться открытыми с помощью проппанта. Аналогично, кислотные жидкости могут вытравливать поверхности пласта, создавая дополнительный просвет для потока флюида.

[5] Интенсифицирующие обработки могут быть спроектированы и выполнены с помощью моделирования для прогнозирования эффектов от конкретной обработки. Иллюстративный метод моделирования переноса раскрыт в работе Mao, S., с соавторами, An Efficient Three-dimensional Multiphase Particle-in-cell Model for Proppant Transport in the Field Scale, Unconventional Resources Technology Conference 462, 22-24 July 2019. Mao et al. описали моделирование размещения частиц проппанта в трех измерениях. Однако в раскрытом методе не учтены кислотное травление, расход кислоты или прогиб породы.

#### КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ СУЩНОСТИ ИЗОБРЕТЕНИЯ

[6] Способ интенсификации добычи флюида из скважины в пласте включает: получение результатов измерения характеристик пласта; определение множества перспективных интенсифицирующих обработок, включающих закачку кислотной жидкости; для каждой из перспективных интенсифицирующих обработок: на основе измерений, моделирование развития трещины в пласте, вызванного закачкой жидкости под давлением, причем моделирование включает определение ячеек сетки,

представляющих трещину; моделирование переноса закачанной кислотной жидкости через пласт, причем моделирование переноса включает отслеживание перемещения блоков кислотной жидкости между блоками ячеек сетки; моделирование травления породы в трещине с получением модели вытравленной трещины, содержащей множество породных целиков, представляющих неоднородное травление в ячейках сетки; моделирование уплотнения породы в пласте на основе размера вытравленной трещины для каждой из ячеек сетки с получением размера уплотненной трещины, связанного с каждой из ячеек сетки; и расчет прогнозируемой проводимости по флюиду, связанной с перспективной интенсифицирующей обработкой, на основе моделирования; определение конечной интенсифицирующей обработки на основе одной из перспективных интенсифицирующих обработок и прогнозируемой проводимости по флюиду; и закачку кислотной жидкости в пласт в соответствии с конечной интенсифицирующей обработкой.

[7] Система для интенсификации добычи флюида из скважины в пласте содержит: множество датчиков для измерения характеристик пласта; вычислительное устройство, содержащее процессор и машиночитаемое запоминающее устройство; машиночитаемые команды, хранящиеся в машиночитаемом запоминающем устройстве, для моделирования множества перспективных интенсифицирующих обработок, включающих закачку кислотной жидкости, причем машиночитаемые команды содержат: модель развития трещины для моделирования развития трещины, вызванного закачкой жидкости под давлением в пласт, посредством определения ячеек сетки, представляющих трещину; модель переноса для моделирования переноса закачанной кислотной жидкости через пласт посредством отслеживания перемещения блоков кислотной жидкости между блоками ячеек сетки; модель травления для моделирования травления породы в трещине с получением представления вытравленной трещины, содержащей множество породных целиков, обусловленных неоднородным травлением в ячейках сетки; модель прогиба породы для моделирования уплотнения породы в пласте на основе размера вытравленной трещины для каждой из ячеек сетки с получением размера уплотненной трещины, связанной с каждой из ячеек сетки; команды для оценки прогнозируемой проводимости по флюиду, связанной с каждой из перспективных интенсифицирующих обработок, на основе моделирования; причем одна из перспективных интенсифицирующих обработок определяется как конечная интенсифицирующая обработка в результате соответствия прогнозируемой проводимости критерию производительности.

[8] Способ интенсификации добычи флюида из скважины в пласте, включающий: получение результатов измерения характеристик пласта; определение перспективных интенсифицирующих обработок, включающих закачку суспензии, содержащей кислотную жидкость и проппант; для каждой из множества перспективных интенсифицирующих обработок: на основе измерений, моделирование развития трещины и переноса суспензии жидкость-проппант в пласте с помощью метода «частица в ячейке»; моделирование травления породы в трещине с получением модели вытравленной трещины, содержащей множество породных целиков, представляющих неоднородное травление в ячейках сетки;

моделирование уплотнения породы в пласте на основе размера вытравленной трещины для каждой из ячеек сетки с получением размера уплотненной трещины, связанного с каждой из ячеек сетки; расчет прогнозируемой проводимости по флюиду для каждой из перспективных интенсифицирующих обработок; определение конечной интенсифицирующей обработки на основе одной из перспективных интенсифицирующих обработок и прогнозируемой проводимости по флюиду; и закачку кислотной жидкости с проппантом в пласт в соответствии с конечной интенсифицирующей обработкой.

#### КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

[9] На нижеприведенных фигурах показаны иллюстративные варианты осуществления:

[10] на ФИГ. 1 представлено схематическое изображение геологического пласта со стволом скважины и трещиной;

[11] на ФИГ. 2А-2В представлены блок-схемы, на которых показаны компоненты системы управления и сервер для моделирования;

[12] на ФИГ. 3 представлена блок-схема, на которой показаны компоненты числовой модели процесса, показанного на ФИГ. 2;

[13] на ФИГ. 4 представлена блок-схема, на которой показана модель трещины;

[14] на ФИГ. 5 представлена блок-схема, на которой показаны компоненты модели размещения, в которой применяется метод «частица в ячейке», для процесса, показанного на ФИГ. 2;

[15] на ФИГ. 6 представлено схематическое изображение, показывающее запись частиц модели размещения, показанной на ФИГ. 5;

[16] на ФИГ. 7 представлено схематическое изображение, показывающее запись ячеек со значениями, определяющими поле скоростей;

[17] на ФИГ. 8 представлена блок-схема, на которой показаны компоненты модели проводимости для процесса, показанного на ФИГ. 2;

[18] на ФИГ. 9 представлено схематическое изображение, на котором показано травление стенок трещины в пласте, показанном на ФИГ. 1;

[19] на ФИГ. 10 представлено схематическое изображение, на котором показан расчет ширины породного целика;

[20] на ФИГ. 11 представлено схематическое изображение, на котором показано определение породных целиков;

[21] на ФИГ. 12 представлено схематическое изображение, на котором показано определение раскрытия трещины;

[22] на ФИГ. 13 представлено схематическое изображение, на котором показана уплотненная трещина;

[23] на ФИГ. 14 представлено схематическое изображение, на котором показан расчет ширины породного целика с проппантом;

[24] на ФИГ. 15 представлено схематическое изображение, на котором показано определение породных целиков с проппантом;

[25] на ФИГ. 16 представлено схематическое изображение, на котором показано определение раскрытия трещины;

[26] на ФИГ. 17 представлено схематическое изображение, на котором показана уплотненная трещина; и

[27] на ФИГ. 18 представлена блок-схема, на которой показан процесс операции по интенсификации.

#### ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ СУЩНОСТИ ИЗОБРЕТЕНИЯ

[28] В настоящем изобретении предложены способы и устройства для интенсификации добычи из пласта, такого как углеводородсодержащий пласт. Такая интенсификация осуществляется посредством закачки жидкости под давлением в пласт через ствол скважины. Жидкость под давлением может включать проппант, кислоту или то и другое.

[29] Жидкость закачивают под давлением, достаточным для создания сдвигов внутри пласта. Например, жидкость под давлением может расширять существующие трещины или вызывать образование новых трещин внутри пласта. После сброса давления напряжение в пласте, называемое напряжением смыкания, стремится вернуть породу в исходное положение. Частицы проппанта в закачанной жидкости могут оказаться зажатыми между смежными поверхностями породы в трещине, так что раскрытие (просвет) между поверхностями породы сохраняться, несмотря на напряжение смыкания. Это может называться расклиненной трещиной.

[30] Кислота в закачанной жидкости также может создавать дополнительный просвет между поверхностями породы в пласте, например, за счет вытравливания поверхности породы, в результате чего после сброса разрывающего давления остается дополнительное пространство.

[31] Эффективность этих механизмов и взаимодействие между ними может зависеть от многих факторов, таких как тип породы и углеводородов в пласте, пористость породы и ранее существовавшая геометрия трещины. Такие факторы могут воздействовать, например, на поток жидкости для гидроразрыва через пласт, перемещение проппанта в закачанной жидкости, расход кислоты и степень травления, напряжение смыкания и размер расклиненного раскрытия трещины.

[32] Успех интенсификации скважины можно оценить в категориях повышения проводимости пласта или добычи из пласта по отношению к затратам на интенсификацию.

[33] Таким образом, в раскрытых примерах моделирование выполняют как часть операции по интенсификации, для идентификации обеспечивающих преимущество параметров интенсификации. К таким параметрам могут быть отнесены, помимо других факторов, одно или более мест закачки, через которые жидкость под давлением будет проходить в пласт, значения давления закачки, графики закачки, а также количество и состав жидкости и проппанта.

[34] На ФИГ. 1 представлено упрощенное схематическое изображение

углеводородсодержащего пласта 100 со стволом 102 скважины, пробуренной в пласте для добычи углеводородов.

[35] Углеводороды в пласте 100 могут проходить через пласт в ствол 102 скважины через проходы для потока, такие как поры или трещины. Способность пласта пропускать поток углеводородов может называться проводимостью пласта.

[36] Жидкость под давлением может быть закачана в пласт 100 через ствол 102 скважины. Такая закачка может вызывать сдвиг пласта и может инициировать разрыв. В свою очередь, это может приводить к повышению проводимости пласта и улучшению добычи углеводородов. Этот процесс называется гидроразрывом.

[37] Как показано на ФИГ. 1, в пласте 100 существует сеть трещин, окружающая ствол 102 скважины. Сеть трещин содержит трещины 110, которые могут иметь природное происхождение или могут быть созданы искусственно, например, посредством гидроразрыва. Сеть трещин может быть примерно однородной или может включать концентрации трещин 110 в одном или нескольких местах внутри пласта 100.

[38] Аналогично, углеводороды могут быть распределены в пласте 100 однородно или неоднородно. Например, углеводороды могут быть сконцентрированы в одной или нескольких зонах пласта 100.

[39] Углеводороды и другие флюиды могут протекать через трещины 110 в пласте 100, как показано стрелками 112. Поток флюидов через пласт может зависеть, например, от числа и размера трещин 110, распределения флюидов относительно трещин и градиента давления внутри пласта.

[40] Ствол 102 скважины проходит от поверхности в пласт 100. Устье 120 скважины расположено на поверхности, и колонна 122 насосно-компрессорных труб проходит от устья 120 скважины вниз внутри ствола 102 скважины вдоль длины ствола скважины.

[41] На поверхности установлена насосная система 124, которая находится в сообщении с колонной 122 насосно-компрессорных труб через устье 120 скважины, для закачки жидкости под давлением в колонну 122 насосно-компрессорных труб.

[42] Колонна 122 насосно-компрессорных труб имеет один или более портов 126 для закачки, расположенных вдоль ее длины. Порты 126 для закачки представляют собой отверстия, через которые внутренняя часть колонны 122 насосно-компрессорных труб сообщается с пластом 100, так что жидкость под давлением может проходить из колонны 122 в пласт 100. Порты 126 для закачки могут быть управляемыми. Иными словами, порты для закачки могут быть открыты избирательно, так что закачка жидкости под давлением в пласт 100 не должна обязательно осуществляться одновременно через все порты 126.

[43] Насосная система 124 содержит один или более поверхностных насосов 125 и один или более резервуаров 127 для жидкости для гидроразрыва. Компоненты насосной системы 124 могут быть расположены на грузовиках или других перемещаемых платформах.

[44] Система управления расположена на поверхности и может применяться для управления насосной системой 124 и избирательного открытия портов 126. Компоненты системы управления показаны на ФИГ. 2А. Система управления содержит контроллер, связанный с насосной системой 124 и портами 126 для закачки. Контроллер 128 может, например, управлять рабочей скоростью и давлением на выходе насоса 124, и может удаленно запускать открытие портов 126. Система управления может дополнительно содержать один или более датчиков для регистрации характеристик пласта 100 до, в течение и после операции по интенсификации скважины. Такие датчики могут включать, например, установленные на поверхности датчики 132, такие как сейсмические или вибрационные датчики, и множество датчиков 134 в скважине. Датчики 134 в скважине могут быть помещены в стволе 102 скважины или внутри каналов для отбора керновых проб, пробуренных поблизости от пласта 100. Датчики 132, 134 могут включать акустические датчики, сейсмические датчики, датчики давления и т. п.

[45] Данные, полученные с помощью системы управления, можно применять для построения компьютеризованной модели пласта 100 для моделирования проектирования операции по интенсификации.

[46] Аспекты любого из ствола 102 скважины, колонны 122 насосно-компрессорных труб, портов 126, насосной системы 124 и системы 128 управления, а также параметры интенсификации, выполняемой в отношении пласта 100, могут быть построены в соответствии с моделированием. Такое моделирование может давать возможность уточнения физической структуры и проектирования процесса для содействия обеспечению удовлетворительного осуществления конечной операции по интенсификации. Например, проектирование с помощью моделирования может давать возможность эффективного проведения интенсификации или может способствовать обеспечению высокого уровня добычи из скважины 102.

[47] На ФИГ. 2В показано вычислительное устройство для моделирования операции по интенсификации. Вычислительное устройство содержит процессор 131, запоминающее устройство 133, энергонезависимое запоминающее устройство 135 и одно или более устройств 137 ввода-вывода (I/O).

[48] Процессор 131 может представлять собой, например, процессор общего назначения, такой как процессор Intel или AMD, основанный на наборе команд x86, или процессор, основанный на наборе команд ARM. Другие возможности будут понятны специалистам в данной области техники.

[49] Процессор 131 выполняет команды, хранящиеся в энергонезависимом запоминающем устройстве 135, для моделирования операции по интенсификации, что более подробно описано ниже. Данные для осуществления моделирования могут быть получены от датчиков 132, 134 с помощью устройств 137 I/O. Такие данные могут включать, например, литологические параметры пласта 100, данные ГИС, данные каротажа, скорость закачки, давление закачки, давление на забое скважины и давление в кольцевом пространстве ствола 102 скважины, значения температуры, результаты

измерения вязкости и объем коллектора. Результаты моделирования могут быть выведены через устройства 137 I/O в виде инструкций по интенсификации пласта.

[50] Компоненты системы моделирования на вычислительном устройстве показаны на ФИГ. 3. Эти компоненты могут быть реализованы в аппаратном или программном обеспечении, или в их комбинации.

[51] В вариантах осуществления настоящего изобретения для моделирования переноса материала внутри пласта 100 может применяться метод «частица в ячейке» (PIC - англ.: particle-in-cell). Метод PIC может применяться для прогнозирования пространственного распределения материалов, присутствующих в системе.

[52] Алгоритмы PIC подробно описаны в Harlow F.W., “A Machine Calculation Method for Hydrodynamic Problems”, Los Alamos Scientific Laboratory report LAMS-1956 (1955), и публикации заявки на патент США № 2015/0060058, полное содержание которой включено в настоящий документ посредством ссылки.

[53] В иллюстративных вариантах осуществления закачанные жидкости могут быть смоделированы как серия виртуальных частиц. Каждая частица представляет блок жидкости или твердого материала, например, фиксированный объем жидкости или фиксированный объем твердого материала. В некоторых вариантах осуществления каждая виртуальная частица представляет блок конкретной закачанной жидкости. Закачанная суспензия, такая как суспензия вода-проппант, может быть представлена комбинациями частиц, например, комбинациями частиц воды с твердым проппантом, в пропорциях, соответствующих составу суспензии. В настоящем документе термин «частица» означает виртуальную частицу как ключевой элемент моделирования переноса жидкости с помощью вычислительного метода «частица в ячейке», если не указано иное.

[54] Каждая частица может иметь множество связанных характеристик, так что отслеживание распределения частиц по пласту 100 дает также распределение этих характеристик.

[55] Моделирование, описанное в настоящем документе, может быть выполнено для последовательности временных этапов. Например, размещение закачанных жидкостей может быть рассчитано посредством вычисления распределения и полей скоростей для множества дискретных временных этапов, которые совместно образуют полную продолжительность операции закачки. Полная продолжительность может включать один или более из следующих интервалов: закачки, в течение которого жидкость интенсивно закачивают в пласт 100; закрытия, в течение которого внутри пласта 100 поддерживается давление закачанной жидкости; и уплотнения, в течение которого происходит сброс давления закачанной жидкости.

[56] Перенос частиц можно моделировать в соответствии со следующим соотношением, где  $c(x, y, z)$  представляет собой функцию, определяющую физическую концентрацию.

$$\frac{\delta c}{\delta t} + \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial c}{\partial y} + \frac{\partial c}{\partial z} = 0$$

[57] Домен переноса жидкости (т. е., трещина 110) разделен на множество дискретных элементов, а именно, ячеек сетки, и для каждого временного этапа производится числовое решение приведенного выше уравнения для каждого элемента. Каждая ячейка сетки может содержать любое число различных частиц. Считается, что объемная доля, занятая конкретным материалом в ячейке, представляет собой отношение суммы объемов частиц этого материала к сумме объемов всех частиц в ячейке. Частицы могут перемещаться между ячейками или внутри одной и той же ячейки, в зависимости от рассчитанного поля скоростей.

[58] Как показано на ФИГ. 3, система моделирования включает модель 310 сети трещин, модель 320 размещения жидкости и модель 330 проводимости. В общих чертах, модель сети трещин представляет собой числовую модель, описывающую развитие гидравлической трещины внутри пласта 100 в течение интенсификации. Модель 320 размещения жидкости представляет собой числовую модель, определяющую распространение и расположение жидкости внутри модели трещины. Модель 330 проводимости является числовым представлением влияния закачанных жидкостей на сеть трещин, а именно, расклинивания трещин, кислотного травления в трещинах и уплотнения трещин прогибом породы, для определения получающегося распределения проводимости в пласте 100. Модель 340 добычи представляет собой числовую модель, описывающую поток углеводородов через пласт 100 к стволу 102 скважины после интенсификации.

[59] На ФИГ. 4 представлен схематический вид части трещины 110 в пласте 100, иллюстрирующий модель сети трещин.

[60] Положение, ориентация и размеры трещины 110 могут быть измерены непосредственно или рассчитаны по результатам измерений, полученных посредством датчиков 132 на поверхности скважины и посредством датчиков 134 в стволе скважины. Модель сети трещин осуществляет числовое моделирование с помощью алгоритма генерации трещин, создания или изменения трещин 110 посредством закачки под давлением жидкости для гидроразрыва .

[61] Показанная трещина расположена поблизости от порта 126 для закачки и проходит от порта в пласт 100. Трещина представлена в модели 310 сети трещин как двумерная матрица ячеек 402. Конкретно, двумерная сетка 400 нанесена на плоскость, проведенную через трещину. С каждой ячейкой 402 сетки 400 связано значение, описывающее размер трещины 110 в направлении, перпендикулярном сетке 400. Как показано, ячейки 402 имеют одинаковые размеры  $\Delta x$  и  $\Delta y$ . Однако в других вариантах осуществления ячейки могут иметь разные размеры. Некоторые ячейки сетки 400 представляют собой граничные ячейки, которые примыкают к порту 126 для закачки. Как будет описано более подробно, каждая ячейка может иметь связанную с ней запись данных, которая описывает жидкости, присутствующие в ячейке, скорость жидкостей в ячейке и источники жидкостей в ячейке, если это предусмотрено.

[62] На ФИГ. 5 показаны компоненты модели 320 размещения жидкости. Как

показано, модель 320 размещения жидкости включает записи 406 частиц и записи 408 поля скоростей.

[63] Запись данных может быть связана с каждой частицей в модели. Запись может включать множество значений, представляющих характеристики частицы. На ФИГ. 6А-6В показаны иллюстративные записи данных для трех частиц. Как показано, каждая запись данных включает идентификатор 410-1, 410-2, 410-3 соответствующей частицы (по отдельности и совместно, идентификаторы 410 частиц), соответствующий объем 412-1, 412-2, 412-3 (по отдельности и совместно, объемы 412), соответствующие типы частиц 414-1, 414-2, 414-3 (по отдельности и совместно, типы 414 частиц) и соответствующую долю 416-1, 416-2, 416-3 израсходованной кислоты (по отдельности и совместно, доли 416 израсходованной кислоты).

[64] В примере на ФИГ. 6А показаны три частицы. Частица с ID «1» имеет объем  $1 \text{ м}^3$  и состоит из материала первого типа, например, водной жидкости. Частица с ID «2» имеет объем  $1 \text{ м}^3$  и состоит из материала второго типа, например, кислоты. Значение 416-2 доли израсходованной кислоты, связанной с частицей 2, составляет 0,05, это указывает, что 95% кислотности частицы остается. Третья частица с ID «3» имеет объем  $1 \text{ м}^3$  и состоит из материала третьего типа, например, проппанта. Частицы 1 и 3 не имеют кислотности, достаточной, чтобы обусловить значительное травление. Значения 416-1, 416-3 долей израсходованной кислоты, связанные с частицами 1 и 3, заданы равными нулю.

[65] Закачаные материалы могут содержать любую комбинацию из: воды или водных жидкостей, таких как гель на полимерной основе с добавками, такими как сшивающие агенты, ингибиторы пенообразования, понизители трения; суспензий проппанта, таких как гели со сшивающими агентами на полимерной основе с керамическим проппантом, например, керамическим проппантом средней прочности с размером 20/40 по API; и кислотных жидкостей, таких как раствор соляной или другой подходящей кислоты в воде. Закачаные материалы могут дополнительно содержать добавки, такие как ингибиторы коррозии, понизители трения, стабилизаторы железа и деэмульгаторы. Для операций по интенсификации, включающих закачку и кислот, и проппантов, могут быть выбраны кислотоустойчивые проппанты. Другие закачиваемые материалы и добавки известны специалистам в данной области техники. Обычно закачка кислотной жидкости сопровождается закачкой чистой воды для предварительной продавки проппанта, продавки проппанта и перепродавки проппанта в объемах, достаточных для осуществления проекта обработки (гидроразрыва).

[66] Перемещение частиц жидкости через пласт 100 обусловлено закачкой жидкости и переносом, связанным с движением соседней жидкости. Движение жидкости численно рассчитывают по всем ячейкам, при этом движение жидкости (например, поток жидкости) можно аппроксимировать с помощью известных выражений, как описано в публикации заявки на патент США № 2015/0060058. Например, для моделирования потока через трещины 110 может применяться плоскопараллельная аппроксимация. В

выражения для ячеек, граничащих с портами 126 для закачки, могут быть добавлены члены источника жидкости.

[67] Движение жидкости можно рассчитать по временным этапам в течение операции закачки с общей продолжительностью временных этапов, соответствующей длительности операции закачки, плюс дополнительные временные этапы для учета дальнейшего движения, связанного с градиентами остаточного давления внутри пласта 100 после прекращения закачки.

[68] Как отмечалось, закачанные жидкости могут включать кислоты. Такие кислоты могут вступать в реакцию на поверхности породы по мере их миграции через пласт 100. Травление происходит в результате реакции кислоты с породой пласта. На скорость таких реакций влияют количество, тип и концентрация присутствующей кислотной жидкости.

[69] На каждом временном этапе количество кислоты, доступной для реакции в ячейке, определяется на основе записей «кислотной частицы» для частиц в ячейке (см. приведенное выше определение метода «частица в ячейке»). Например, общее количество доступной кислоты можно оценить на основе количества и типа виртуальных кислотных частиц и значения долей 416 израсходованной кислоты для каждой виртуальной кислотной частицы.

[70] В примере, степень травления поверхностей пород может быть определена следующим соотношением:

$$w_{etched} = \frac{w\Delta C_A\beta}{(1-\phi)}$$

[71] Где  $w$  представляет собой ширину трещины,  $\Delta C_A$  представляет собой изменение молярной концентрации кислоты, связанное с реакцией с поверхностью породы,  $\beta$  представляет собой молярную растворяющую способность кислоты, а  $\phi$  представляет собой пористость породы.

[72]  $\Delta C_A$  рассчитывают числовым решением следующих уравнений:

$$\frac{w}{2} \frac{\partial C_A}{\partial t} = -k_r(C_{wall} - C_{eq})^m$$

$$\frac{w}{2} \frac{\partial C_A}{\partial t} = -(k_g + u_L)(C_m - C_{wall})$$

где  $C_{wall}$  представляет собой молярную концентрацию кислоты на стенке трещины,  $C_{eq}$  представляет собой равновесную молярную концентрацию кислоты,  $k_r$  представляет собой константу скорости реакции,  $m$  представляет собой порядок реакции,  $w$  представляет собой ширину трещины,  $K_g$  представляет собой коэффициент массового переноса, а  $u_L$  представляет собой скорость утечки.

[73] Травление может прогрессировать с течением времени. Таким образом, для каждого временного этапа операции закачки можно оценить травление внутри ячейки 402, а ширину трещины 110 в этой ячейке можно уточнить с учетом травления.

[74] В реакции кислоты с породой пласта может потребляться кислота и могут производиться не кислотные продукты реакции. В некоторых вариантах осуществления

состав и объем жидкости в ячейке 402 можно считать постоянными, несмотря на протекание реакций с участием кислоты. Иными словами, можно считать, что реакции травления оставляют неизменными объем 412 и доли 414 жидкости. Тем не менее, расход кислоты можно отслеживать по доле 416 израсходованной кислоты, соответствующему каждой доле 414 жидкости. Доля 416 израсходованной кислоты может увеличиваться на каждом временном этапе, поскольку кислота, связанная с виртуальной частицей, потребляется, например, как описано выше.

[75] На ФИГ. 6А показана запись 406 частицы в начале временного этапа. Частица содержит кислотный компонент, а именно, жидкость\_2. В начале временного этапа кислотный компонент не потреблялся в реакциях травления.

[76] На ФИГ. 6В показана запись 406 частицы в конце временного этапа. Рассчитано, что в результате реакции травления в течение временного этапа должно быть израсходовано 5% кислоты. Соответственно, доля 416 израсходованной кислоты увеличилась от 0 до 0,05.

[77] На последующих временных этапах доля израсходованной кислоты может приводить к уменьшению скорости травления. Например, в приведенном выше примере изменения долей 416 израсходованной кислоты и движение кислотных частиц может изменять концентрацию кислоты на стенке трещины, т. е.,  $C_{wall}$ . Доля израсходованной кислоты может прогрессивно увеличиваться на каждом временном этапе, поскольку при травлении потребляется дополнительная кислота.

[78] На каждом временном этапе записываются частицы жидкости в каждой ячейке 402 и скорости жидкости в каждой ячейке 402. На ФИГ. 7 показана иллюстративная структура 420 данных, включающая запись для каждой ячейки 402 с записями частиц и скорости жидкости. Как показано, запись 422 сохраняется для каждой ячейки 402. Запись 422 ячейки включает ID 424 ячейки, ID 426 частицы и соответствующий объем 428 частицы для каждой частицы, присутствующей в ячейке, объем 430 ячейки, значение 432 скорости в направлении X и значение 432 скорости в направлении Y. Набор значений 432, 434 скорости может называться полем скоростей.

[79] Значения ID 426 частицы в структуре 420 данных соответствуют значениям ID 410 частицы в записи 408 данных. Соответствующие характеристики частиц могут непосредственно заноситься в запись 420 данных или, как показано, заноситься в запись 408 данных и упоминаться в структуре 420 данных посредством ID частицы. Эта последовательность демонстрирует, как метод «частица в ячейке» работает для каждого временного этапа.

[80] По завершении моделирования размещения жидкости структура 420 данных отражает окончательные положения (т. е., размещение) закачаных жидкостей.

[81] Подходящее моделирование размещения жидкости может быть выполнено с помощью программ Kinetix® и FracCADE® (версия 7.4), поставляемых Schlumberger.

[82] На ФИГ. 8 компоненты модели 330 проводимости показаны более подробно. Модель 330 проводимости включает расклинивающий трещину компонент 440,

травильный компонент 450, компонент 460 прогиба породы и компонент 470 израсходованной кислоты.

[83] Расклинивающий трещину компонент 440 моделирует деформацию проппантной набивки под пластовым напряжением после сброса давления закачки и, таким образом, оценивает конечную ширину раскрытия трещин в местах, где размещен проппант.

[84] Распределение проппанта определяется в соответствии с конечными положениями частиц, которые рассчитывают с помощью модели 320 размещения жидкости. Часть пласта 100, окружающая трещину 110, рассматривается как два упругих тела на противоположных сторонах трещины 110.

[85] Трещина 110 разделена на сетку ячеек, как описано выше со ссылкой на ФИГ. 4. Для каждой ячейки, в которой присутствует проппант, считается, что проппант заполняет пространство между поверхностями породы. После сброса давления закачки раскрытия аппроксимируют как приближенные к конечной ширине раскрытия в зависимости от напряжения в пласте 100 и модуля упругости проппанта и породы в пласте. Подробности таких расчетов раскрыты, например, в публикации заявки на патент США 2015/0060058.

[86] Модели 450 травильного компонента изменяют ширину отверстия в результате травления кислотой породы на границах трещины.

[87] Травление породы и размещение проппанта в трещине 110 могут быть неоднородными. Компонент 460 прогиба породы обуславливает отклонение породы в пласте 100 вокруг расклинённых или протравленных зон трещины, которое может называться уплотнением.

[88] Расчеты, выполняемые посредством компонента 460 прогиба породы, производятся с помощью сетки 400 ячеек 402, описанной выше со ссылкой на ФИГ. 4. Компонент 460 прогиба породы идентифицирует ячейки 402 либо как расклинённые ячейки, в которых противоположные стенки трещины поддерживаются на расстоянии друг от друга проппантной набивкой, либо как проходные ячейки, в которых пространство между стенками не заполнено проппантом, но в которых прогиб породы недостаточен для приведения стенок в контакт друг с другом, либо как узкие ячейки, в которых стенки находятся в контакте друг с другом и перекрывают поток.

[89] На ФИГ. 9 показан набор из трех ячеек 402-1, 402-2, 402-3, в которых произошло кислотное травление. Конкретно, стенка 462 трещины была протравлена в ячейках 402-1 и 402-2, что привело к расширению размеров раскрытия в этих ячейках.

[90] Как показано на ФИГ. 10, компонент прогиба породы рассчитывает максимальную ширину раскрытия,  $w_{\max}$ , по трещине 110, а именно, максимальное раскрытие, рассчитанное для ячейки внутри трещины. В каждой ячейке рассчитанную вытравленную ширину  $w_i^e$  вычитают из максимальной ширины раскрытия с получением толщины породы, остающейся в зоне трещины. Эта часть породы может быть результатом неоднородности травления вдоль трещины 110. Для данной ячейки 402 эта часть породы

может называться породным целиком, а ее ширина может называться шириной породного целика  $w_i^{rp}$ . Ширина породного целика определяется в соответствии со следующим соотношением:

$$w_i^{RP} = w_{max}^e - w_i^e$$

[91] Рассчитанный породный целик для каждой ячейки 402 виртуально перемещается в центр ячейки, как показано на ФИГ. 11. Иными словами, хотя ширина породного целика состоит из участков породы на стенках трещины, для расчетов прогиба ячейки можно рассматривать как имеющие центральные сегменты породы с толщиной, эквивалентной толщине породного целика  $w_i^{rp}$

[92] Граничные условия заданы для ячеек на концах трещины 110. В примере граничные условия могут быть определены как дополнительные ячейки неповрежденной породы 402-В на каждом конце сетки 400, как показано на ФИГ. 12.

[93] Затем рассчитывают уплотнение породных целиков с помощью подхода, описанного выше для уплотнения проппанта. Конкретно, уплотнение каждого породного целика рассчитывают на основе модуля упругости породы и пластового напряжения.

[94] Уплотнение может быть рассчитано для последовательности временных этапов. На каждом временном этапе прогиб породы рассчитывают на основе уравнивания пластового напряжения с упругими характеристиками породы, а именно, модуля упругости и коэффициента Пуассона породы. Смежные и граничные ячейки сетки 400 рассматриваются как система. Иными словами, прогиб породы в ячейке зависит от состояний смежных ячеек. На конкретном временном этапе, если напряжение в породе, основанное на прогнозируемом прогибе и положениях смежных ячеек не уравнивает пластовое напряжение, можно прогнозировать дальнейший прогиб породы, а затем повторять расчеты прогиба на основе нового прогнозируемого состояния породы. Расчеты уплотнения прекращают, когда на данном временном этапе не прогнозируется дальнейший изгиб и полученное состояние породы в каждой ячейке 402 рассматривается как конечное уплотненное состояние.

[95] Этот расчет приводит к получению значения раскрытия для каждой ячейки, названного  $aperture_i$ .

[96] Затем действительные значения ширины уплотненных породных целиков рассчитывают следующим образом, где  $\sigma_c$  представляет собой напряжение уплотнения, а  $M$  представляет собой продольный модуль упругости породы:

$$w_i^{RP*} = w_i^{RP} \cdot (1 - \sigma_c/M), \text{ если } w_i^{RP*} < aperture_i$$

$$w_i^{RP*} = w_i^{RP}, \text{ в противном случае}$$

Иными словами, ширина уплотненного породного целика уменьшается в результате приложенного к породе напряжения, только если результат будет меньше рассчитанного раскрытия. Пример такого расчета проиллюстрирован на ФИГ. 12.

[97] Конечные выправленные ширины  $w_i^{final}$  рассчитывают посредством вычитания ширин целиков из раскрытий в каждой ячейке:

$$w_i^{final} = aperture_i - w_i^{RP*}$$

[98] Если это приводит к отрицательной конечной ширине для любой ячейки, то ширину для этой ячейки задают равной нулю. На ФИГ. 13 показаны конечные вытравленные ширины для ячеек 402-1, 402-2, 402-3.

[99] В некоторых вариантах осуществления прогиб породы может учитывать и прогиб в вытравленных кислотой зонах, и прогиб вокруг проппантной набивки в трещинах 110.

[100] Моделирование уплотнения в ячейках с проппантной набивкой показано на ФИГ. 14-15.

[101] Как показано на ФИГ. 14, ячейки могут иметь ширину отверстия  $w_i^e$  между противоположными поверхностями породы и любыми проппантными набивками. Трещина 110 может иметь максимальную ширину  $w_{max}^e$ .

[102] Проппант рассматривается как часть породного целика в любой ячейке. Таким образом, размер проппант-породного целика в ячейке рассчитывают как разность между максимальной шириной трещины  $w_{max}^e$  в этой ячейке и действительной шириной отверстия  $w_i^e$  в этой ячейке.

[103] Как показано на ФИГ. 15, граничные условия определены, например, в виде концевых ячеек твердой породы. Рассчитанные проппант-породные целики виртуально смещены к центру каждой ячейки.

[104] Затем моделируют уплотнение для проппант-породных целиков таким же образом, как описано выше применительно к вытравленным кислотой породным целикам. Конкретно, уплотненные ширины для целиков рассчитывают следующим образом, как показано на ФИГ. 16:

$$w_i^{RP*} = w_i^{RP} \cdot (1 - \sigma_c/M), \text{ если } w_i^{RP*} < aperture_i$$

$$w_i^{RP*} = w_i^{RP}, \text{ в противном случае}$$

Где  $\sigma_c$  представляет собой часть пластового напряжения, приложенного к целику, а  $M$  представляет собой модуль упругости породы пласта.

[105] Конечные вытравленные ширины  $w_i^{final}$  рассчитывают посредством вычитания ширин целиков из раскрытий в каждой ячейке:

$$w_i^{final} = aperture_i - w_i^{RP*}$$

[106] Любые отрицательные значения ширин задают равными нулю. Значения конечной уплотненной ширины показаны на ФИГ. 17.

[107] На ФИГ. 18 показан иллюстративный процесс 500 интенсификации, основанный на моделировании.

[108] В блоке 505 данные получают от датчиков в пласте 100. Конкретно, результаты измерений получают от датчиков 132, 134 в пласте 100 и внутри ствола 102 скважины. Как было указано, измерения могут включать, например, литологические параметры пласта 100, данные ГИС, данные каротажа, скорость закачки, давление

закачки, давление на забое скважины и давление в кольцевом пространстве ствола 102 скважины, значения температуры, результаты измерения вязкости и объем коллектора.

[109] В блоке 507 определяют перспективную операцию по интенсификации. Проект интенсификации включает множество этапов, каждый из которых определяет продолжительность, скорость закачки, с которой жидкость подлежит закачке через ствол 102 скважины, один или более типов и кислот, подлежащих закачке, и соответствующие концентрации, и необязательно один или более типов проппанта, подлежащих закачке, и соответствующие концентрации. Водная жидкость, закачиваемая до и после кислоты (для предварительной продавки проппанта, продавки и перепродавки проппанта), представляет собой другой тип жидкости, подлежащий определению в перспективной интенсификации.

[110] В блоке 510 создают модель трещин 110 внутри пласта 100. Модель создают с помощью компонента 310 моделирования трещины (ФИГ. 3). Результаты измерений, полученные в блоке 505, и проект перспективной интенсификации, определенный в блоке 507, применяют для создания аппроксимации геометрии трещины в пласте. Сетку накладывают на геометрическую аппроксимацию и определяют набор дискретных ячеек конечных размеров. Сетка может быть двумерной, и с каждой ячейкой сетки может быть связано значение, описывающее ширину трещины в каждой ячейке. Затем могут быть выполнены этапы моделирования по каждой ячейке.

[111] После того как модель трещины определена, перенос жидкости в пласт 100 через трещины 110 моделируют по временным этапам.

[112] В блоке 520 перенос жидкости через трещины 110 пласта 100 моделируют с помощью модели 320 размещения. Перенос моделируют с помощью метода PIC. Поток через каждую ячейку можно рассчитать с помощью уравнений для потока между плоскими пластинами для конкретного определенного временного этапа. Граничные ячейки, в которые закачивают жидкость, можно моделировать с помощью граничных условий, представляющих закачку как источник жидкости.

[113] Расчеты переноса, выполненные в блоке 520, определяют положение для каждой частицы жидкости, а именно, ячейку 402, в которой расположена каждая частица жидкости. Расчеты переноса определяют также скорости жидкости в каждой ячейке 402. Положения частиц и скорости в каждой ячейке записывают в структуру 420 данных, и они применяются для расчетов переноса на последующих временных этапах.

[114] В блоке 530 рассчитывают травление поверхностей породы кислотой, которая присутствует в жидкости для интенсификации. Исходя из положения кислот, а также типа, количества и концентрации кислоты внутри каждой ячейки, определяют скорость реакций травления. На основе рассчитанной скорости рассчитывают скорректированную ширину трещины для каждой ячейки.

[115] Количество кислоты, израсходованной в реакциях травления, отслеживают, и израсходованную кислоту регистрируют для каждой частицы жидкости.

[116] В блоке 540 обновляют созданную ранее модель трещины 110 в пласте. Для ячеек, в которых происходит травление, сохраняют новые значения ширины трещин.

[117] В блоке 550 определяют, все ли временные этапы были завершены. Если нет, процесс 500 возвращается к блоку 520 для повторения расчетов переноса жидкости для нового временного этапа. Если все временные этапы были завершены, т. е., если временные этапы совместно составляют общую продолжительность операции закачки, то процесс переходит к блоку 560.

[118] В блоке 560 рассчитывают распределение проводимости после интенсификации с помощью конечных положений частиц из структуры 420 данных.

[119] Ячейки 402 с проппантными набивками идентифицируют на основе конечного размещения частиц проппанта в структуре 420 данных. Значения ширины таких проппантных набивок рассчитывают на основе ширины трещины после любого травления кислотами.

[120] Аналогично, полную вытравленную ширину трещин 110 определяют для каждой ячейки.

[121] Расчеты прогиба породы выполняют для определения степени уплотнения вокруг проппантных набивок и в вытравленных областях. Для каждой ячейки рассчитывают толщину породного целика или проппант-породного целика, и определяют соответствующие целики. Затем моделируют уплотнение для определения конечной ширины трещины после сброса давления закачки.

[122] После того как рассчитано распределение ширины трещин, можно рассчитать соответствующие значения проводимости. В примере, поток через проходные ячейки можно аппроксимировать с помощью кубического закона, а именно:

$$(k_f w = w_i^3 / 12)$$

[123] Где  $k_f$  представляет собой проницаемость, а произведение проницаемости и ширины трещины, т. е.,  $k_f w$ , называется проводимостью трещины.

[124] Полученное распределение проводимости можно оценить для определения прогнозируемого успеха операции по интенсификации. Например, общую проводимость можно рассчитать для всех ячеек 402 в пласте 100. Дополнительно или альтернативно можно рассчитать среднюю проводимость. Эти величины можно сравнить с пороговыми значениями, чтобы определить, соответствует ли интенсификация критерию производительности.

[125] В некоторых вариантах осуществления проводимость после интенсификации, прогнозируемую посредством моделирования, можно сравнить с оценками проводимости до интенсификации. Прогнозируемую производительность операции по интенсификации можно оценить, например, по относительному или абсолютному повышению проводимости. Дополнительно или альтернативно, прогнозируемую производительность можно оценить по прогнозу добычи. Например, можно произвести моделирование для оценки общего объема добычи углеводородов, зависимости нормы отбора от времени или того и другого. Моделирование добычи может быть основано на моделировании переноса жидкости через пласт с помощью метода «частица в ячейке», как описано выше, за

исключением того, что в то время как жидкость выкачивают из ствола 102 скважины, градиенты давления в пласте 100 будут стремиться выводить жидкости в направлении ствола 102 скважины. Прогнозируемые значения добычи можно сравнивать с пороговыми значениями или результаты нескольких проектов интенсификации можно сравнивать друг с другом.

[126] В блоке 565 определяют, соответствует ли прогнозируемая проводимость критерию производительности. Если нет, процесс возвращается в блок 507, в операцию перспективной интенсификации вносят изменения и процесс повторяется.

[127] Если моделирование проводимости прогнозирует достаточную производительность, операция по перспективной интенсификации принимается как конечная в блоке 570, и смоделированная операция по интенсификации может быть реализована в стволе 102 скважины. Иными словами, интенсификацию можно осуществлять с последовательностью закачиваемых жидкостей при давлении, количестве, продолжительности и размещении, предписанных моделированием. Альтернативно, если проводимость, прогнозируемая моделированием, является недостаточной, проект интенсификации может быть изменен, и моделирование можно повторить.

[128] Варианты осуществления изобретения, описанные в настоящем документе, могут давать возможность точно определять проводимость пласта после интенсификации. Например, путем сравнения с моделями, в которых учтено только одно из кислотного травления или закачки проппанта, или путем сравнения с моделями, в которых не отслеживается израсходованная кислота с течением времени, можно убедиться, что прогнозы проводимости могут быть улучшены. Аналогично, может быть улучшена оценка производительности для проектов перспективной интенсификации, что приведет к улучшению проектов интенсификации.

#### [129] Примеры

Следующие примеры представлены для дополнительной иллюстрации способов и систем, описанных в настоящем документе, и не ограничивают настоящее изобретение. Данные измерений в иллюстративном пласте представлены в приведенных ниже таблицах I-II. Как показано, измерения связаны с зонами пласта, определенными в категориях глубины вдоль ствола скважины.

[130] Пример 1 иллюстрирует этапы моделирования переноса кислоты в трещину при давлении, превышающем давление гидроразрыва обрабатываемого пласта. Виртуальные частицы в методе «частица в ячейке» описывают перенос кислотной жидкости и водной жидкости внутри вычисляемого домена. В таблицах обобщены основные входные и выходные данные для каждого этапа вариантов осуществления изобретения. Известняк в этом иллюстративном многозонном пласте имеет тенденцию к образованию трещин и поддается кислотной обработке (гидроразрыв с кислотной обработкой).

#### [131] Таблица I: измерения пласта

1	Название зоны	Глубина пересечения (м)	Общая высота (м)	Тип породы	Давление в пласте (МПа)
1	Зона 1	8200	300	Сланец	452,5
2	Зона 2	8500	25	Известняк	452,5
3	Зона 3	8525	50	Известняк	452,5
4	Зона 4	8575	25	Известняк	452,5
5	Зона 5	8600	328	Сланец	452,5

[132] Таблица II: измерения пласта

	Минимальное горизонтальное напряжение (МПа)	Собственная проницаемость (мД)	Пористость (%)	Модуль Юнга (МПа)	Температура (°С)
1	835,0	0,0001	1,00	4200	217,4
2	851,250	0,1000	10,00	4200	220,1
3	461,7	0,1000	10,00	4200	220,7
4	858,75	0,1000	10,00	4200	221,3
5	876,404	0,0001	1,00	4200	224,2

[133] В таблицах III-VI приведены четыре иллюстративные перспективные обработки, рассчитанные на основе измерений. Как показано, каждая перспективная обработка имеет несколько этапов, определенных как предварительная продавка, кислотная обработка, перепродавка и продавка. На каждом этапе перспективная обработка определяет объемную скорость закачки ( $\text{м}^3/\text{мин}$ ), тип жидкости (кислота или вода) и объем закачанной жидкости для этапа.

[134] Таблица III: перспективная обработка 1:

Название этапа	Скорость закачки $\text{м}^3/\text{мин}$	Жидкость	Объем жидкости $\text{м}^3$
1 Предварительная продавка	1,59	Вода	3,74
2 Кислота	1,59	HCl 28	4,59
3 Перепродавка	1,59	Вода	1,90
4 Продавка	1,59	Вода	7,94

Таблица IV: перспективная обработка 2:

Название этапа	Скорость закачки $\text{м}^3/\text{мин}$	Жидкость	Объем жидкости $\text{м}^3$
----------------	--	----------	-----------------------------

Название этапа	Скорость закачки	Жидкость	Объем жидкости
	м <sup>3</sup> /мин		м <sup>3</sup>
1 Предварительная продавка	1,59	Вода	13,56
2 Кислота	1,59	HCl 28	16,24
3 Перепродавка	1,59	Вода	2,62
4 Продавка	1,59	Вода	7,94

Таблица IV: перспективная обработка 2:

Таблица V: перспективная обработка 3:

Название этапа	Скорость закачки	Название жидкости	Объем жидкости
	м <sup>3</sup> /мин		м <sup>3</sup>
1 Предварительная продавка	1,59	Вода	20,53
2 Кислота	1,59	HCl 28	24,40
3 Перепродавка	1,59	Вода	2,88
4 Продавка	1,59	Вода	7,94

Таблица VI: перспективная обработка 4:

Название этапа	Скорость закачки	Название жидкости	Объем жидкости
	м <sup>3</sup> /мин		м <sup>3</sup>
1 Предварительная продавка	1,59	Вода	2,88
2 Кислота	1,59	HCl 28	34,02
3 Перепродавка	1,59	Вода	3,15
4 Продавка	1,59	Вода	7,94

[135] Данные по развитию трещины (т. е., полудлина трещины), рассчитанные для каждой перспективной обработки 1-4, показаны в таблице VII. Данные по развитию трещины рассчитаны с помощью метода «частица в ячейке» для определения положения и концентрации всех жидкостей, закачанных в трещину, включая кислотные жидкости. Самый длинный вариант трещины среди смоделированных перспективных обработок получен в случае обработки IV с самым большим объемом обрабатывающей жидкости.

[136] Таблица VII: полудлина трещины

Название обработки	Полудлина трещины
	m

Название обработки		Полудлина трещины
		m
1	Обработка 1	29,77
2	Обработка 2	85,82
3	Обработка 3	117,16
4	Обработка 4	147,39

[137] Рассчитанные в то же время данные кислотного травления показаны в таблице VIII. Израсходованную кислоту отслеживали по методу «частица в ячейке», а вытравленная ширина показана как средняя по домену моделирования.

[138] Таблица VIII: вытравленная ширина трещины

Название обработки		Средняя вытравленная ширина
		мм
1	Обработка 1	2,53
2	Обработка 2	10,38
3	Обработка 3	5,32
4	Обработка 4	6,39

[139] Уплотнение породы, основанное на расчете вытравленной ширины, представлено в таблице IX. Теперь вытравленная ширина (после уплотнения) является более реалистичной, чем на предыдущем этапе расчета травления для стенок трещины. Уплотнение моделировали с помощью породных целикков, определенных по распределению вытравленной ширины, и оно показано как среднее значение по трещине. Известная уплотненная ширина дает возможность рассчитать конечную проводимость трещины в каждой ячейке сетки для каждого варианта обработки.

[140] Таблица IX: уплотненная ширина

Название обработки		Средняя уплотненная ширина трещины
		мм
1	Обработка 1	0,59
2	Обработка 2	2,39
3	Обработка 3	1,24
4	Обработка 4	1,33

[141] В таблице X показана прогнозируемая проводимость по флюиду, соответствующая распределению уплотненной ширины, представленная как среднее значение по трещине. Прогнозируемую проводимость по флюиду можно сравнить с целевой проводимостью для оценки того, достигнута или нет цель кислотной обработки.

[142] Таблица X: прогнозируемая проводимость

Название обработки		Средняя проводимость трещины
--------------------	--	------------------------------

		мД°х°м
1	Обработка 1	1,456
2	Обработка 2	10,980
3	Обработка 3	1,785
4	Обработка 4	2,004

[143] Целевой показатель производительности для перспективных обработок представлял собой среднюю проводимость около 5000 мД°х°м после кислотной интенсификации. Обработка 2 имела самую высокую прогнозируемую проводимость среди перспективных обработок, и прогнозировалось, что она будет соответствовать целевому показателю производительности. Обработку 2 выбрали в качестве конечной обработки для применения в пласте.

[144] Пример 2 иллюстрирует основные этапы кислотного моделирования, показанного в примере 1, причем обрабатывающая жидкость представляет собой вязкую кислотную жидкость, которая переносит в трещину части проппанта. Проппant добавляют в обрабатывающую жидкость в импульсном режиме. Этот тип гидроразрыва известен как технология создания высокопроводящего канала трещины HiWAY<sup>®</sup>, разработанная Schlumberger Company (США) и широко применяемая для слоев песчаника. Концентрация проппанта в обогащенных проппантом импульсах приближалась к 360 м<sup>3</sup>/кг, и за этими обогащенными проппантом импульсами следуют «чистые» стадии, часто такой же продолжительности (только кислота без проппанта). Проппant представлял собой кислотостойкие твердые частицы CarboProp<sup>®</sup> Light размером 20/40 меш и относительной плотностью 2,64. В этом случае, в методе «частица в ячейке» рассматривается несколько типов «виртуальных частиц» (желированная кислота, проппант, вода) - см. идентификационную таблицу на ФИГ. 6А-6В. Создание высокопроводящего канала трещины приводит к возникновению проппантных целиков с открытыми каналами между ними. Травление стенки происходит, главным образом, в открытых (направленных по каналу) проходах.

[145] В соответствии с настоящим изобретением, уплотнение проппантных целиков давлением пласта (этот же тип пласта описан в таблицах I-II примера 1) уменьшает действительную ширину трещины. Целевой уровень средней проводимости в расклиненной и обработанной кислотой трещине (например, 5000 мД°х°м) был достигнут в одной из смоделированных перспективных обработок, а затем была выполнена реальная операция гидроразрыва.

[146] Конкретные варианты осуществления изобретения, описанные выше, являются только иллюстративными, поскольку настоящее изобретение может быть изменено и реализовано на практике другими, но эквивалентными способами, очевидными для специалиста в данной области техники, имеющего преимущество ознакомления с идеями, изложенными в настоящем документе. Кроме того, не предполагается никаких ограничений в отношении описанных в настоящем документе

деталей конструкции или проекта, кроме описанных в приведенной ниже формуле изобретения. Поэтому очевидно, что конкретные иллюстративные варианты осуществления, раскрытые выше, могут быть изменены, объединены или модифицированы, и все такие варианты рассматриваются в рамках объема и сущности настоящего изобретения. Варианты осуществления, иллюстративно раскрытые в настоящем документе, могут быть подходящим образом реализованы в отсутствие какого-либо элемента, который конкретно не раскрыт в настоящем документе, и/или любого необязательного элемента, раскрытого в настоящем документе.

## ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ кислотной интенсификации добычи флюида из скважины в пласте, включающий:

получение результатов измерения характеристик пласта;

определение множества перспективных интенсифицирующих обработок, включающих закачку кислотной жидкости;

для каждой из перспективных интенсифицирующих обработок:

на основе измерений, моделирование развития трещины в пласте, вызванного закачкой жидкости под давлением, включающее определение ячеек сетки, представляющих трещину;

моделирование переноса закачанной кислотной жидкости через пласт, включающее отслеживание перемещения блоков кислотной жидкости между блоками ячеек сетки;

моделирование травления породы в трещине с получением модели вытравленной трещины, содержащей множество породных целиков, представляющих неоднородное травление в ячейках сетки;

моделирование уплотнения породы в пласте на основе размера вытравленной трещины для каждой из ячеек сетки с получением размера уплотненной трещины, связанной с каждой из ячеек сетки; и

расчет прогнозируемой проводимости по флюиду, связанной с перспективной интенсифицирующей обработкой, на основе моделирования;

определение конечной интенсифицирующей обработки на основе одной из перспективных интенсифицирующих обработок и прогнозируемой проводимости по флюиду; и

закачку кислотной жидкости в пласт в соответствии с конечной интенсифицирующей обработкой.

2. Способ по п. 1, в котором каждая перспективная интенсифицирующая обработка включает множество этапов, каждый из которых имеет определенную продолжительность, скорость закачки, тип кислоты и ее концентрацию, а также тип проппанта и его концентрацию.

3. Способ по п. 1, в котором моделирование развития трещины основано на перспективной интенсифицирующей обработке, характеристиках пласта и давлении закачанной кислотной жидкости.

4. Способ по п. 1, в котором моделирование развития трещины включает расчет размера трещины для каждой из ячеек сетки.

5. Способ по п. 1, в котором моделирование переноса закачанной кислотной жидкости включает применение метода «частица в ячейке» в отношении ячеек сетки.

6. Способ по п. 5, дополнительно включающий для каждой из перспективных интенсифицирующих обработок моделирование переноса проппанта через трещину с помощью метода «частица в ячейке».

7. Способ по п. 6, дополнительно включающий для каждой из перспективных интенсифицирующих обработок моделирование уплотнения породы в пласте вокруг проппанта.

8. Способ по п. 1, в котором моделирование уплотнения породы включает расчет сжатия породных целиков в каждой из множества ячеек сетки.

9. Способ по п. 1, дополнительно включающий для каждой из перспективных интенсифицирующих обработок моделирование расхода кислоты в результате травления породы.

10. Способ по п. 1, в котором моделирование переноса включает сохранение записей данных, относящихся к блокам жидкости.

11. Способ по п. 10, в котором моделирование переноса включает отслеживание положений блоков жидкости в блоках ячеек сетки на множестве временных этапов.

12. Способ по п. 10, дополнительно включающий для каждой из перспективных интенсифицирующих обработок отслеживание потребленной части кислоты в записях данных, соответствующих блокам жидкости.

13. Система для кислотной интенсификации добычи флюида из скважины в пласте, содержащая:

множество датчиков для измерения характеристик пласта;

вычислительное устройство, содержащее процессор и машиночитаемое запоминающее устройство;

машиночитаемые команды, хранящиеся в машиночитаемом запоминающем устройстве, для моделирования множества перспективных интенсифицирующих обработок, включающих закачку кислотной жидкости, содержащие:

модель развития трещины для моделирования развития трещины, вызванного закачкой жидкости под давлением в пласт, посредством определения ячеек сетки, представляющих трещину;

модель переноса, для моделирования переноса закачанной кислотной жидкости через пласт посредством отслеживания перемещения блоков кислотной жидкости между блоками ячеек сетки;

модель травления, для моделирования травления породы в трещине с получением представления вытравленной трещины, содержащей множество породных целиков, обусловленных неоднородным травлением в ячейках сетки;

модель прогиба породы для моделирования уплотнения породы в пласте на основе размера вытравленной трещины для каждой из ячеек сетки с получением размера уплотненной трещины, связанной с каждой из ячеек сетки;

команды для оценки прогнозируемой проводимости по флюиду, связанной с каждой из перспективных интенсифицирующих обработок, на основе моделирования; причем одну из перспективных интенсифицирующих обработок определяют как конечную интенсифицирующую обработку в результате соответствия прогнозируемой проводимости по флюиду критерию производительности.

14. Система по п. 13, в которой каждая перспективная интенсифицирующая обработка включает множество этапов, каждый из которых имеет определенную продолжительность, скорость закачки, тип кислоты и ее концентрацию, а также тип проппанта и его концентрацию.

15. Система по п. 13, в которой моделирование развития трещины включает определение модели пласта на основе результатов измерений, полученных от множества датчиков.

16. Система по п. 13, в которой модель прогиба породы включает команды для моделирования прогиба породы вокруг проппанта.

17. Система по п. 13, в которой моделирование уплотнения породы включает расчет сжатия породного целика в каждой из множества ячеек сетки.

18. Система по п. 13, в которой моделирование травления включает моделирование расхода кислоты в результате травления породы.

19. Система по п. 13, в которой моделирование переноса включает метод «частица в ячейке».

20. Способ по п. 13, в котором моделирование расхода кислоты при травлении включает сохранение записей данных, соответствующих блокам кислотной жидкости, причем записи данных включают долю израсходованной кислоты.

21. Способ по п. 13, в котором моделирование переноса включает отслеживание положений блоков жидкости в блоках ячеек сетки на множестве временных этапов.

22. Способ кислотной интенсификации добычи флюида из скважины в пласте, включающий:

получение результатов измерения характеристик пласта;

определение множества перспективных интенсифицирующих обработок, включающих закачку суспензии, содержащей кислотную жидкость и проппант;

для каждой из множества перспективных интенсифицирующих обработок:

на основе измерений, моделирование развития трещины и переноса суспензии флюид-проппант в пласте с помощью метода «частица в ячейке»;

моделирование травления породы в трещине с получением модели вытравленной трещины, содержащей множество породных целиков, представляющих неоднородное травление в ячейках сетки;

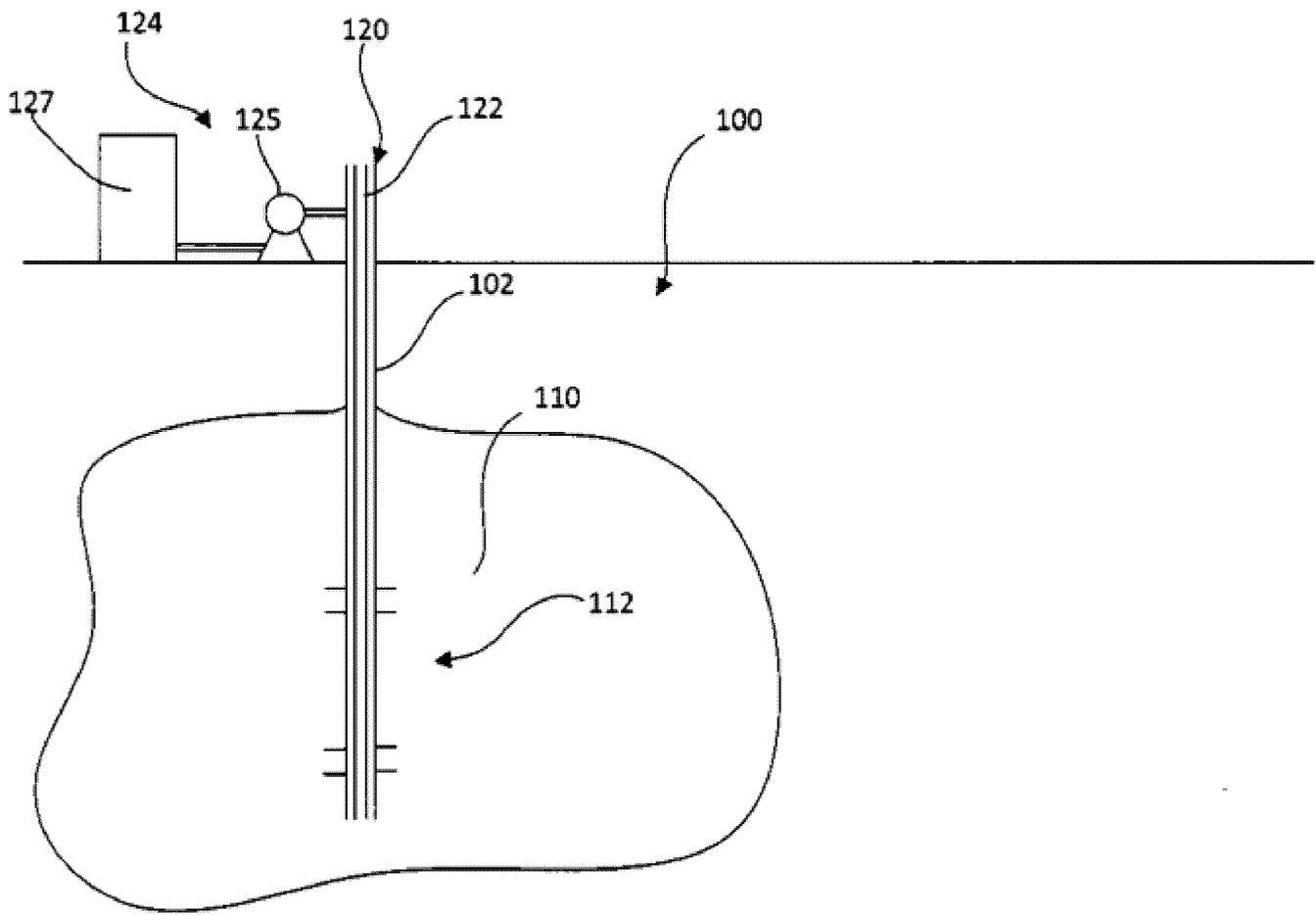
моделирование уплотнения породы в пласте на основе размера вытравленной трещины для каждой из ячеек сетки с получением размера уплотненной трещины, связанной с каждой из ячеек сетки; и

расчет прогнозируемой проводимости по флюиду, связанной с перспективной интенсифицирующей обработкой, на основе моделирования;

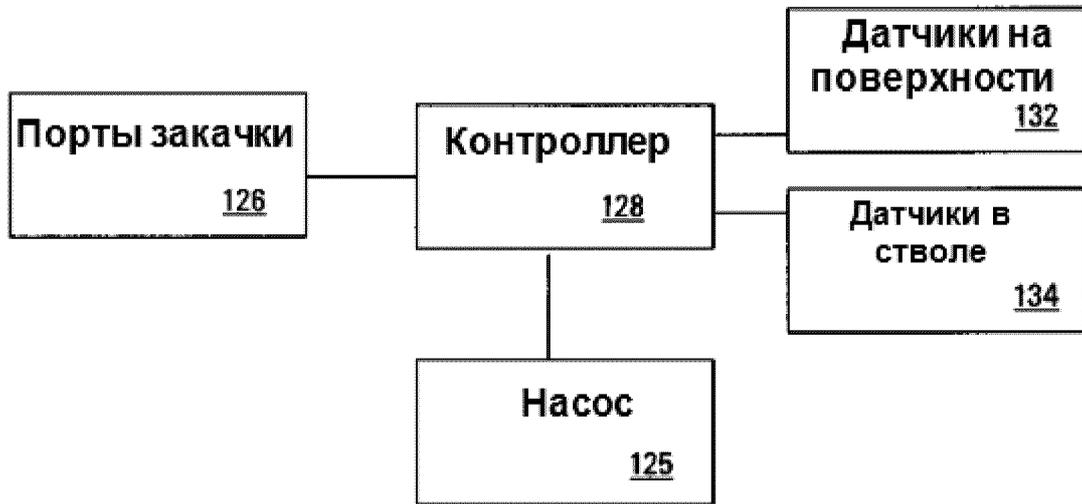
определение конечной интенсифицирующей обработки на основе одной из перспективных интенсифицирующих обработок и прогнозируемой проводимости по флюиду; и

закачка кислотной жидкости с проппантом в пласт в соответствии с конечной интенсифицирующей обработкой.

По доверенности



Фиг. 1



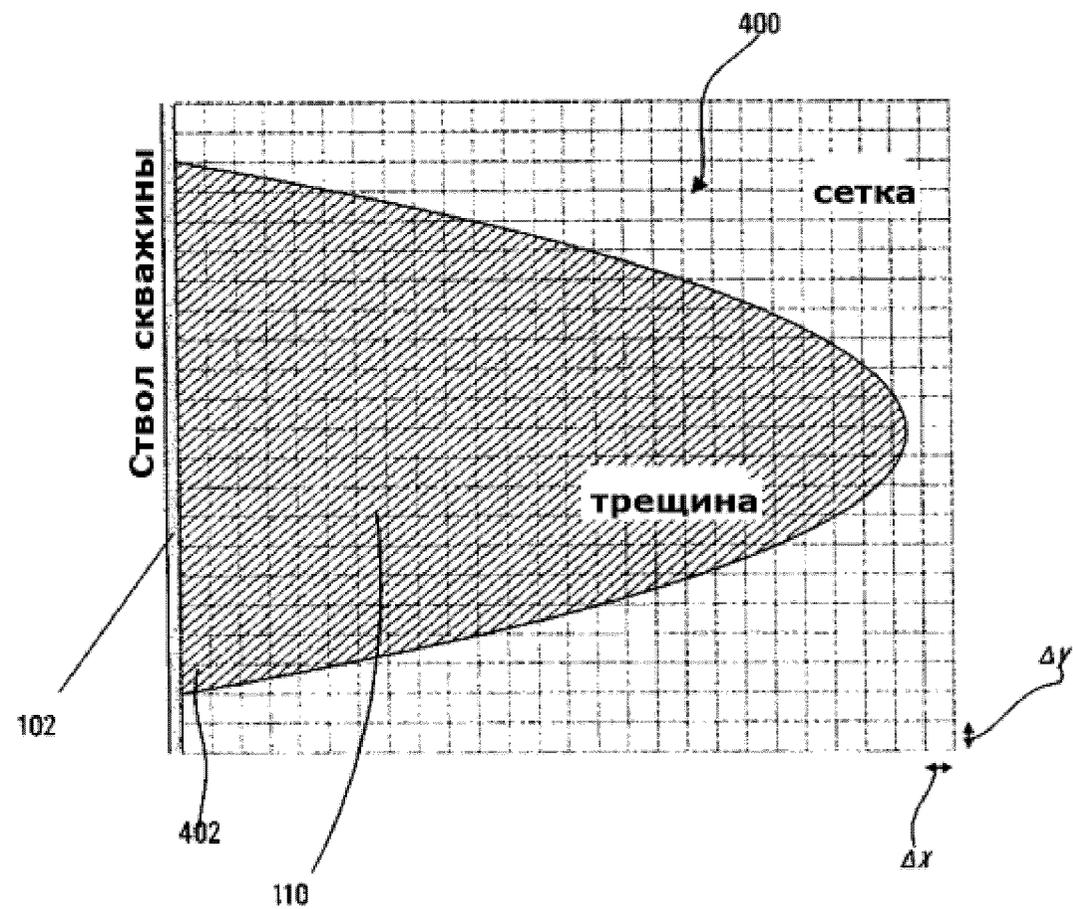
Фиг. 2А



Фиг. 2В

<b>Модель трещины</b> <u>310</u>
<b>Модель размещения</b> <u>320</u>
<b>Модель проводимости</b> <u>330</u>

**Фиг. 3**



Фиг. 4

<b>Записи частиц</b>
<u>406</u>
<b>Поле скоростей</b>
<u>408</u>

**Фиг. 5**

406

	412-1	414-1	416-1
ID частицы	Объем	Тип материала	Израсходованная кислота 1
410-1	1	1	0
410-2	2	2	0
410-3	3	3	0

412-2 412-3 414-2 414-3 416-2 416-3

Фиг. 6А

	412-1	414-1	416-1
ID частицы	Объем	Тип материала	Израсходованная кислота
410-1	1	1	0
410-2	2	2	0.05
410-3	3	3	0

412-2 412-3 414-2 414-3 416-2 416-3

Фиг. 6В

420

426

428

430

432

434

422

424

ID ячейки	ID частицы	Объем частицы	Объем ячейки	Скорость X	Скорость Y
1	1	1	3	1	0.1
	2	1			
	3	1			

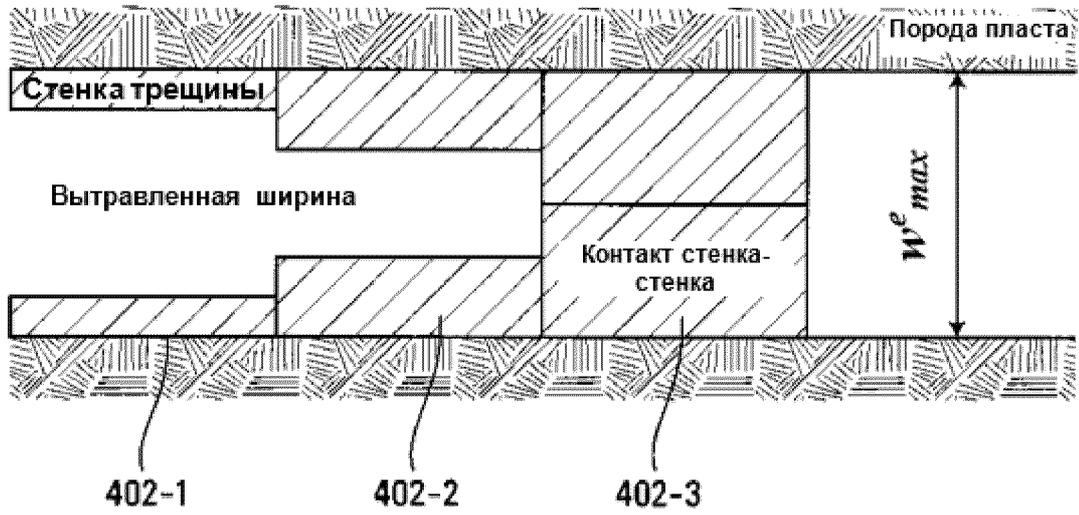
Фиг. 7

330

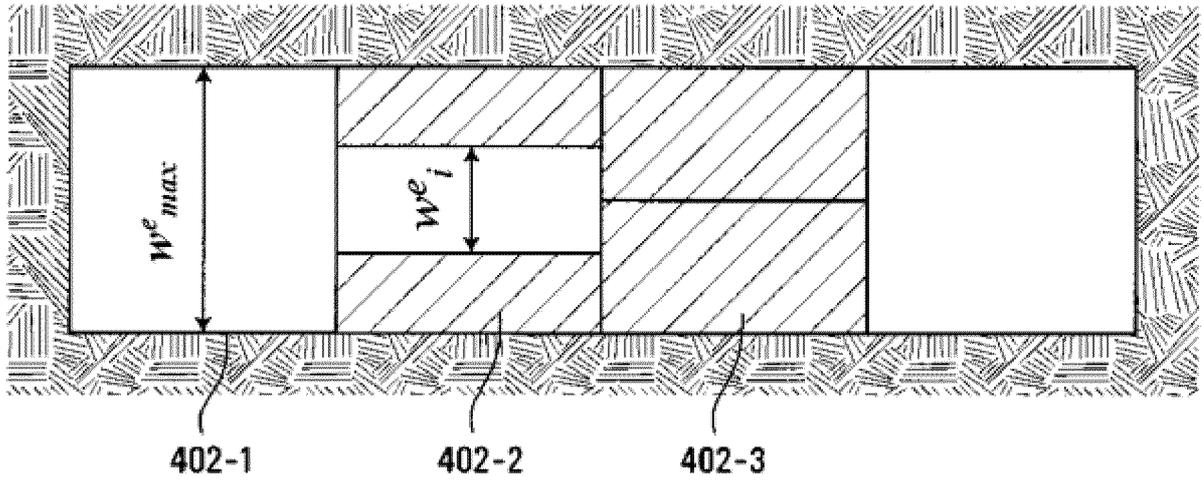


Расклиненная трещина <u>440</u>
Травление <u>450</u>
Израсходованная кислота <u>470</u>
Прогиб породы <u>460</u>

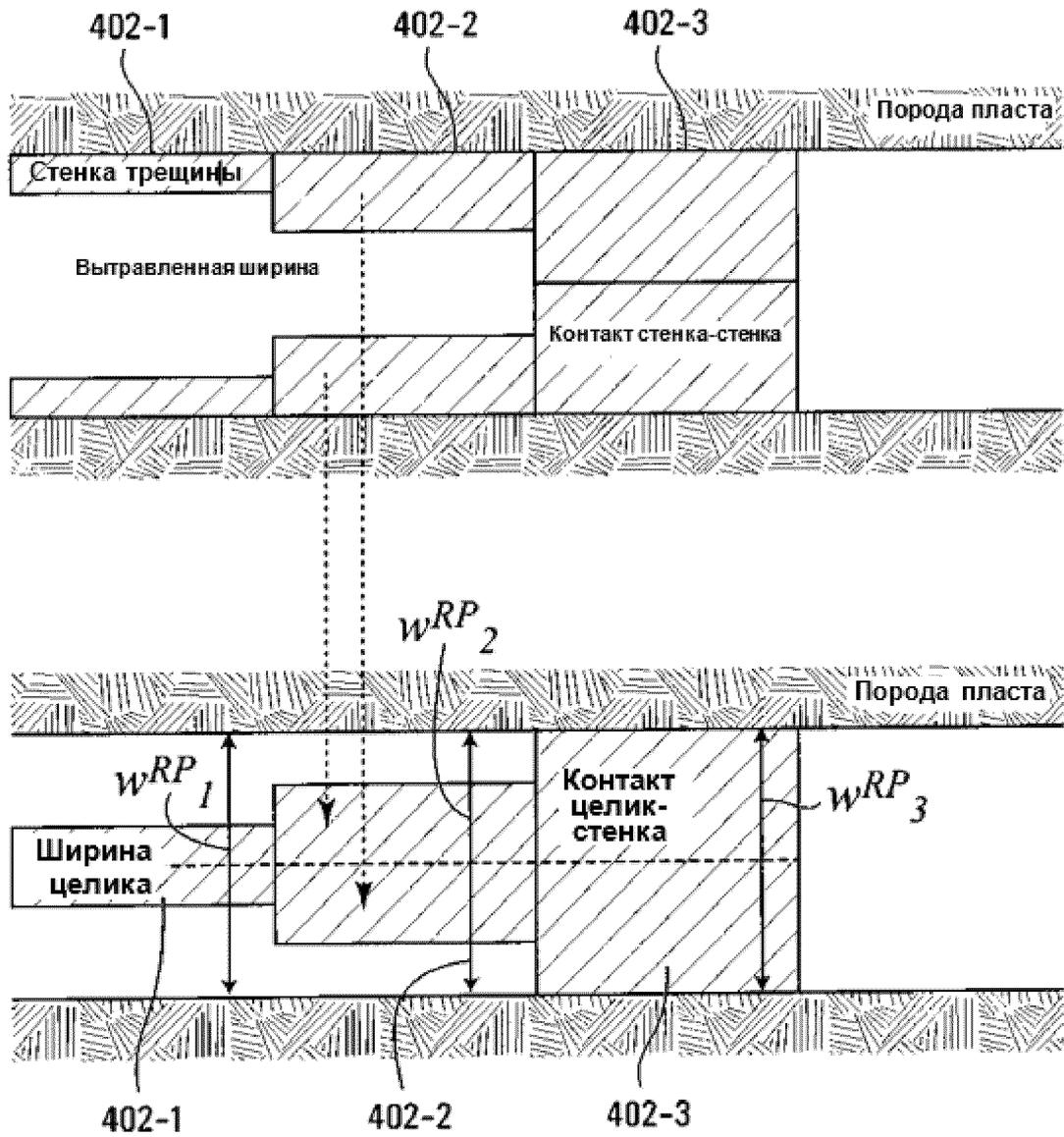
Фиг. 8



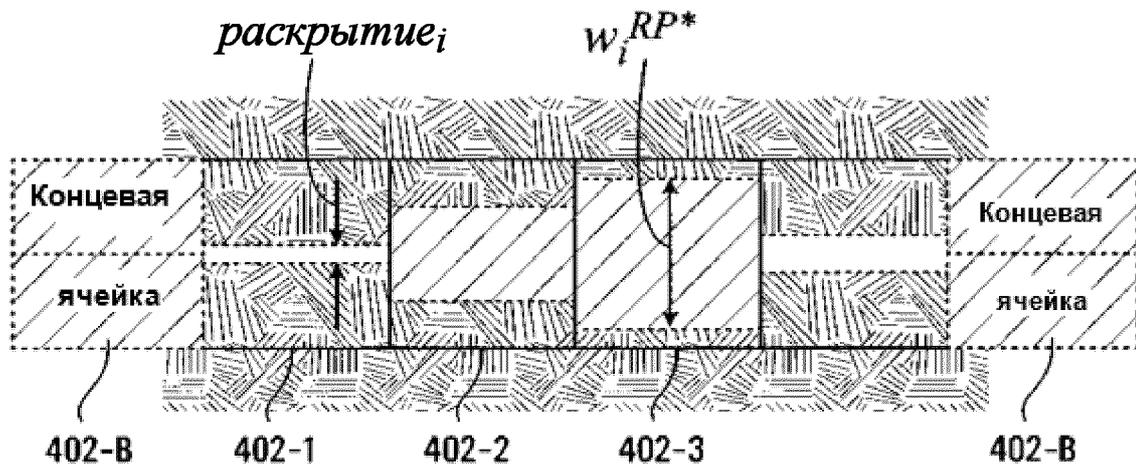
Фиг. 9



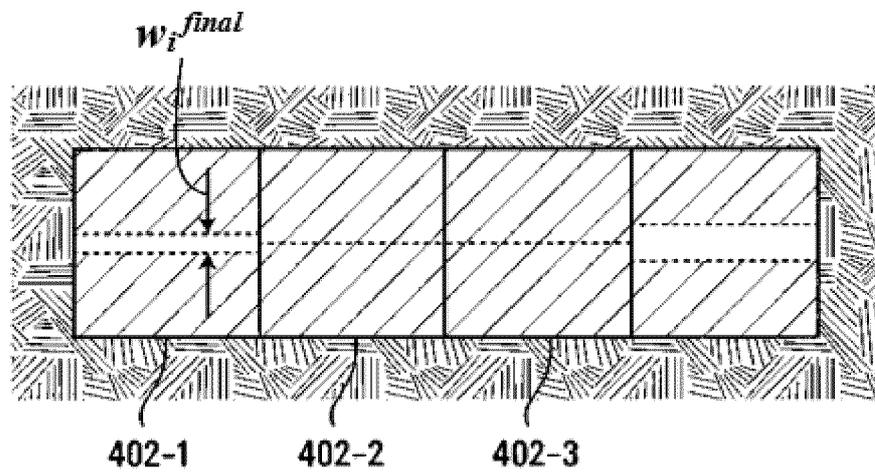
Фиг. 10



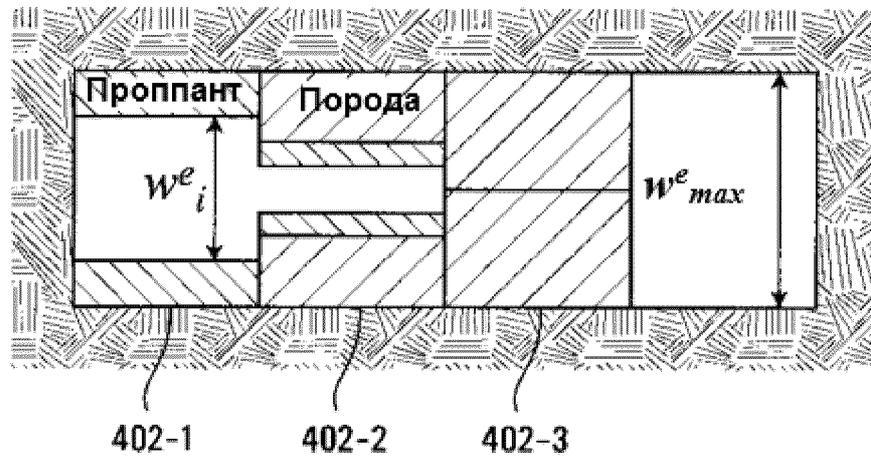
Фиг. 11



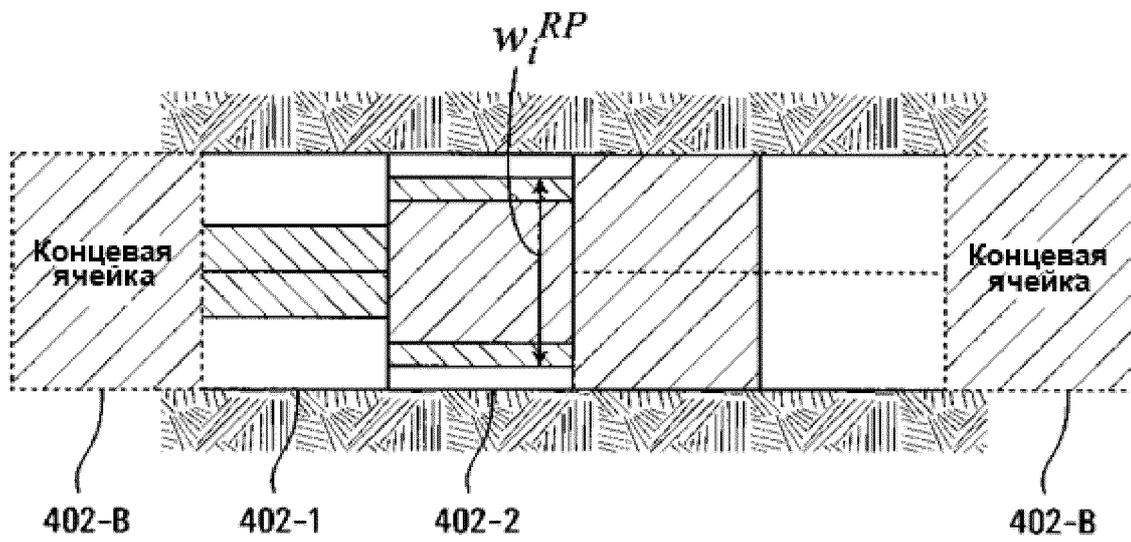
Фиг. 12



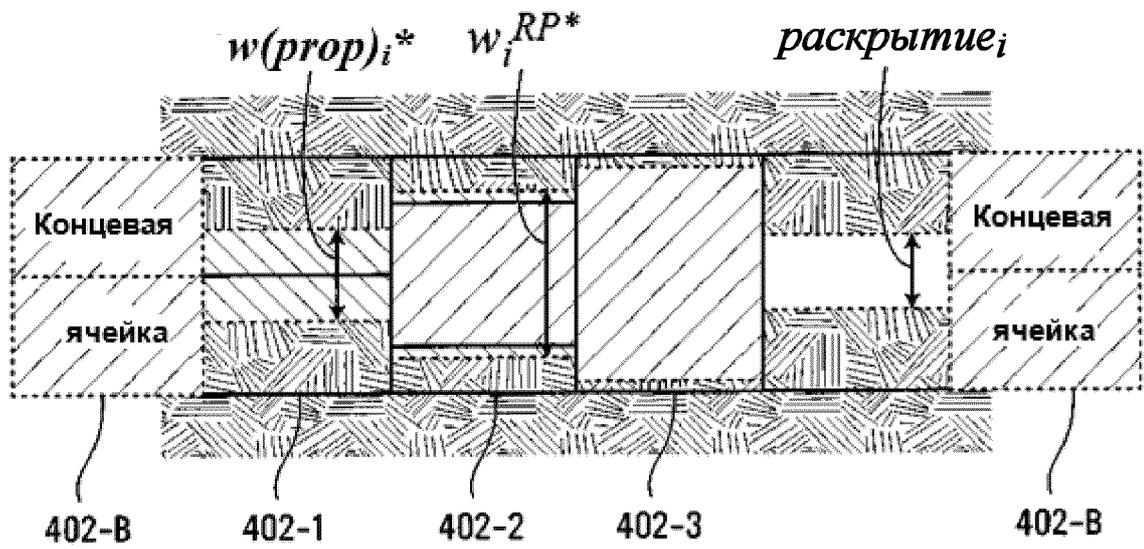
Фиг. 13



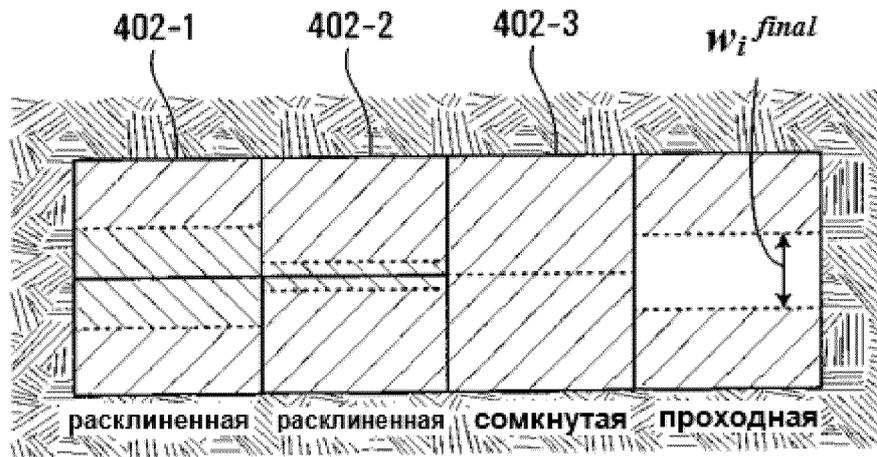
Фиг. 14



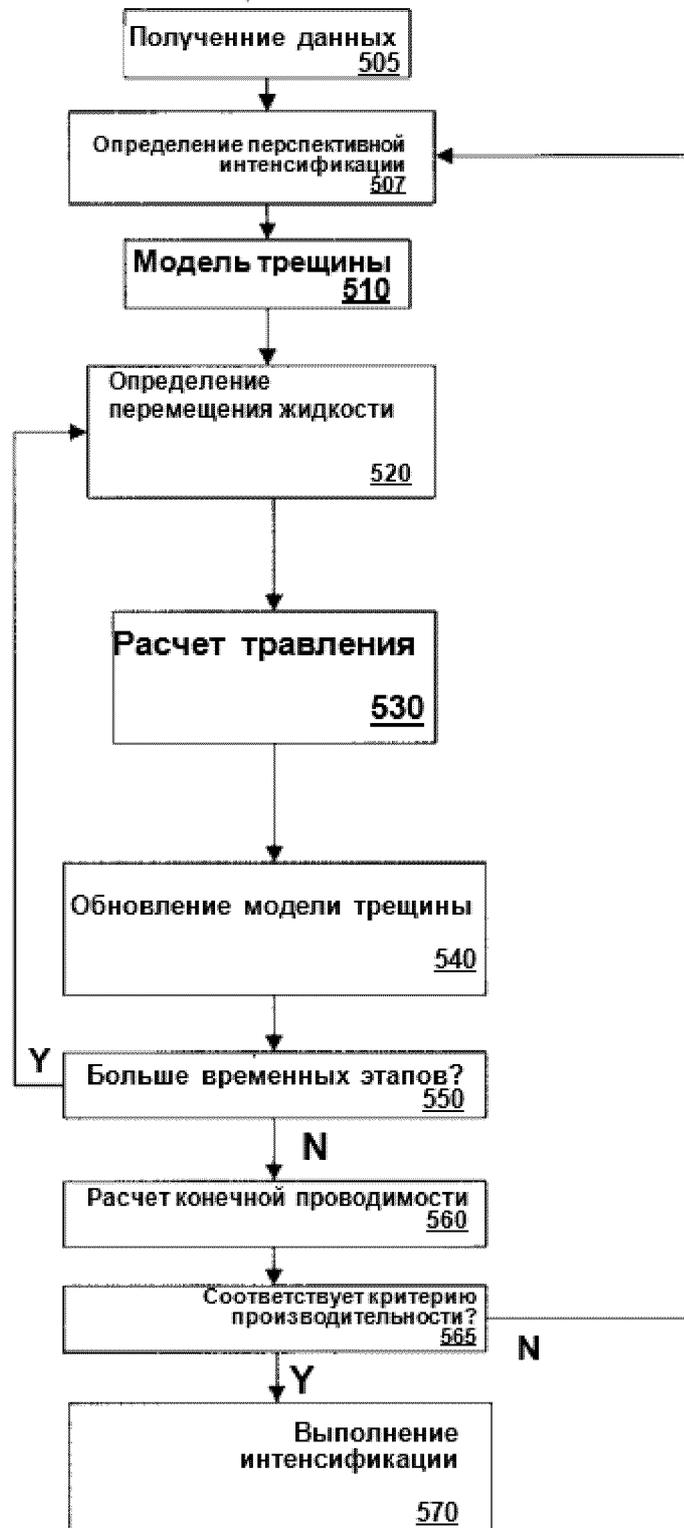
Фиг. 15



Фиг. 16



Фиг. 17



Фиг. 18