

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(21) **202191530** (13) **A1**

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

(43) Дата публикации заявки  
**2021.09.01**

(51) Int. Cl. *E21B 43/26* (2006.01)  
*E21B 47/14* (2006.01)  
*G01V 1/50* (2006.01)  
*G06F 17/50* (2006.01)

(22) Дата подачи заявки  
**2018.12.06**

(54) **ОБРАБОТКА ПЛАСТА МЕТОДОМ МНОГОСТАДИЙНОГО ГИДРОРАЗРЫВА С  
КОРРЕКТИРОВКОЙ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

(86) PCT/RU2018/000787

(72) Изобретатель:

(87) WO 2020/117085 2020.06.11

**Банников Денис Викторович,**

(71) Заявитель:

**Цыгулев Иван Анатольевич,**

**ШЛЮМБЕРГЕР ТЕКНОЛОДЖИ Б.В.**

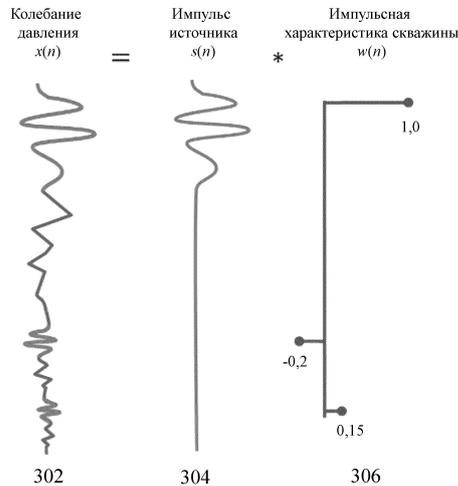
**Великанов Иван Владимирович (RU)**

(NL)

(74) Представитель:

**Медведев В.Н. (RU)**

(57) Способы содержат проектирование и осуществление операций по обработке пласта методом гидроразрыва, причем используют анализ трубных волн путем комбинации симулятора разделения расхода и симулятора многостадийного гидроразрыва пласта (МГРП), чтобы оптимизировать параметры проекта операции. Способы также направлены на мониторинг, контроль, оценку и улучшение операций по обработке пласта методом гидроразрыва в режиме реального времени.



**202191530**

**A1**

**A1**

**202191530**

## ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

2420-569296EA/022

### ОБРАБОТКА ПЛАСТА МЕТОДОМ МНОГОСТАДИЙНОГО ГИДРОРАЗРЫВА С КОРРЕКТИРОВКОЙ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ОБЛАСТЬ ТЕХНИКИ

Гидравлический разрыв (далее, Гидроразрыв) пласта является способом интенсификации притока в скважину путем создания трещин внутри содержащего углеводороды пласта закачкой в него жидкости под давлением, превышающим давление разрыва пласта. Для стимуляции в трещину вместе с жидкостью также доставляется расклинивающий агент, который предотвращает смыкание трещины после сброса давления в конце обработки. После обработки и ввода скважины в эксплуатацию углеводороды вытекают из пласта в ствол скважины через образовавшиеся трещины. Главной целью гидроразрыва является повышение продуктивности скважины.

Для нетрадиционных ресурсов, таких как сланцевый газ или сланцевая нефть, требуются масштабные многостадийные операции по гидроразрыву пласта в горизонтальных скважинах. Такой способ гидроразрыва позволяет максимально увеличить охват ствола скважины и контакт с продуктивным пластом. Работы по гидроразрыву могут проектироваться на основе данных о продуктивном пласте, объеме подлежащих закачке расклинивающего агента и кислоты, целевом коэффициенте продуктивности скважины и т.д. Однако неопределенности в характеристике продуктивного пласта могут осложнить процесс проектирования и эффективного выполнения работ по гидроразрыву пласта, направленный на максимальное увеличение общего количества углеводородов, извлекаемых из данного коллектора.

#### КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ СУЩНОСТИ

В данном кратком описании сущности содержится выбор концепций, которые подробно описаны ниже. Данное описание не предназначено ни для определения ключевых или существенных признаков заявленного объекта изобретения, ни для использования в качестве вспомогательного средства, ограничивающего объем заявленного объекта изобретения.

В одном аспекте варианты осуществления, описанные в настоящем документе, относятся к способам обработки подземного пласта, которые содержат: (1) выбор ствола скважины для обработки пласта методом многостадийного гидроразрыва, разработку первоначального проекта работ по обработке пласта методом многостадийного гидроразрыва, определение одного или более критериев оценки работы по гидроразрыву и разработку модели распространения трубных волн в стволе скважины на основе первоначального проекта работ по гидроразрыву; (2) начало выполнения части первоначального проекта работ; (3) обеспечение одной или более трубных волн в стволе скважины и мониторинг одного или более отражений одной или более трубных волн и расчет числа раскрытых трещин и параметров геометрии трещин в соответствии с моделью распространения трубных волн; (4) выполнение в режиме реального времени

оценки параметров геометрии трещин путем расчета одного или более значений расхода при закачке в ряд раскрытых трещин и моделирования процесса гидроразрыва для ряда раскрытых трещин с использованием симулятора многостадийного гидроразрыва пласта; (5) корректировку симулятора многостадийного гидроразрыва пласта до тех пор, пока ряд раскрытых трещин, одно или более значений расхода при закачке и параметры геометрии трещин со стадии (3) не совпадут с оценкой в режиме реального времени параметров геометрии трещин со стадии (4), для обеспечения откорректированного симулятора гидроразрыва пласта; (6) расчет параметров геометрии трещин с использованием откорректированного симулятора гидроразрыва пласта для разработки основанного на результатах измерений (контролируемого в режиме реального времени) уточненного проекта работ. Затем (7) расчет разницы между первоначальным проектом работ и уточненным проектом работ, основанным на результатах измерений; и (8) выполнение одного из следующего: проверяют, чтобы полученная на стадии (7) разница была ниже предписанной вариации для одного или более критериев оценки работы по гидроразрыву пласта, и продолжают действовать согласно первоначальному проекту работ; или уточняют первоначальный проект работ и повторяют стадии (6) и (7) до тех пор, пока полученная на стадии (7) разница не станет ниже предписанной вариации для одного или более критериев оценки работы по гидроразрыву, и продолжают действовать согласно уточненному варианту первоначального проекта работ; и (9) повторение стадий (3)-(8) до завершения обработки пласта методом многостадийного гидроразрыва. Указанные варианты реализации позволяют изменять проект работ с выполнением основных критериев оценки этих работ без остановки операции гидроразрыва пласта.

Другие аспекты заявленного объекта изобретения пояснены из следующего описания и прилагаемой формулы изобретения.

#### КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

На ФИГ.1 приведена блок-схема, показывающая операцию гидроразрыва пласта в соответствии с вариантами осуществления изобретения.

На ФИГ.2 приведена схема, показывающая обнаружение трещин в стволе скважины по распространению трубной волны в соответствии с вариантами осуществления изобретения.

На ФИГ.3 приведена графическая иллюстрация деконволюции колебаний давления трубной волны в соответствии с вариантами осуществления изобретения.

На ФИГ.4 приведена схема, иллюстрирующая теоретическую основу для расчета разделения расхода закачки в набор раскрытых трещин в соответствии с вариантами осуществления изобретения.

На ФИГ.5 приведена схема, показывающая пример компьютеризованной системы для реализации способов в соответствии с изобретением.

На ФИГ.6 приведена графическая иллюстрация изменения в операции гидроразрыва пласта в режиме реального времени в соответствии с вариантами осуществления изобретения.

На ФИГ.7 приведена графическая иллюстрация изменения в операции гидроразрыва пласта в режиме реального времени в соответствии с вариантами осуществления изобретения.

#### ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ

В одном аспекте варианты осуществления, описанные в настоящем документе, относятся к способам проектирования и выполнения операций по обработке пласта методом гидроразрыва, в которых используется анализ трубных волн путем комбинации симулятора разделения расхода и симулятора многостадийного гидроразрыва пласта (МГРП), чтобы оптимизировать параметры проекта операции. В контексте настоящего документа «трубная волна» является периодическим колебанием давления, в процессе которого чередующееся сжатие и разрежение распространяют через среду или по поверхности среды без переноса материала; она известна также как волна Стоунли. В одном или более вариантах осуществления способы могут быть направлены на мониторинг, контроль, оценку и улучшение операций по обработке пласта методом гидроразрыва в режиме реального времени. В некоторых вариантах осуществления способы могут содержать также выполнение одного или более корректирующих действий для изменения проекта работ в режиме реального времени.

По мере развития методик моделирования, программного и аппаратно-технического обеспечения возможность для оптимизации проектов до начала работ и в режиме реального времени становится более реализуемой. Одним из экономически эффективных способов гидроразрыва пласта является многостадийный гидроразрыв пласта, при котором можно создавать множественные трещины в ходе одной стадии закачки. Проект гидроразрывов пласта может включать реализацию симуляторов многостадийного гидроразрыва пласта для моделирования множественных трещин в режиме реального времени, что может включать также алгоритмы для моделирования разделения расхода между трещинами. Однако такие подходы часто основаны на каротажных диаграммах и других первичных измерениях, регистрируемых при установке приборов в стволе скважины. Использование первичных данных приводит к неприемлемо высокому уровню неопределенности измерений, что может ограничить надежность прогнозирования раскрытого или закрытого состояния трещин по мере разделения закачанных жидкостей и их перераспределения внутри ствола скважины. Как следствие, проекты работ могут потребовать корректирующих мер для регулирования таких аспектов, как размещение расклинивающих агентов и других материалов в трещинах, которые ухудшают проницаемость и скорость дебита углеводородов.

Применяемые в соответствии с изобретением способы можно использовать для проектирования гидроразрыва пласта с возможным привлечением численных моделей гидроразрыва и кислотной обработки пласта, которые могут способствовать размещению расклинивающего агента без концевое экранирование (или бриджинга расклинивающего агента) и получению желаемой геометрии и проводимости для трещин и (или) каналов. В одном или более вариантах осуществления в способах можно использовать анализ

трубных волн в сочетании с симулятором разделения расхода и симулятором МГРП для выработки малозатратного беспроводного подхода к обнаружению раскрытого/закрытого состояния трещин, которое можно осуществлять периодически или в режиме реального времени в процессе операции гидроразрыва пласта. В некоторых вариантах осуществления анализ трубных волн может включать мониторинг в режиме реального времени трубных волн, отраженных в процессе многостадийного гидроразрыва пласта.

Трубные волны представляют собой граничные волны, которые возникают в обсаженных скважинах, когда волна Рэлея сталкивается со стволом скважины и вызывает возмущение жидкости в стволе скважины. Трубная волна проходит вниз по стволу скважины по границе раздела между жидкостью в стволе скважины и стенкой скважины. Поскольку трубная волна связана с пластом, сквозь который она проходит, она может вызывать возмущения в пласте через раскрытые трещины, пересекающие ствол скважины, с обеспечением эффекта сжатия, который обеспечивает вторичные трубные волны, которые отражаются вверх и вниз от места расположения трещины. Перехваченные вторичные трубные волны могут содержать сигнатуры, позволяющие идентифицировать раскрытые трещины, а также амплитуду, качественно связанную с длиной и шириной, например, объем заполненного жидкостью пространства трещины, в дополнение к другим характеристикам, таким как давление смыкания трещины, давление инициирования трещины и т.п. Трубные волны также можно использовать для обнаружения других объектов, таких как препятствия, участки труб различных диаметров, перфорации и раскрытые трещины.

На практике вторичные трубные волны можно восстановить из деконволюции первичных трубных волн путем определения времени прихода и пиковых значений. Это время и величина изменяются предсказуемым образом, и это изменение можно проанализировать в зависимости от глубины. Для извлечения данных из трубных волн для отделения положений множественных трещин от ствола скважины также можно использовать передовые алгоритмы для обработки трубных волн (например, кепстральный анализ) вместе с механизмами контроля источника давления, включая шум насоса, активные источники импульсов и т.п. Примеры анализа трубных волн подробнее описаны в патенте США № 4831600.

В одном или более вариантах осуществления способы могут включать использование симулятора разделения расхода для определения количества закачанной суспензии, поступающей в каждую трещину в процессе операции гидроразрыва пласта, и симулятора многостадийного гидроразрыва пласта для определения параметров образовавшихся трещин. В некоторых вариантах осуществления способы позволяют также осуществлять калибровку параметров численной модели для повышения уровня соответствия смоделированных и собранных при измерении данных, полученных при анализе в реальном времени трубных волн для оптимизации стимулирования ствола скважины, включая данные для стволов скважин с несколькими кластерами перфорации.

Оптимизация проекта многостадийного гидроразрыва пласта.

Операции по многостадийному гидроразрыву пласта в соответствии с изобретением содержат следующие общие стадии: выбор потенциального варианта для обработки пласта методом многостадийного гидроразрыва, сбор относящихся к обработке данных и создание первоначального проекта работ, который можно повторно калибровать по результатам сбора данных в режиме реального времени. На ФИГ.1 представлена блок-схема, иллюстрирующая оптимизацию проекта многостадийного гидроразрыва пласта. В соответствии со способом, начиная со стадии 102, выбирают ствол скважины или пласт для обработки пласта методом гидроразрыва, собирают относящиеся к операции данные, создают первоначальный проект работ, устанавливают начальный критерий для выполнения работ и на основе первоначального проекта работ создают модель распространения трубных волн в стволе скважины.

Собранные относящиеся к операции данные могут включать минералогические сведения, профили напряжений, модуль Юнга и утечку в пласт для каждого изучаемого пласта. Первоначальный проект работ по гидроразрыву пласта может включать стандартные параметры для гидроразрыва пласта, такие как состав жидкостей, тип чистой жидкости гидроразрыва, доли чистой жидкости, программы изменения содержания расклинивающего агента, скорости закачки, рекомендованные давления разрыва, типы оборудования, изоляция зон (при необходимости) и т.п.

В соответствии с первоначальным проектом работ «частично» работу выполняют путем осуществления одной стадии обработки пласта методом гидроразрыва на стадии 104, при этом за выполнением работы в стволе скважины ведется мониторинг с помощью анализа трубных волн на стадии 106. Анализ трубных волн на стадии 106 включает обеспечение одной или более трубных волн в стволе скважины, мониторинг одного или более отражений одной или более трубных волн и расчет числа раскрытых трещин и параметров геометрии трещин на основе модели распространения трубных волн.

На стадии 108 оптимизация начинается с мониторинга в режиме реального времени отражений трубных волн, чтобы определить глубину и (или) число раскрытых трещин у ствола скважины, в дополнение к сопутствующим скоростям закачки в трещины. По мере мониторинга трещин также осуществляют мониторинг данных с использованием одного или более алгоритмов, которые в режиме реального времени оценивают распределение скорости закачки между раскрытыми трещинами совместно с симулятором многостадийного гидроразрыва пласта для определения параметров соответствующих трещин. Полученные на стадии 108 параметры трещин анализируют на стадии 110, чтобы определить, имеется ли погрешность между наблюдаемыми на стадии 106 трубными волнами и результатами симулятора гидроразрыва со стадии 108. Если уровень погрешности между данными мониторинга и симулятора гидроразрыва пласта является неприемлемым, симулятор калибруют путем корректировки относящихся к операции данных и параметров симулятора гидроразрыва пласта на стадии 112.

После калибровки симулятора гидроразрыва пласта способ переходит на стадию 114, где вариацию измеренных данных для критерия оценки работы сравнивают с

критерием оценки работы, установленным в первоначальном проекте работ. В одном или более вариантах осуществления критерий оценки работы для обработки пласта методом многостадийного гидроразрыва может включать заданное число трещин для данной скважины или данного интервала, процентное отношение введенного расклинивающего агента, значения длины трещин, значения скорости закачки и т.п.

На стадии 116 в зависимости от степени вариации между основанным на результатах измерений проектом работ и первоначальным проектом работ параметры работ могут изменяться путем корректировки числа таких переменных, как расход при закачке, концентрация расклинивающего агента, размерность расклинивающего агента, волокнистые добавки, тип жидкости, количество жидкостных добавок и т.п., чтобы уменьшить вариацию соответствующего критерия оценки работы.

После того как первоначальный критерий оценки работы удовлетворен, способ переходит на стадию 120, где продолжают план закачки для целевой скважины или скважин и продолжают анализ трубных волн на стадии 106 или, если план закачки выполнен, работу завершают и осуществляют переход к следующим стадиям жизни скважины.

Хотя способы оптимизации вкратце показаны выше, в следующих разделах представлено более подробное описание каждой из стадий.

Мониторинг отражения трубных волн в стволе скважины

Способы в соответствии с изобретением включают мониторинг в режиме реального времени возникающих в стволе скважины отражений трубных волн, чтобы определить глубину и число раскрытых трещин, способных принять жидкость для обработки. В некоторых вариантах осуществления мониторинг отраженных трубных волн выполняется одним или более распределенными датчиками давления, установленными в стволе скважины.

На ФИГ.2 показано определение состояния трещины с помощью анализа трубных волн для идеализированной обсаженной скважины 202, обработанной методом многостадийного гидроразрыва пласта. Анализ трубных волн выполняют моделированием потока суспензии в ствол скважины и расчетом распределения ее расхода между одной или более трещинами. Для расчета параметров трещин можно использовать петрофизические модели путем ввода данных, измеренных по отражениям трубных волн внутри ствола скважины, и использования известных физических связей между геологическими свойствами, значениями расхода, составом закачанной жидкости и предполагаемыми изменениями давления, чтобы предоставить информацию о местонахождении, числе, длине и проницаемости трещин в пределах указанного интервала ствола скважины. Петрофизические модели, которые можно использовать для выполнения анализа трубных волн, включают такие модели, которые представлены в патенте США № 9658357 и т.п. Способ измерений включает определение местонахождений микросейсмических событий, обеспечение низкочастотных волн давления (трубных волн) вблизи ствола скважины, регистрацию отражений трубных волн

от трещин в режиме реального времени и анализ местонахождений микросейсмических событий и отражений трубных волн от трещин. В патенте США № 9103203 описано использование трубных волн (акустического возмущения) для оценки свойства заполненной жидкостью системы ствола скважины. Это осуществляется путем регистрации данных, включая по меньшей мере одно значение давления и расхода в одном или более местах в системе ствола скважины, и затем расчета значения свойства с помощью модели для прогнозирования по меньшей мере одного значения давления и расхода в зависимости от характеристик и мест колебаний давления и расхода в системе ствола скважины, чтобы определить оптимальный прогноз какого-либо атрибута зарегистрированных данных.

В процессе анализа трубных волн источник 204 импульсов генерирует импульс давления  $s(t)$  как непрерывную зависимость от времени  $t$ , который пересекает ствол скважины, содержащий несколько трещин 206. Трещины 206 имеют иные значения гидравлического сопротивления по сравнению с окружающими средами и служат скважинными отражателями, а импульс давления  $s(t)$  порождает трубную волну, которая распространяется вдоль ствола скважины со скоростью трубной волны  $V_{TW}$ . Распределение скоростей трубных волн в стволе скважины в целом неизвестно и зависит от ряда специфических факторов данной скважины, включая геометрию ствола скважины, упругие свойства пласта, упругие свойства и плотность любых присутствующих жидкостей.

Каждый раз, когда импульс трубной волны достигает трещины 206, ее часть отражается, а часть распространяется через трещину. Давление на устье скважины можно получить в виде дискретного сигнала  $x(n)$  расположенным на поверхности манометром, где  $n$  является объемом выборки. Анализ сигнала давления на поверхности  $x(n)$  позволяет определить значения глубины раскрытых трещин. На ФИГ.2 конкретно показан пример изменения импульса на измеренной глубине в зависимости от времени. Можно использовать методы анализа для сужения пиков внутри данных (процесс, известный как деконволюция) и внесения поправок в дисперсию (например, Q-фильтрация), чтобы способствовать выявлению трещин и других искажений. Пики 208 коррелируют с отражателями в стволе, в данном случае это трещины, на глубинах  $D_1$  и  $D_2$  относительно поверхности 210.

На следующей стадии обеспечивают модель конволюции для записи дискретного колебания давления  $x(n)$ . На ФИГ.3 конкретно показано, что модель  $x(n)$ , показанная на ФИГ.3 под номером 302, представлена как конволюция импульса источника  $s(t)$  304 и импульсной характеристики скважины  $w(n)$  306. В одном или более вариантах осуществления модель конволюции можно использовать для характеристики распространения трубных волн в стволе скважины, которую также можно использовать для расчета импульсной характеристики скважины  $w(n)$ . Импульсная характеристика скважины  $w(n)$  является неизвестным параметром в уравнении конволюции  $x(n) = s(n)*w(n)$ . Импульсная характеристика скважины  $w(n)$  является затухающей минимально-

фазовой последовательностью импульсов, задерживаемых временем прихода, тогда как их амплитуды зависят от соответствующих коэффициентов отражения и от ослабления волны в стволе скважины. Коэффициенты отражения определяют по изменениям сопротивления на границах отражения. Коэффициенты отражения являются отрицательными для гидравлических трещин и положительными для сужений ствола скважины.

В одном или более вариантах осуществления уравнение конволюции может решаться операцией деконволюции во временной области или спектральным разделением в частотной области. Значения глубины и типы соответствующих скважинных отражателей определяют по рассчитанной импульсной характеристике скважины и распределению скоростей трубных волн вдоль ствола скважины.

Сочетание анализа трубных волн с симулятором многостадийного гидроразрыва пласта в режиме реального времени

В одном или более вариантах осуществления в способах можно анализировать результаты измерений трубных волн в стволе скважины с использованием сочетания симулятора разделения расхода и симулятора МГРП для определения параметров выполняемой обработки методом гидроразрыва пласта. С помощью множественных измерений в процессе обработки гидроразрывом пласта можно изменять ход работ для учета вопросов, выявленных с помощью моделей разделения расхода и моделей МГРП. Таким образом, можно избежать применения корректирующих мер или свести это к минимуму и добиться максимального извлечения углеводородов.

Расчет распределения расхода с использованием модели разделения потока

В применяемых в соответствии с изобретением способах можно использовать модель разделения потока, чтобы определить распределение расхода для потока, поступающего в многостадийную сеть трещин. На ФИГ.4 показана теоретическая основа обработки многостадийным гидроразрывом пласта. Трещины в породе образуются вблизи перфорационных интервалов. Положения и общее число раскрытых трещин  $n$  определяют мониторингом трубных волн. Каждая трещина растет в зависимости от расхода закачиваемой в нее жидкости и свойств пласта вокруг нее. Общая скорость закачки  $Q$  разделяется на  $n$  трещин. Для закачки суспензии в пласт с поверхности прилагается давление  $P_{ref}$ .

В одном или более вариантах осуществления в алгоритмах расчета распределения расхода учитывают ряд эффектов, включая: (1) трение на обсадной колонне, (2) гидростатические силы, (3) перепад давления на перфорации и (4) наличие трещин. В некоторых вариантах осуществления могут добавляться любые другие источники падения давления.

Трение на обсадной колонне в стволе скважины  $\Delta P_{frict}$  задается уравнением 1, где  $c$  - коэффициент потерь давления на трение,  $Q$  - поток в стволе скважины,  $d$  - константа потерь давления на трение, а  $\Delta L$  - длина элемента ствола скважины.

$$\Delta P_{frict} = c \cdot Q^d \cdot \Delta L \quad (1)$$

Падение гидростатического давления  $\Delta P_{\text{hydr}, i}$  задается уравнением 2, где  $\rho_{\text{slurry}}$  - плотность используемой для обработки суспензии,  $g$  - ускорение свободного падения,  $\Delta z_i$  - разница высоты опорной точки А и  $i$ -того перфорационного интервала.

$$\Delta P_{\text{hydr}, i} = \rho_{\text{slurry}} \cdot g \cdot \Delta z_i \quad (2)$$

Перепад давления на перфорации задается уравнением 3, где  $q_i$  - поток в  $i$ -том перфорационном интервале,  $m_i$  - число перфорационных отверстий на  $i$ -том интервале,  $d_{\text{perf}}$  - диаметр перфорационных отверстий, а  $C_d$  - коэффициент перфорации (0,56 для первоначальной формы, 0,89 для окончательной формы).

$$\Delta P_{\text{perf}, i} = 0,81 \frac{q_i^2 \rho_{\text{slurry}}}{m_i^2 d_{\text{perf}}^4 C_d^2} \quad (3)$$

Алгоритм связывает аналитическую модель Перкинса - Керна - Нордгрена (РКН) для имеющей постоянную высоту трещины с набором уравнений, описывающих сохранение объема суспензии и постоянства давления. Эти уравнения обеспечивают связь между множественными трещинами через ствол скважины. Эффективное давление  $\Delta P_{\text{net}, i}$  соответствует трещине РКН для случая нулевых утечек в пласт, как показано в уравнении 4, где  $\nu$  - коэффициент Пуассона,  $\mu$  - вязкость жидкости,  $E$  - модуль Юнга,  $h$  - высота трещины,  $q_{\text{frac}}$  - поток жидкости в полукрыле трещины, как представлено в уравнении 5.

$$\Delta P_{\text{net}, i} = 2,5 \left( \frac{2(1-\nu^2)\mu q_{\text{frac}}^2}{Eh} t \right)^{1/5} \quad (4)$$

$$q_{\text{frac}} = \frac{q_i}{2} \quad (5)$$

Хотя в приведенном выше примере используется симулятор МГРП на основе модели трещины РКН, предусматривается, что для моделирования эффективного давления, создаваемого наличием трещины, можно использовать другие симуляторы МГРП, на основе таких моделей трещины, как Христиановича - Гиртсма - де Клерка (КГД), радиальная модель, псевдо-3D-модель, планарная 3D-модель, полная 3D-модель и т.п.

Предположением в этом алгоритме является отсутствие переноса жидкости между трещинами внутри пласта. Это предположение подразумевает, что трещины сообщаются через ствол скважины. Сохранение объема жидкости дает равенство, представленное в уравнении 6.

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i \quad (6)$$

Постоянство давления подразумевает, что сумма всех изменений давления равна контрольному давлению для любого пути, связывающего кончик  $i$ -той трещины с опорной точкой А на ФИГ.4, где  $P_{\text{closure}, i}$  - давление закрытия трещины в слое  $i$ .

$$P_{\text{ref}} = \sum_{k=1}^i \Delta P_{\text{frict}, k} + \Delta P_{\text{perf}, i} - \Delta P_{\text{hydr}, i} + \Delta P_{\text{net}, i} + P_{\text{closure}, i}, \quad i = 1, n \quad (7)$$

Решение системы нелинейных уравнений (5)-(6), где  $q_1, \dots, q_n, P_{ref}$  являются неизвестными величинами, находят методом Ньютона для нелинейной системы уравнений.

Модель разделения потока используют для расчета распределения расхода для каждой трещины, приобщенной к стволу скважины и затем дополнительно анализируют симулятором МГРП по ходу осуществления способа. В одном или более вариантах осуществления распределение расхода между множественными трещинами рассчитывают с помощью моделирования потока суспензии в ствол скважины в процессе оценки в режиме реального времени параметров геометрии трещин.

Калибровка симулятора трещины измеренными относящимися к операции данными

После создания модели на основе симулятора МГРП рассчитанные значения  $q_1, \dots, q_n$  и контрольное давление  $P_{ref}$  сравнивают с измеренными данными, относящимися к операции гидроразрыва. Если значения расчетных данных отличаются от измеренных данных (что зачастую выражается в процентах), относящиеся к операции параметры изменяют до тех, пока не наступит соответствие между смоделированными данными и полученными данными.

В зависимости от разницы между смоделированными результатами и измеренными результатами симулятор МГРП можно корректировать, пока число раскрытых трещин, расходы при закачке и параметры геометрии трещин не совпадут с заданным пределом погрешности в процентах по сравнению с оценкой в режиме реального времени параметров геометрии трещин, полученных анализом трубных волн. Например, способ может включать корректировку МГРП в случаях, когда погрешность между смоделированными результатами и измеренными результатами по данным анализа трубных волн превышает 10%. В одном или более вариантах осуществления заданный предел погрешности в процентах может быть процентным отношением, выбранным из 5%, 10%, 15% и 20%. Однако в зависимости от применения предел погрешности в процентах может быть больше или меньше указанных значений.

Анализ работ в режиме реального времени

После использования симулятора МГРП, включающего результаты измерений, для количественного выражения хода выполнения работ можно использовать выбранный критерий оценки работы по гидроразрыву пласта, чтобы проанализировать вариацию между первоначальным проектом работ и основанным на результатах измерений проектом работ. Критерий оценки работы по гидроразрыву может включать число трещин, длину трещин, размещение расклинивающего агента, проницаемость трещин и т. п., а также их сочетания.

В одном или более вариантах осуществления для выбранного критерия оценки работы можно установить произвольно взятый предел вариации, чтобы пользователь мог понять, требуется ли уточнение проекта работ перед продолжением обработки пласта методом многостадийного гидроразрыва. В одном или более вариантах осуществления

предел вариации критерия оценки работы по гидроразрыву между значениями данных первоначального проекта работ и основанного на результатах измерений проекта работ может находиться в пределах процентного отношения, выбранного из 1%, 5%, 10%, 15% и 20%, при этом вариация выше выбранного предела указывает на необходимость уточнения первоначального проекта работ для учета различий, отмеченных в основанном на результатах измерений проекте работ. Однако в зависимости от применения выраженная в процентах вариация может быть больше или меньше указанных значений.

#### Уточнение проекта работ в режиме реального времени

В случае если измеренные результаты работ по гидроразрыву не соответствуют критерию, установленному в первоначальном проекте работ, можно использовать один или более способов, чтобы уточнить текущий проект работ и обеспечить соответствие установленному критерию. В одном или более вариантах осуществления уточнение проекта работ может включать оптимизацию проекта работ в режиме реального времени с помощью таких способов, как изменение одной или более скоростей закачки, концентрации расклинивающего агента, типа расклинивающего агента, размерности расклинивающего агента, твердых добавок, типа жидкости, жидкостных добавок и т.п.

#### Применения

В одном или более вариантах осуществления способы гидроразрыва пласта можно применять в потенциальном стволе скважины, который ранее не подвергали гидроразрыву. В некоторых вариантах осуществления способы могут включать повторный гидроразрыв пласта, применяемый в стволах скважин, которые ранее подвергали обработке пласта методом гидроразрыва, чтобы получить стимулированные кластеры, и (или) добавление новых перфорационных отверстий и трещин в скважину, которую ранее подвергали гидроразрыву пласта.

#### Проектирование системы

В одном или более вариантах осуществления способы в соответствии с изобретением включают систему сбора данных на основе мониторинга отражений трубных волн в стволе скважины, чтобы определить размер и (или) местонахождение одной или более существующих скважин. Системы сбора данных в соответствии с изобретением могут включать источник импульсов, способный обеспечивать трубные волны внутри ствола скважины, регистрируемые одним или более датчиками, распределенными на разных значениях глубины внутри ствола скважины. В одном или более вариантах осуществления датчики могут иметь единичную конфигурацию, или их можно объединять в группу распределенных датчиков для мониторинга отраженных трубных волн в стволе скважины. Способы регистрации изменений давления в стволе скважины и конфигурация оборудования описаны, например, в патенте США № 9476760.

Датчики в соответствии с изобретением могут обнаруживать и регистрировать давление, вибрацию и (или) расход. Датчики могут включать любое число и любые типы датчиков, пригодных для внутрискважинного определения изменений давления и вибрации, такие как кварцевые манометры, оптические датчики, включая

оптоволоконные, и т.п. В одном или более вариантах осуществления датчики могут включать имеющиеся на рынке датчики серии WellWatcher® компании Schlumberger Technology Corporation.

#### Вычислительная система

Системы в соответствии с изобретением также имеют конфигурацию для управления вычислительной системой, которая организует систему для эксплуатации пользователем или в автономном режиме с оценкой трещин многостадийного гидроразрыва в подземном пласте. В одном или более вариантах осуществления в способах можно использовать симулятор МГРП, который определяет разделение расхода между множественными трещинами, моделирует рост трещин гидроразрыва в слоях пласта и определяет различные параметры трещин. Помимо рекомендаций по корректирующим действиям, если необходимо, после проектирования операции с помощью симуляторов в режиме реального времени можно выполнить калибровку относящихся к операции параметров.

Можно использовать любую комбинацию аппаратно-технического обеспечения мобильного, настольного, серверного, встроенного или других типов. Например, как показано на ФИГ.5, вычислительная система (500) может включать один или более процессоров (502) вычислительной машины, сопутствующее запоминающее устройство (504) (например, оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), быстродействующая буферная память, флэш-память и т.д.), одно или более устройств (506) хранения (например, жесткий диск, оптический привод, например привод для компакт-диска (CD) или цифрового универсального диска (DVD), карта флэш-памяти и т.д.) и многочисленные другие элементы и функции. Процессор (-ы) вычислительной машины (502) может (могут) быть интегрированной сетью для обработки команд. Например, процессор (-ы) вычислительной машины может (могут) быть процессором (-ами) с одним или более ядрами или микроядрами, конфигурированным (-ыми) для осуществления описанных выше способов, включая создание проекта работ по обработке пласта методом гидроразрыва, выдачу команд на выполнение части обработки пласта методом гидроразрыва, характеристику степени распространения трещин в подземном пласте с помощью мониторинга отражения трубных волн в стволе скважины, определение степени распространения трещин первоначальному проекту работ и выдачу команд на выполнение одного из изменений первоначального проекта работ и повторение предыдущих стадий до тех пор, пока степень распространения трещин не будет соответствовать первоначальному проекту работ; или завершение обработки пласта методом гидроразрыва. Кроме того, как можно понять из изобретения, характеристика степени распространения гидроразрыва может включать использование источника импульсов для обеспечения одной или более трубных волн в стволе скважины; измерение одного или более отражений трубных волн в стволе скважины, и определение по меньшей мере одного местонахождения или ширины трещины для одной или более трещин внутри подземного пласта.

Вычислительная система (500) может включать также одно или более устройств (510) ввода, таких как сенсорный экран, клавиатура, мышь, микрофон, сенсорная панель, электронная ручка или другой вид устройства ввода. Кроме того, вычислительная система (500) может включать одно или более устройств (508) вывода, таких как экран (например, жидкокристаллический (ЖК) дисплей, плазменный дисплей, сенсорный экран, монитор на основе электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), проектор или другое устройство индикации), принтер, внешнее запоминающее устройство или любое другое устройство вывода. Одно или более устройств вывода могут быть одновременно устройствами ввода или могут быть отдельными устройствами. Вычислительная система (500) может быть подключена к сети (512) (например, локальной вычислительной сети (LAN), глобальной вычислительной сети (WAN), такой как Интернет, сети мобильной связи или сети другого вида) через сетевой интерфейс (не показан). Устройство (-а) ввода и вывода может (могут) быть локально или дистанционно (например, через сеть (512)) подключены к процессору (-ам) вычислительной машины (502), запоминающему устройству (504) и устройству (-ам) (506) хранения. Существует много разных видов вычислительных систем, и указанные выше устройства ввода и вывода могут быть представлены в других формах.

Инструкции по программному обеспечению в форме машиночитаемого исходного текста для реализации вариантов осуществления изобретения можно сохранять, полностью или частично, временно или постоянно, на энергонезависимом машиночитаемом носителе, таком как компакт-диск, универсальный цифровой диск, устройство хранения, дискета, пленка, флэш-память, физическая память или любой другой машиночитаемый носитель информации. В частности, инструкции по программному обеспечению могут соответствовать машиночитаемому исходному тексту, который при его обработке процессором (-ами) выполнен с возможностью реализации вариантов осуществления изобретения. Кроме того, один или более элементов указанной выше вычислительной системы (500) могут находиться в удаленном месте и соединяться с другими элементами через сеть (512).

Кроме того, варианты осуществления изобретения могут быть реализованы в распределенной системе с множеством узлов, при этом каждая часть изобретения может находиться на другом узле внутри распределенной системы. В одном варианте осуществления изобретения узел соответствует отдельному вычислительному устройству. В качестве альтернативы узел может соответствовать процессору вычислительной машины с сопутствующей физической памятью. В качестве альтернативы узел может соответствовать процессору вычислительной машины или микроядру процессора вычислительной машины с совместно используемым запоминающим устройством и (или) ресурсами.

#### ПРИМЕРЫ

В следующих примерах показаны сценарии, в которых способы в соответствии с изобретением используют для проверки соответствия первоначальному проекту работ по гидроразрыву пласта в режиме реального времени по мере выполнения работ.

### Пример 1. Размещение расклинивающего агента в трещинах

В этом примере способ применяется к проекту работ, для которых установлен начальный критерий размещения 100% суспензии расклинивающего агента в нескольких искусственно образованных трещинах. На ФИГ.6 конкретно показано, что элемент 602 представляет первоначальный проект работ, где три трещины 610 искусственно образуют и заполняют суспензией расклинивающего агента в выбранном интервале 608 ствола скважины. В первоначальном проекте работ критерием проектирования гидроразрыва является результат, при котором все трещины содержат равные количества расклинивающего агента. В процессе выполнения проекта работ по гидроразрыву пласта может образоваться больше трещин, чем планировалось, как показано четырьмя искусственно образованными трещинами 612 элемента 604. Образование дополнительных трещин указывает, что рассчитанный на меньшее число трещин план закачки приведет к закачке меньшего количества жидкости в трещины 612, в результате чего можно наблюдать малую ширину трещины из-за размещения недостаточного количества расклинивающего агента и (или) концевое экранирование трещины.

Что касается конкретно элемента 606, в процессе работ по гидроразрыву можно использовать анализ трубных волн, чтобы выявить несоответствия в выполнении работ, такие как наличие незапланированных дополнительных трещин 614. С помощью показанного на элементе 606 анализа трубных волн в соответствии с изобретением оператор может выявлять проблемы в режиме реального времени и проводить одно из ряда возможных корректирующих действий, чтобы повысить скорость закачки во избежание выпадения расклинивающего агента из жидкости гидроразрыва. Другим возможным корректирующим действием является закачка отклоняющего материала для блокировки распространения одной трещины и продолжения стимуляции остальных трещин.

### Пример 2. Контроль длины искусственно образованных трещин

В следующем примере способы в соответствии с изобретением используют для проектирования работ по гидроразрыву таким образом, чтобы образовать в интервале ствола скважины трещины заданной длины  $L$  или меньшей длины в соответствии с критерием оценки работы по гидроразрыву пласта. На ФИГ.7 конкретно показано, что элемент 702 является иллюстрацией проекта работ, в котором три трещины 710 длиной  $L$  запланированы в стволе 708 скважины (первоначальный проект работ). В процессе выполнения работ, как показано на элементе 704, одна или более запланированных трещин 714 могут не образоваться (неудавшийся гидроразрыв). В этом случае в остальные скважины 712 попадет больше суспензии расклинивающего агента, и окончательная длина трещин будет больше запланированной длины  $L$ . Неконтролируемое распространение трещин может привести к ряду осложнений, включая проникновение в соседние скважины и возникновение нежелательных взломов скважин (слияние трещин из разных скважин).

С помощью способов в соответствии с изобретением можно предупредить удлинение стимулированных трещин за установленные пределы с помощью корректирующих действий и вмешательства, как показано на элементе 706. Это становится возможным, поскольку в ходе анализа трубных волн можно выявлять отсутствие предусмотренных трещин (в данном случае - две раскрытые трещины вместо трех раскрытых трещин по плану работ). Например, корректирующие действия на элементе 706 могут заключаться в снижении объема суспензии расклинивающего агента, как описано уравнением 8, где  $V_{\text{initial}}$  - первоначальный объем суспензии для закачки в скважину;  $n_{\text{frac, initial}}$  - предполагаемое до начала работ число трещин;  $n_{\text{frac, actual}}$  - число трещин по данным анализа трубных волн;  $V_{\text{adjusted}}$  - откорректированный объем суспензии для закачки в скважину.

$$V_{\text{adjusted}} = V_{\text{initial}} \frac{n_{\text{frac, actual}}}{n_{\text{frac, initial}}} \quad (8)$$

[0001] Как показано на элементе 706, анализ трубных волн в режиме реального времени в процессе работ по гидроразрыву может указать, что следует изменить проект трещин (в режиме реального времени) путем снижения закачиваемого количества для корректировки окончательных значений длины 716 трещин для соответствия значениям L, установленным в первоначальном проекте трещин.

Хотя выше было подробно описано несколько примеров осуществления, специалисты в данной области легко поймут, что возможны многие модификации примеров осуществления без существенного отклонения от настоящего изобретения. Соответственно, предполагается, что все такие модификации должны быть включены в объем настоящего изобретения, как определено в следующей формуле изобретения. В формуле изобретения пункты «средство плюс функция» представляют структуры, которые представлены в настоящем документе как выполняющие описываемую функцию, и не только как структурные эквиваленты, но и как эквивалентные структуры. Следовательно, хотя гвоздь и винт не могут быть структурными эквивалентами, поскольку гвоздь использует цилиндрическую поверхность для скрепления деревянных деталей, тогда как винт использует спиральную поверхность, в среде крепления деревянных деталей гвоздь и винт могут быть эквивалентными структурами.

## ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ обработки подземного пласта, содержащий:

(1) выбор ствола скважины для обработки пласта методом многостадийного гидроразрыва, разработку первоначального проекта работ по обработке пласта методом многостадийного гидроразрыва, определение одного или более критериев оценки работы по гидроразрыву и разработку модели распространения трубных волн в стволе скважины на основе первоначального проекта работ;

(2) инициирование части первоначального проекта работ;

(3) обеспечение одной или более трубных волн в стволе скважины и мониторинг одного или более отражений одной или более трубных волн и расчет числа раскрытых трещин и параметров геометрии трещин в соответствии с моделью распространения трубных волн;

(4) выполнение оценки параметров геометрии трещин в режиме реального времени путем:

расчета одного или более значений расхода при закачке в ряд раскрытых трещин и моделирования процесса гидроразрыва пласта для ряда раскрытых трещин с использованием симулятора многостадийного гидроразрыва пласта;

(5) корректировка симулятора многостадийного гидроразрыва пласта до тех пор, пока ряд раскрытых трещин, одно или более значений расхода при закачке и параметры геометрии трещин со стадии (3) не совпадут с оценкой в режиме реального времени параметров геометрии трещин со стадии (4), для обеспечения откорректированного симулятора гидроразрыва пласта;

(6) расчет параметров геометрии трещин с использованием откорректированного симулятора гидроразрыва пласта для разработки проекта работ, основанного на результатах измерений;

(7) расчет разницы между первоначальным проектом работ и основанным на результатах измерений проектом работ; и

(8) выполнение одного из следующего:

проверка того, чтобы полученная на стадии (7) разница была ниже предписанной вариации для одного или более критериев оценки работы по гидроразрыву пласта, и продолжение работ согласно первоначальному проекту работ; или

уточнение первоначального проекта работ и повторение стадий (6) и (7) до тех пор, пока полученная на стадии (7) разница не станет ниже предписанной вариации для одного или более критериев оценки работы по гидроразрыву пласта, и продолжение работ согласно уточненному варианту первоначального проекта работ; и

(9) повторение стадий (3)-(8) до завершения обработки пласта методом многостадийного гидроразрыва.

2. Способ по п.1, в котором модель распространения трубных волн содержит параметр импульсной характеристики скважины.

3. Способ по п.1, в котором критерием оценки работы по гидроразрыву пласта является совокупное количество расклинивающего агента, размещенного во всех трещинах.

4. Способ по п.3, в котором ряд стимулированных трещин при обработке пласта методом многостадийного гидроразрыва отличается от первоначального проекта работ.

5. Способ по п.1, в котором критерием оценки работы по гидроразрыву пласта является конкретное количество расклинивающего агента в каждой трещине.

6. Способ по п.5, в котором ряд стимулированных трещин при обработке пласта методом многостадийного гидроразрыва отличается от первоначального проекта работ.

7. Способ по п.1, в котором симулятор многостадийного гидроразрыва пласта является моделью, выбранной из группы, состоящей из: модели Христиановича - Гиртсма - де Клерка (KGD), модели Перкинса - Керна - Нордгрена (PKN), радиальной модели, псевдо-3D-модели, планарной 3D-модели и полной 3D-модели.

8. Способ по п. 1, в котором модель распространения трубных волн определяет число раскрытых трещин в стволе скважины и один или более параметров геометрии трещин, выбранных из: глубины трещины, длины трещины, ширины, высоты.

9. Способ по п.1, в котором мониторинг отраженных трубных волн осуществляется датчиком давления в устьевой части ствола скважины.

10. Способ по п.1, в котором мониторинг отраженных трубных волн осуществляется одним или более распределенными датчиками давления в стволе скважины.

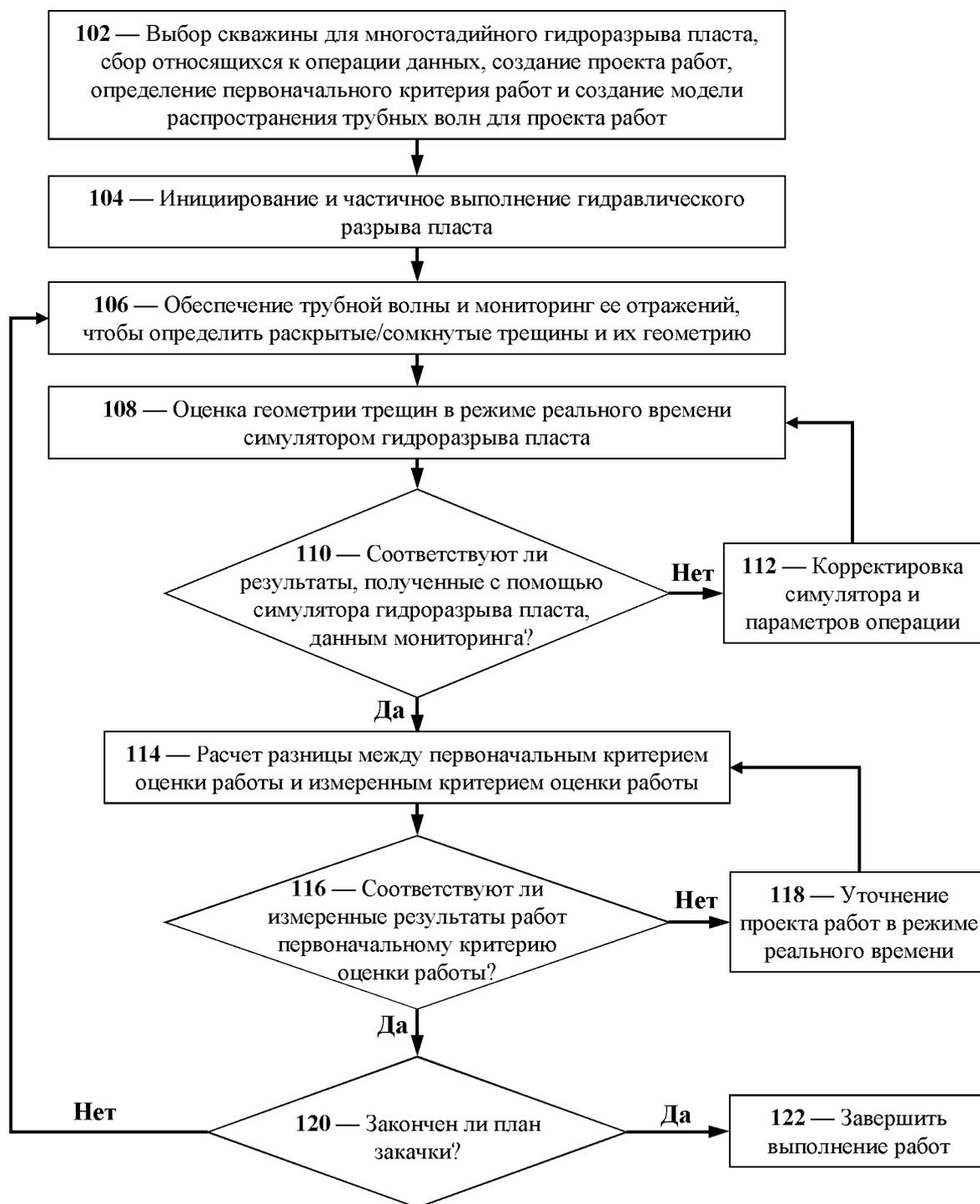
11. Способ по п.1, в котором мониторинг одного или более отражений трубных волн в стволе скважины содержит использование мониторинга в режиме реального времени.

12. Способ по п.1, в котором оценку в режиме реального времени выполняют путем моделирования потока суспензии в ствол скважины для расчета распределения расхода между множественными трещинами.

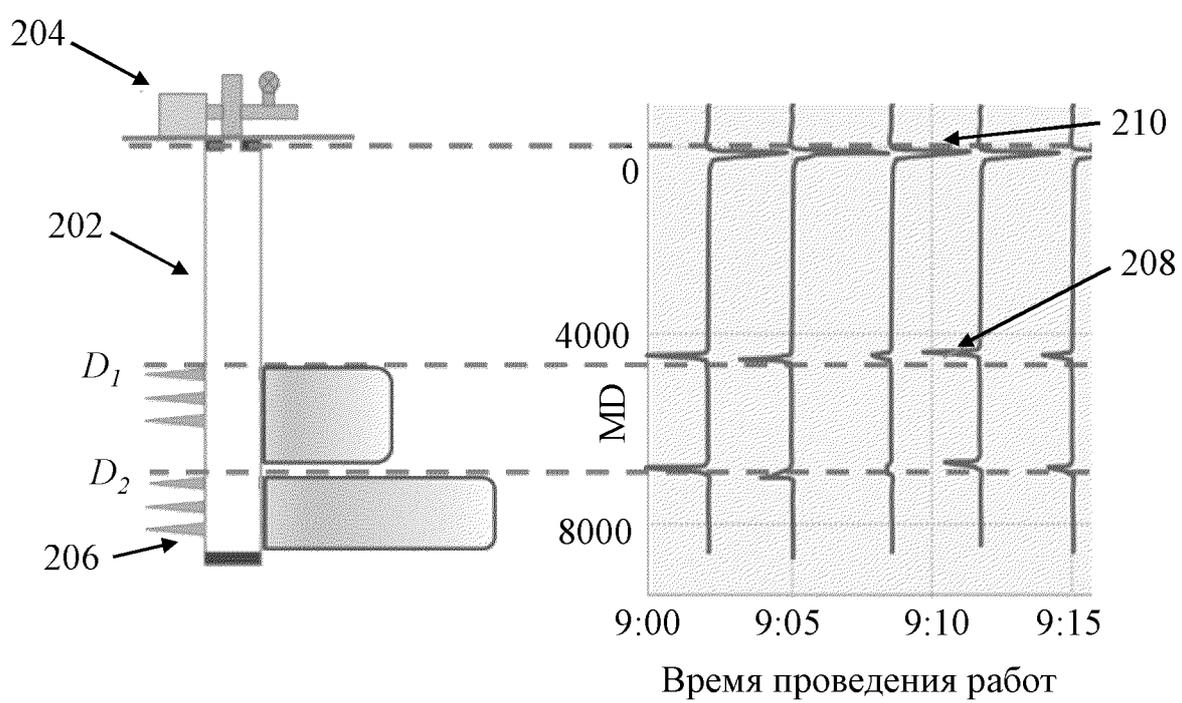
13. Способ по п.1, в котором моделирование процесса гидроразрыва для ряда раскрытых трещин с использованием симулятора многостадийного гидроразрыва пласта содержит оценку одного или более параметров геометрии трещин.

14. Способ по п.1, в котором корректировка симулятора многостадийного гидроразрыва пласта содержит корректировку одного или более параметров работ, выбранных из расхода при закачке, концентрации расклинивающего агента, размерности расклинивающего агента, волокнистых добавок, типа жидкости и количества жидкостных добавок.

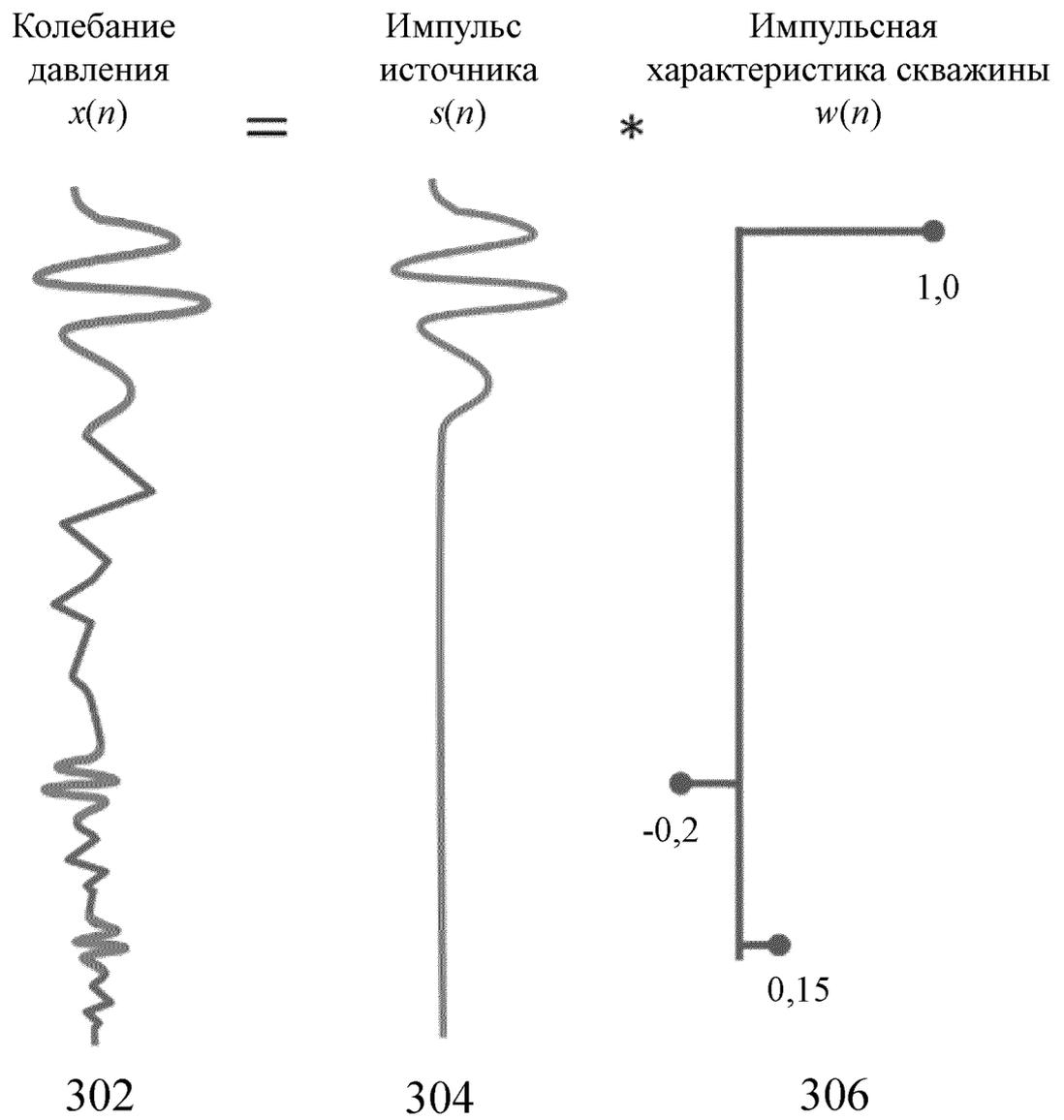
По доверенности



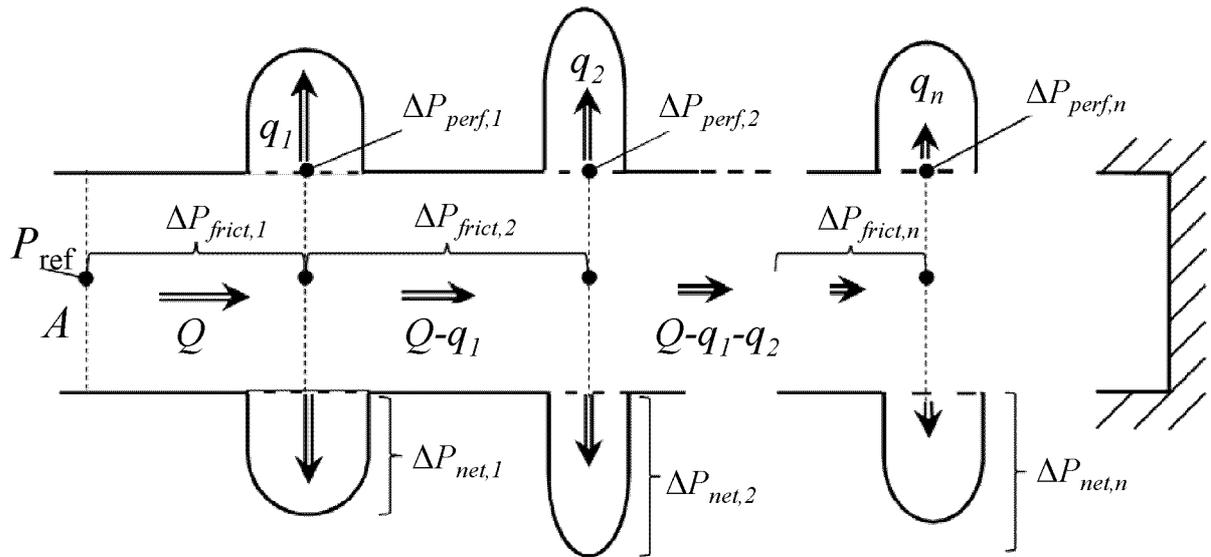
ФИГ. 1



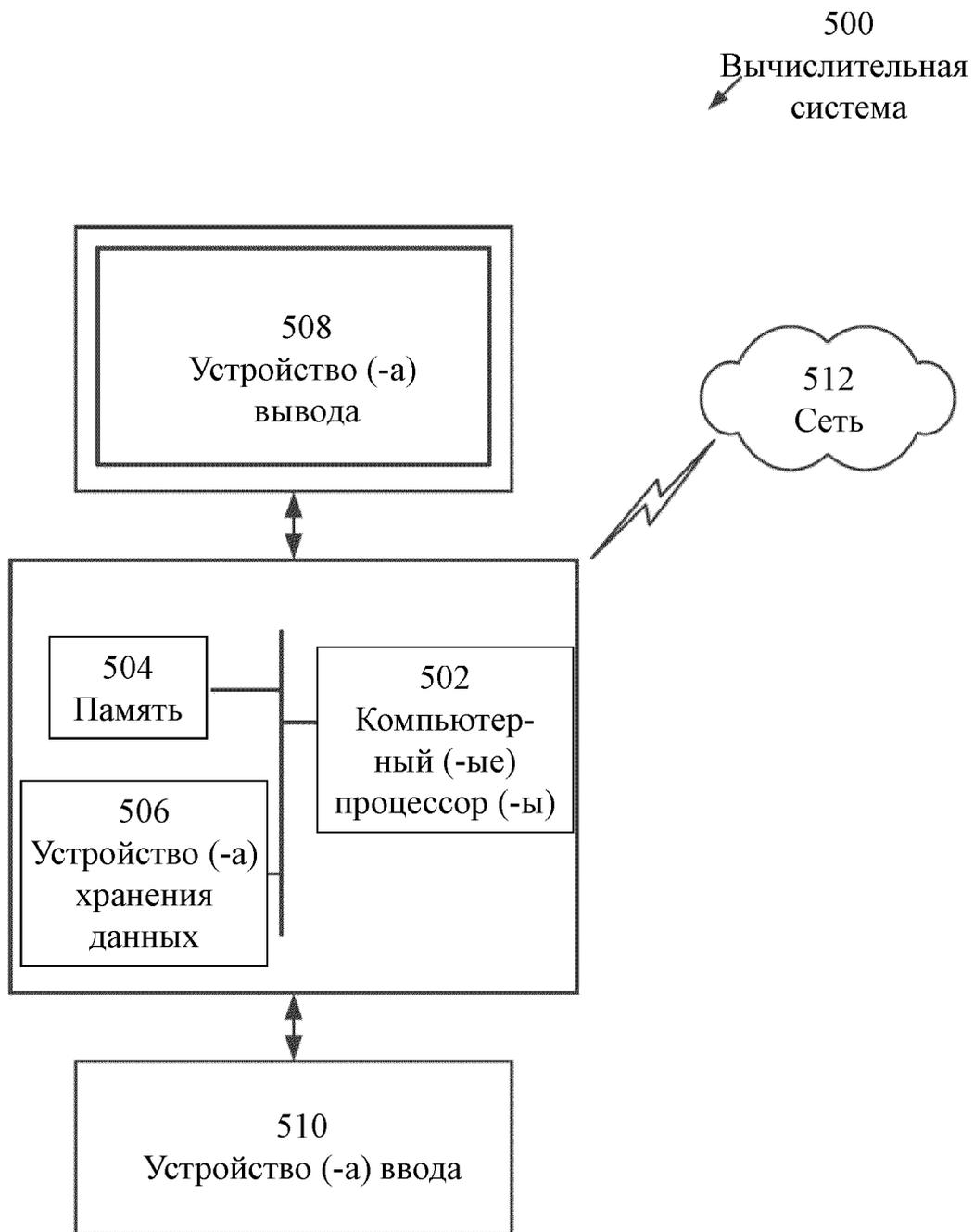
ФИГ. 2



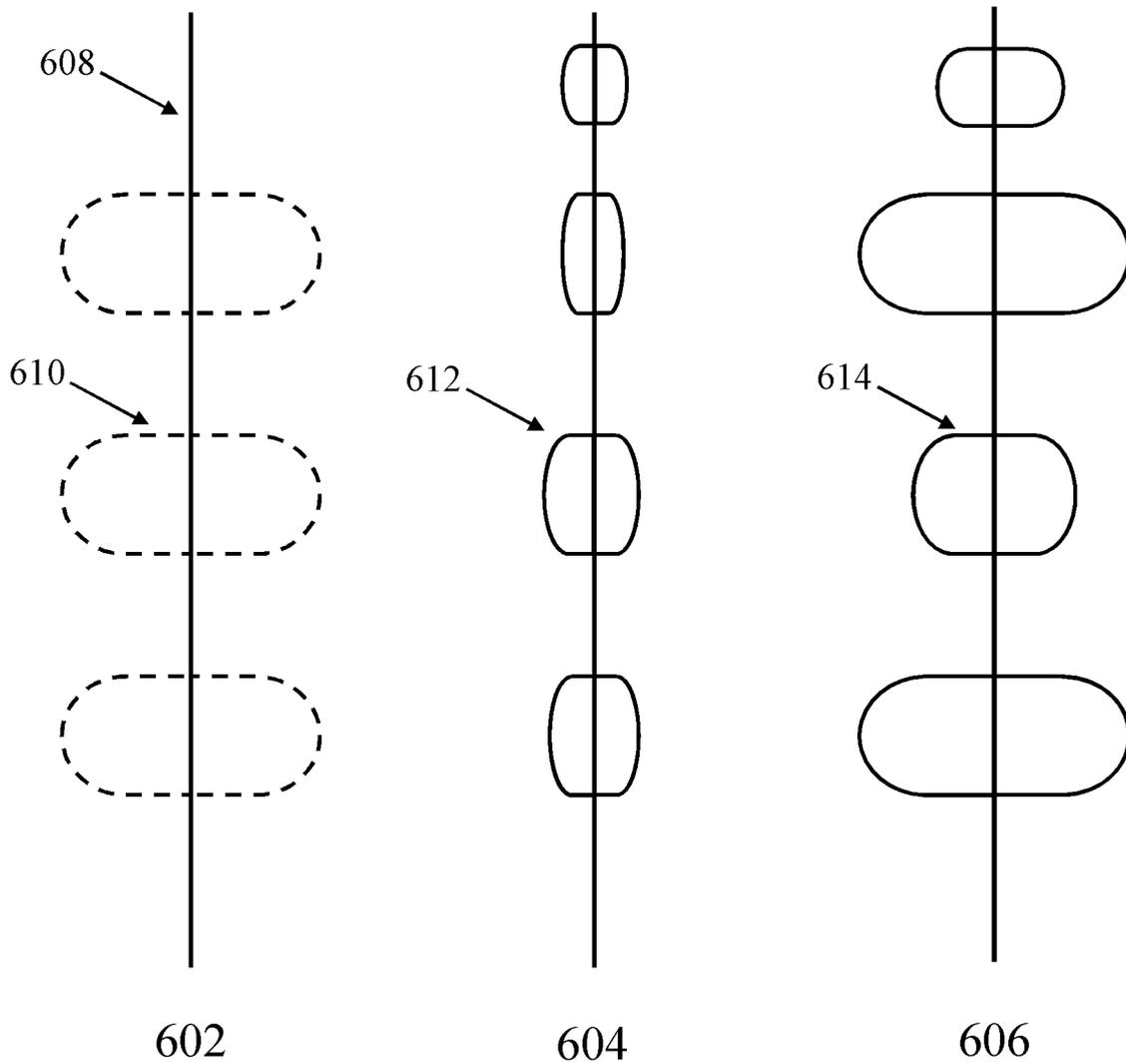
ФИГ. 3



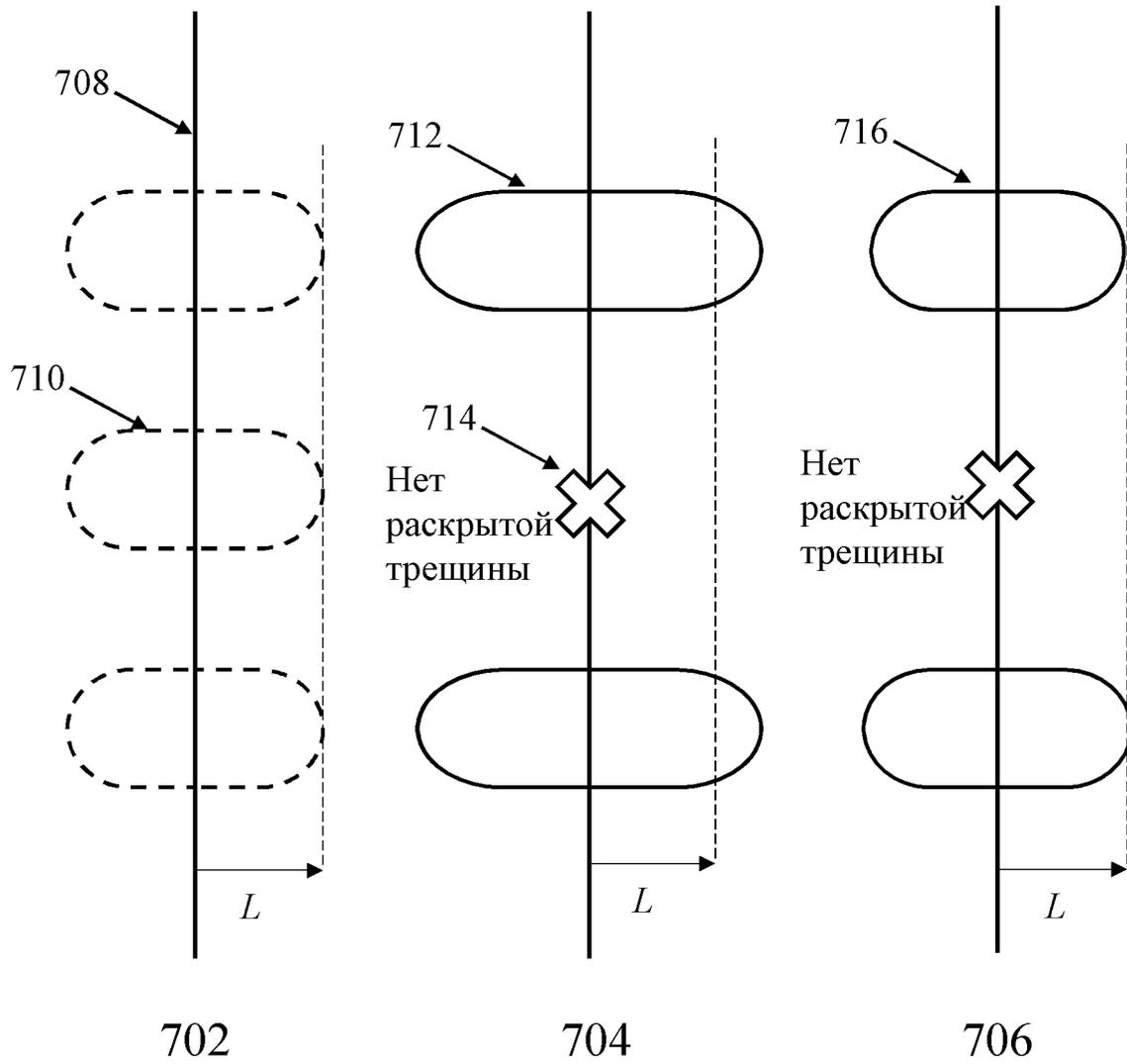
ФИГ. 4



ФИГ. 5



ФИГ. 6



ФИГ. 7