

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **038020**(13) **B1**(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2021.06.23

(21) Номер заявки
201691995

(22) Дата подачи заявки
2015.04.02

(51) Int. Cl. **E21B 49/00** (2006.01)
E21B 43/247 (2006.01)
E21B 43/26 (2006.01)

(54) ИНТЕНСИФИКАЦИЯ СКВАЖИН

(31) 14/243,051**(32) 2014.04.02****(33) US****(43) 2017.01.30****(86) PCT/US2015/023965****(87) WO 2015/153821 2015.10.08**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
ГЕОКВЕСТ СИСТЕМЗ Б.В. (NL)

(72) Изобретатель:
Зиауддин Муртаза (US), Диас Дэниел,
Кузнецов Данила, Наккаш Пол,
Джиддинс Мари Энн, Бодводкар
Сухас, Оводунни Эбимбола (GB)

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

(56) WO-A1-2008093264
US-A1-20120173220
US-A1-20030225521
US-A1-20100314110
US-A1-20120232872

(57) Изобретение относится к способу моделирования интенсификации притока скважины и компьютерной модели для моделирования обработки интенсификации притока с использованием химической реакции между обрабатываемым флюидом и пористой средой, такой как кислотная обработка карбонатных пластов. На этапе или в режиме инициации канала-"червоточины" среда ячеек, имеющих насыщение твердыми частицами выше соответствующего критического насыщения твердыми частицами, состоит из материала породы, имеющего характер системы с одинарной проницаемостью и одинарной пористостью; и на этапе или в режиме роста канала-"червоточины" ячейки, имеющие насыщение твердыми частицами меньше или равное соответствующему критическому насыщению твердыми частицами, содержат две различные взаимосвязанные среды, материал породы и среда канала-"червоточины", определенные для включения материала, формирующего червоточину, так же как материала сформировавшегося канала-"червоточины", имеющего подвижность флюида как функцию от насыщения твердыми частицами.

B1**038020****038020****B1**

Родственные заявки

Отсутствуют.

Уровень техники

Положения, приведенные в данном разделе, только представляют основную информацию, относящуюся к данному изобретению, и могут не отражать существующий уровень техники.

Стимуляция скважин с использованием раствора реагента для растворения породы пласта, например кислотная обработка карбонатных пластов, применяется для увеличения притока пластовых флюидов в ствол скважины. В отрасли давно ведутся исследования, посвященные разработке методик моделирования и аппаратуры для оптимизации скорости закачки реагента.

При слишком низкой скорости закачки реагент растрачивается сразу после контакта со средой, растворяя только переднюю поверхность породы, в процессе, который называется "поверхностное растворение", показанное на фиг. 1А. При повышении скорости закачки происходит "коническое" растворение, показанное на фиг. 1В, где все еще имеет место поверхностное растворение, а канал - короткий и широкий. Как показано на фиг. 1С, при средних скоростях закачки формируется длинный доминантный канал, проходящий вглубь пласта, называемый червоточиной, который считается оптимальным для усиления потока и ассоциируется с оптимальной скоростью закачки. При более высоких скоростях более однородное растворение расширяет червоточину, по мере того как реагент растворяет породу во все большей и большей области, как показано на фиг. 1D и 1Е, и избыточный реагент растворяет большой объем породы без существенных улучшений потока.

В связи с важностью кислотной обработки под давлением ниже давления гидроразрыва для предсказания вариантов воздействия и оптимизации параметров закачки разработано большое количество моделей, включая безразмерные модели, модели капиллярных трубок, сеточные модели и модели сплошной среды. Недостатками многих из них является необходимость информации о параметрах, которую трудно получить, ограничение определенными типами реакционных режимов, невозможность рассчитать алгоритмы инициации канала-"червоточкины" и/или однородного растворения, потребность в огромных вычислительных ресурсах для масштабирования до эксплуатационных условий, трудности совмещения реакционного и транспортного механизмов и т.п. Отрасль нуждается в способах моделирования и инструментах, которые свободны от одного или более из этих недостатков и которые можно было бы использовать для лучшего применения кислотной обработки под давлением ниже давления гидроразрыва т.п.

Сущность изобретения

В некоторых вариантах реализации изобретения, описанного в данном документе, способ образования канала-"червоточкины" в пористой среде включает прогон компьютерной модели интенсификации притока для получения оптимизированных параметров закачки обрабатываемого флюида и его закачку в обрабатываемую зону пористой среды в соответствии с оптимизированными параметрами закачки обрабатываемого флюида для образования канала-"червоточкины". В некоторых вариантах реализации изобретения прогон компьютерной модели интенсификации притока включает заполнение компьютерной модели интенсификации притока статическими характеристиками пористой среды и кинетическими параметрами реакции для реакции пористой среды с реагентом в обрабатываемом флюиде; разбивку обрабатываемой зоны пористой среды на множество ячеек, имеющее первую часть, обозначенную как ячейки породы, и вторую часть, обозначенную как ячейки канала-"червоточкины"; моделирование ячеек породы, где среда ячеек породы состоит из материала породы, имеющего характер системы с одинарной проницаемостью и одинарной пористостью; моделирование ячеек канала-"червоточкины" на этапе инициации канала-"червоточкины", где среда соответствующих ячеек на этапе инициации канала-"червоточкины" имеет насыщение твердыми частицами выше соответствующего критического насыщения твердыми частицами и состоит из материала породы, имеющего характер системы с одинарной проницаемостью и одинарной пористостью; моделирование по меньшей мере части ячеек канала-"червоточкины" на этапе роста канала-"червоточкины", где соответствующие ячейки канала-"червоточкины" имеют насыщение твердыми частицами, которое меньше или равно соответствующему критическому насыщению твердыми частицами, и где ячейки этапы роста канала-"червоточкины" содержат две различные взаимосвязанные среды, состоящие соответственно из материала породы и среды канала-"червоточкины", в которой подвижность флюида есть функция от насыщения твердыми частицами; и получение оптимизированных параметров закачки обрабатываемого флюида.

В некоторых вариантах реализации изобретения способ может включать моделирование стимулирующей обработки, вызывающей химическую реакцию между обрабатываемым флюидом и пористой средой подземного пласта, с использованием компьютеризированной модели. Моделирование может включать разбивку обрабатываемой зоны подземного пласта на множество ячеек; моделирование ячеек на этапе инициации канала-"червоточкины", где среда ячеек, имеющих насыщение твердыми частицами выше соответствующего критического насыщения твердыми частицами, состоит из материала породы, имеющего характер системы с одинарной проницаемостью и одинарной пористостью; и моделирование ячеек, имеющих насыщение твердыми частицами, которое меньше или равно соответствующему критическому насыщению твердыми частицами на этапе роста канала-"червоточкины", где ячейки содержат две

различные взаимосвязанные среды, состоящие из материала породы и среды канала-"червоточины", в котором подвижность флюида есть функция от насыщения твердыми частицами.

В некоторых вариантах реализации изобретения компьютеризированная модель для имитации сти-мулирующей обработки, включающей химическую реакцию между обрабатывающим флюидом и пористой средой в подземном пласте, может содержать сетку, определяющую множество ячеек, представляющее обрабатываемую зону подземного пласта; режим инициации канала-"червоточины", в котором среда ячеек, имеющих насыщение твердыми частицами выше соответствующего критического насыщения твердыми частицами, состоит из материала породы, имеющего характер системы с одинарной проницаемостью и одинарной пористостью; и режим роста канала-"червоточины", в котором ячейки имеют насыщение твердыми частицами меньше или равное соответствующему критическому насыщению твердыми частицами на этапе роста канала-"червоточины" и содержат две различные взаимосвязанные среды, состоящие из материала породы и среды канала-"червоточины", в котором подвижность флюида есть функция от насыщения твердыми частицами.

Краткое описание графических материалов

Указанные и другие особенности и преимущества будет легче понять из следующего подробного описания, в сочетании с сопроводительными графическими материалами.

На фиг. 1А представлена схематическая диаграмма режима поверхностного растворения при кислотной обработке под давлением ниже давления гидроразрыва при сравнительно низкой скорости закачки.

На фиг. 1В представлена схематическая диаграмма режима конического растворения при кислотной обработке под давлением ниже давления гидроразрыва при скорости закачки ниже оптимальной, но выше, чем в режиме, показанном на фиг. 1А.

На фиг. 1С представлена схематическая диаграмма режима растворения с образованием канала-"червоточины" при кислотной обработке под давлением ниже давления гидроразрыва при оптимальной скорости закачки, в соответствии с некоторыми вариантами реализации изобретения, описанного в настоящем документе.

На фиг. 1D представлена схематическая диаграмма режима растворения с образованием разветвленной структуры при кислотной обработке под давлением ниже давления гидроразрыва в условиях избыточной скорости закачки, более высокой, чем в случае, показанном на фиг. 1С.

На фиг. 1Е представлена схематическая диаграмма режима однородного растворения при кислотной обработке под давлением ниже давления гидроразрыва при избыточной скорости закачки, более высокой, чем в случае, показанном на фиг. 1D.

На фиг. 2 представлена схематическая диаграмма способа образования канала-"червоточины" в пористой среде, в соответствии с вариантами реализации изобретения, описанного в настоящем документе.

На фиг. 3 представлена схематическая диаграмма способа прогона компьютерной модели интенсификации притока для получения оптимизированных параметров закачки обрабатывающего флюида в способе, показанном на фиг. 2, в соответствии с вариантами реализации изобретения в настоящем описании.

Фиг. 4 схематически иллюстрирует модель двойной проницаемости в соответствии с вариантами реализации изобретения, описанными в настоящем документе.

На фиг. 5 представлена блок-схема способа моделирования в соответствии с вариантами реализации изобретения, описанными в настоящем документе.

На фиг. 6 представлена блок-схема операций технологического процесса, использующих экспериментальные результаты, полученные на характерном образце, и компьютерное моделирование для проведения исследований чувствительности, калибровки модели, выполнения качественного анализа и определения оптимальной скорости закачки в соответствии с вариантами реализации изобретения, описанными в настоящем документе.

На фиг. 7 представлено сопоставление зарегистрированных кривых прорыва и измерений падения давления с данными компьютерного моделирования в соответствии с вариантами реализации изобретения, описанными в настоящем документе.

На фиг. 8 представлена блок-схема технологического маршрута фильтрации на основе отклика графопостроителя, в соответствии с вариантами реализации изобретения, описанными в настоящем документе.

На фиг. 9 представлена диаграмма нанесения сетки для компьютерного моделирования ядра в примере в соответствии с вариантами реализации изобретения, описанными в настоящем документе.

Фиг. 10 иллюстрирует графическое представление таблицы коэффициента подвижности для канала-"червоточины" по отношению к насыщению твердыми частицами в примере, в соответствии с вариантами реализации изобретения, описанными в настоящем документе.

Фиг. 11 иллюстрирует графическое представление исследований чувствительности к насыщению твердыми частицами, при котором подвижность в червоточине начинает увеличиваться в примере, в соответствии с вариантами реализации изобретения, описанными в настоящем документе.

Фиг. 12 иллюстрирует графическое представление исследований чувствительности к насыщению

твердыми частицами, при котором проницаемость канала-"червоточины" находится под прямым воздействием в примере, в соответствии с вариантами реализации изобретения, описанными в настоящем документе.

Фиг. 13 иллюстрирует графическое представление исследований чувствительности к константе скорости реакции в червоточине в примере в соответствии с вариантами реализации изобретения, описанными в настоящем документе.

Фиг. 14 иллюстрирует графическое представление исследований чувствительности к константе скорости реакции в породе в примере в соответствии с вариантами реализации изобретения, описанными в настоящем документе.

Фиг. 15 иллюстрирует графическое представление исследований чувствительности к насыщению твердыми частицами, после которого начинается рост канала-"червоточины", в примере в соответствии с вариантами реализации изобретения, описанными в настоящем документе.

Фиг. 16 иллюстрирует графическое представление исследований чувствительности к коэффициенту переноса порода -среда канала-"червоточины" в примере в соответствии с вариантами реализации изобретения, описанными в настоящем документе.

Фиг. 17 иллюстрирует графическое представление перекалиброванной по "наилучшему совпадению" таблицы коэффициента подвижности для канала-"червоточины" по отношению к насыщению твердыми частицами в примере в соответствии с вариантами реализации изобретения, описанными в настоящем документе.

Фиг. 18 иллюстрирует графическое представление изменения насыщения твердыми частицами в ячейках породы и ячейках канала-"червоточины" в начале и в конце закачки в примере в соответствии с вариантами реализации изобретения, описанными в настоящем документе.

На фиг. 19 представлен график сравнения смоделированной кривой падения давления после калибровки с экспериментальными данными для скорости закачки 2,0 мл/мин в примере в соответствии с вариантами реализации изобретения, описанными в настоящем документе.

На фиг. 20 представлен график сравнения смоделированной кривой падения давления после калибровки с экспериментальными данными для скорости закачки 5,0 мл/мин в примере в соответствии с вариантами реализации изобретения, описанными в настоящем документе.

На фиг. 21 представлен график сравнения смоделированной кривой падения давления после калибровки с экспериментальными данными для скорости закачки 7,5 мл/мин в примере в соответствии с вариантами реализации изобретения, описанными в настоящем документе.

На фиг. 22 представлена кривая оптимизации результатов компьютерного моделирования и экспериментальные данные по числу закачанных поровых объемов до прорыва как функции скорости закачки в примере, в соответствии с вариантами реализации изобретения, описанными в настоящем документе.

Подробное описание некоторых иллюстративных вариантов реализации изобретения

В целях содействия пониманию принципов настоящего изобретения ниже будут обсуждаться некоторые иллюстративные варианты его реализации, описанные в данном документе. Одинаковыми ссылочными позициями на различных чертежах обозначены одинаковые элементы. Ссылочные позиции без дополнительных букв относятся к детали(ям) в целом; ссылочные позиции с добавленными буквами относятся к одной конкретной из деталей.

В данном документе принято, что выражение "варианты реализации изобретения" относится к неограничивающим примерам применения, описанным в данном документе, независимо от того, упомянуты ли они в формуле изобретения, которые могут быть применены или присутствовать по отдельности или в любой комбинации или сочетании с одним или более других вариантов реализации. Каждый вариант реализации изобретения, описанный в данном документе, должен рассматриваться двояко: и как особенность, которая может использоваться с одним или более вариантами реализации изобретения, и как альтернатива, которая может использоваться отдельно или вместо одного или более других вариантов реализации изобретения. Следует понимать, что никаких ограничений на объем заявленного объекта изобретения это не накладывает, любые изменения и дальнейшие модификации в проиллюстрированных вариантах реализации изобретения и любые дополнительные применения принципов использования, проиллюстрированных в данном документе, в полной мере предусмотрены и включены в объем настоящего изобретения как обычно встречающиеся специалисту в данной области.

Более того, следует понимать, что схематические иллюстрации и описания, представленные в данном документе, являются только примерами, а компоненты и операции могут быть объединены или разделены и добавлены или удалены, так же как перераспределены в целом или частично, если в данном документе ясно не указано иное. Определенные проиллюстрированные операции могут производиться компьютером, выполняющим программу, записанную на машиночитаемом носителе, если компьютеризированная программа содержит инструкции, предписывающие компьютеру выполнять одну или более операций или подавать другим устройствам команды выполнять одну или более из операций.

Следует понимать, что, хотя значительная часть приведенного ниже подробного описания может быть представлена в контексте операций по кислотной обработке пласта на нефтяных месторождениях

для интенсификации притока, настоящее изобретение может быть использовано и быть полезным в других операциях на нефтяных и не-нефтяных месторождениях.

В соответствии с некоторыми вариантами реализации настоящего изобретения и в соответствии с фиг. 2 и 3 способ образования канала-"червоточины" в пористой среде включает 20 прогонов компьютерной модели интенсификации притока, включая разбивку 22 обрабатываемой зоны пористой среды на множество ячеек, имеющее первую часть, обозначенную как ячейки породы, и вторую часть, обозначенную как ячейки канала-"червоточины"; заполнение 24 компьютерной модели интенсификации притока статическими характеристиками пористой среды, кинетическими параметрами реакции для реакции пористой среды с реагентом в обрабатывающем флюиде и динамическими характеристиками флюидов; моделирование 26 ячеек породы, где среда ячеек породы состоит из материала породы, имеющего характер системы с одинарной проницаемостью и одинарной пористостью; моделирование 28 ячеек канала-"червоточины" на этапе инициации канала-"червоточины", где среда соответствующих ячеек на этапе инициации канала-"червоточины" имеет насыщение твердыми частицами выше соответствующего критического насыщения твердыми частицами и состоит из материала породы, имеющего характер системы с одинарной проницаемостью и одинарной пористостью; моделирование 30 по меньшей мере части ячеек канала-"червоточины" на этапе роста канала-"червоточины", где соответствующие ячейки канала-"червоточины" имеют насыщение твердыми частицами, которое меньше или равно соответствующему критическому насыщению твердыми частицами, и где ячейки этапа роста канала-"червоточины" содержат две различные взаимосвязанные среды, состоящие соответственно из материала породы и среды канала-"червоточины", в которой подвижность флюида есть функция от насыщения твердыми частицами; и получение оптимизированных параметров закачки обрабатывающего флюида. В данном документе принято, что термин "среда канала-"червоточины" следует понимать двояко: и как среду непосредственно канала-"червоточины", и как среду зарождающегося канала-"червоточины" или формирующую червоточину среду. В некоторых вариантах реализации изобретения способ может дополнительно включать закачку 34 (см. фиг. 2) обрабатывающего флюида внутрь обрабатываемой зоны пористой среды в соответствии с оптимизированными параметрами закачки обрабатывающего флюида для образования канала-"червоточины".

В некоторых вариантах реализации изобретения в компьютерной модели интенсификации притока используется численный метод конечных разностей. В некоторых вариантах реализации изобретения компьютерная модель интенсификации притока учитывает присутствие в обрабатываемой зоне многокомпонентного флюида, выбранного из группы, состоящей из газа, водной и нефтяной фаз, включая их комбинации. В некоторых вариантах реализации изобретения компьютерная модель интенсификации притока учитывает присутствие в обрабатываемой зоне множества твердых фаз. В некоторых вариантах реализации изобретения обрабатываемая зона включает подземный пласт, содержащий породу с карбонатом кальция, и обрабатывающий флюид содержит кислоту, поставляемую в обрабатываемую зону через ствол скважины, проходящий через продуктивный пласт.

В некоторых вариантах реализации изобретения подвижность флюида как функция насыщения твердыми частицами конкретизирована независимо для каждой ячейки, чтобы характеризовать разное поведение различных типов породы в соответствующих ячейках.

В некоторых вариантах реализации изобретения моделирование этапа инициации канала-"червоточины" учитывает растворение материала породы для повышения проницаемости и объем пор в соответствующих ячейках. В некоторых вариантах реализации изобретения среда ячеек канала-"червоточины" при моделировании этапа инициации канала-"червоточины" содержит материал породы и среду канала-"червоточины", и моделирование этапа инициации канала-"червоточины" дополнительно включает задание очень низких значений коэффициента переноса (сигма, или σ) границе раздела порода-трещина, так что реагент в обрабатывающем флюиде не взаимодействует с материалом канала-"червоточины".

В некоторых вариантах реализации изобретения среда ячеек при моделировании этапа инициации канала-"червоточины" содержит материал породы и среду канала-"червоточины", и этап инициации канала-"червоточины" включает задание очень низких значений коэффициента переноса границе раздела порода-трещина, так что реагент в обрабатывающем флюиде не взаимодействует со средой канала-"червоточины", и дополнительно включает переход к моделированию этапа роста канала-"червоточины" путем увеличения коэффициента переноса границы раздела порода-трещина выше соответствующих исходных значений.

В некоторых вариантах реализации изобретения реакцию обрабатывающего флюида с материалом породы и, если насыщение твердыми частицами меньше или равно соответствующему критическому насыщению твердыми частицами, с материалом канала-"червоточины", независимо параметризуют, чтобы учесть растворение соответственного материала(ов) в соответствующих ячейках.

В некоторых вариантах реализации изобретения скорость реакции R_r между обрабатывающим флюидом и твердым материалом в ячейках описывается уравнением

$$R_r = V_b \cdot A_r \cdot Pc_{ri}^{n_{ri}} \cdot PD_{mijk} \quad \text{Уравнение (1)},$$

где V_b - суммарный объем соответствующей ячейки,
 A_r - константа скорости реакции,
 c_{pi} - произведение концентраций реагента и твердых частиц,
 n_i - степень каждого слагаемого концентрации и
 D_{mijk} - величина отклонения реакции от равновесия, описываемая уравнением

$$D_{mijk} = \theta \cdot (F_k(a_i) - C_a) \quad \text{Уравнение (2)},$$

где θ - пористость соответствующей ячейки,
 $F_k(a_i)$ - функция от концентрации реагента и
 C_a - концентрация твердых частиц.

В некоторых вариантах реализации изобретения компьютерная модель интенсификации притока содержит таблицу функции подвижности в зависимости от концентрации твердых частиц.

В некоторых вариантах реализации изобретения способ может дополнительно включать калибровку компьютерной модели интенсификации притока с использованием экспериментальных данных, полученных на образце породы из обрабатываемой зоны, таких как, например, данные для определения функции скорости реакции для реакции между обрабатывающим флюидом и твердым материалом в ячейках и/или данные для заполнения таблицы подвижности флюида в зависимости от насыщения твердыми частицами.

В некоторых вариантах реализации изобретения способ может включать многократный прогон компьютерной модели интенсификации притока для получения точек данных, охватывающих поровый объем до прорыва как функцию скорости закачки обрабатывающего флюида, таких как, например, необходимые для определения скорости закачки обрабатывающего флюида, соответствующей минимальному поровому объему для прорыва.

В некоторых вариантах реализации изобретения обрабатываемая зона включает приствольную зону обрабатываемой области в подземном пласте, например зону, содержащую одну нагнетательную или водозаборную скважину, и способ дополнительно включает прогон компьютерной модели интенсификации притока для определения оптимальной скорости закачки обрабатывающего флюида для обработки приствольной зоны. Приствольная зона может охватывать область от ствола скважины до включительно около 35 м или от ствола скважины до включительно 3,5 м.

В некоторых вариантах реализации изобретения обрабатываемая зона содержит сектор продуктивного пласта, и оптимизированные параметры закачки обрабатывающего флюида включают оптимальную скорость закачки обрабатывающего флюида для обработки сектора. В данном документе принято, что термин "сектор" подразумевает одну нагнетательную скважину и зону внутри окружности произвольного радиуса, очерченной вокруг нагнетательной скважины. Упомянутый радиус может составлять от около 35 м до около 1 км, или от 35 до 500 м, или от 35 до 100 м.

В некоторых вариантах реализации изобретения обрабатываемая зона содержит поле подземного пласта, например множество нагнетательных и/или эксплуатационных скважин, и при этом оптимизированные параметры закачки обрабатывающего флюида включают оптимальную скорость закачки обрабатывающего флюида для обработки поля.

В некоторых вариантах реализации изобретения способ включает моделирование стимулирующей обработки, вызывающей химическую реакцию между обрабатывающим флюидом и пористой средой в подземном пласте, с использованием компьютеризированной модели, включающей разбивку обрабатываемой зоны подземного пласта на множество ячеек; моделирование ячеек на этапе инициации канала-"червоточины", причем среда ячеек, имеющих насыщение твердыми частицами выше соответствующего критического насыщения твердыми частицами, состоит из материала породы, имеющего характер системы с одинарной проницаемостью и одинарной пористостью; и моделирование ячеек, имеющих насыщение твердыми частицами меньше или равное соответствующему критическому насыщению твердыми частицами, на этапе роста канала-"червоточины", причем ячейки содержат две различные взаимосвязанные среды, состоящие из материала породы и среды канала-"червоточины", в которой подвижность флюида есть функция от насыщения твердыми частицами.

В некоторых вариантах реализации изобретения компьютеризированная модель для имитации стимулирующей обработки, вызывающей химическую реакцию между обрабатывающим флюидом и пористой средой в подземном пласте, включает сетку, определяющую множество ячеек, представляющих обрабатываемую зону подземного пласта; режим инициации канала-"червоточины", причем среда ячеек, имеющая насыщение твердыми частицами выше соответствующего критического насыщения твердыми частицами, состоит из материала породы, имеющего характер системы с одинарной проницаемостью и одинарной пористостью; и режим роста канала-"червоточины", в котором ячейки, имеющие насыщение твердыми частицами меньше или равное соответствующему критическому насыщению твердыми частицами, содержат две различные взаимосвязанные среды, состоящие из материала породы и среды канала-"червоточины", в которой подвижность флюида есть функция от насыщения твердыми частицами.

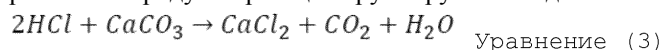
В соответствии с некоторыми вариантами реализации изобретения компьютерная модель интенсификации притока может рассчитывать и инициацию, и рост канала-"червоточины" путем исходного рас-

смотрения моделируемой зоны как единственной среды, пока не появится соответствие критерию инициации червоточин(ы), после чего модель плавно переходит к приближению породы и червоточин(ы) с двойной проницаемостью. В некоторых вариантах реализации изобретения две среды оцениваются по шкале Дарси, которая применима к моделированию центральной зоны, вблизи ствола скважины (единственная скважина), или в полевом варианте (множественные скважины) с минимальными трудозатратами. В некоторых вариантах реализации изобретения имитации можно осуществлять с использованием в качестве основы для модели, имеющихся в продаже компьютерных моделей коллектора, таких как ECLIPSE, NEXUS, CMG IMEX, CMG GEM, CMG STARS, MRST, OPM и т.п., обеспечивающих гибкость в использовании применительно либо к черной нефти, либо к другим композиционным моделям; составов Fully Implicit, IMPES или AIM, особенностей прогнозного моделирования, таких как локальное сгущение сетки, среди прочего, так что решение для потока можно находить методом конечных разностей, примененного к комбинации уравнений Дарси и массового баланса.

В соответствии с некоторыми вариантами реализации изобретения модель основана на базовом допущении, что исходно существует только порода, так что исходно задается поведение системы с одинарной проницаемостью и одинарной пористостью, а затем происходит определенное растворение материала породы и происходит переход к модели, в которой существуют две различные взаимосвязанные среды: порода и канал - "червоточина". В некоторых вариантах реализации изобретения их объемное соотношение задается, например, с использованием переменных песчаности (NTG). Это можно осуществить с использованием концепции двойной проницаемости, основанной на модели 36 двойной проницаемости, показанной на фиг. 4, где стрелки направления потока указывают возможные гидравлические соединения между породой M и каналом-"червоточиной" F примыкающих ячеек, например M1-F1, M1-M2 и F1-F2. Отметим, что в классической модели двойной проницаемости потоки протекают между трещиной и породой M, но в соответствии с настоящим изобретением канал-"червоточина" F моделируется как компонент трещины.

Фазы, присутствующие в модели, могут варьироваться в соответствии с практическим использованием. В некоторых вариантах реализации изобретения фазы представляют собой фазу многокомпонентного флюида, например флюид-носитель, такой как вода или нефть, реагент и продукты реакции и пористая или проницаемая твердая фаза, например материал, такой как порода, способная вступать в реакцию с реагентом. В некоторых вариантах реализации изобретения химические реакции для моделирования растворения имеют место в среде и породе и канала-"червоточины". В последующем описании, когда упоминаются вода, кислота и карбонатная или кальцитная порода, они приводятся как примеры фазы многокомпонентного флюида и примеры твердой фазы, причем понятно, что изобретение ими не ограничивается, поскольку модель может быть модифицирована, чтобы быть пригодной, по желанию, практически для любой пары флюид/неподвижная твердая фаза или флюид/порода. В некоторых вариантах реализации изобретения могут присутствовать, при необходимости, необязательные нефтяные и газовые фазы, либо в черной нефти, либо в композиционных составах.

Карбонат кальция растворяется соляной кислотой в соответствии с уравнением (3) или упрощенной формой уравнения (4), причем все продукты реакции группируются в единственном водном компоненте:



Скорость реакции растворения описывается упомянутыми выше уравнениями (1) и (2). В результате протекания реакции $CaCO_3$ растворяется, и насыщение твердыми частицами в ячейке убывает. Этот фактор играет различные роли в каждой среде, но первое важное различие возникает между двумя этапами: инициация канала-"червоточины" и рост канала-"червоточины".

На фиг. 5 показано в соответствии с некоторыми вариантами реализации изобретения, что компьютерное моделирование 40 может начинаться с соответствующей разбивки 42 подлежащей моделированию обрабатываемой зоны на множество ячеек, с последующим моделированием 44 ячеек на этапе инициации канала-"червоточины", на которой среда ячеек, имеющих насыщение твердыми частицами выше соответствующего критического насыщения твердыми частицами, состоит из материала породы, имеющего характер системы с одинарной проницаемостью и одинарной пористостью, и моделированием 46 ячеек, имеющих насыщение твердыми частицами меньше или равное соответствующего критического насыщения твердыми частицами на этапе роста канала-"червоточины", на которой ячейки содержат две различные взаимосвязанные среды, состоящих из материала породы и среды канала-"червоточины", в которой подвижность флюида есть функция от насыщения твердыми частицами. Сетка может иметь 1, 2 или 3 измерения и может быть привязана к декартовой, радиальной, сферической или угловой прямоугольной системам координат, наиболее подходящим для предложенной обрабатываемой зоны. В некоторых вариантах реализации изобретения модель может включать искусственное разделение на часть ячеек, обозначенных как ячейки породы, остающихся ячейками породы в ходе процесса моделирования, в которых подвижность флюида не увеличивается, несмотря на растворение кислотой части среды породы, и оставшуюся часть ячеек, превращающуюся в ячейки канала-"червоточины", которые могут перехо-

доть от этапа инициации канала-"червоточины", на которой они ведут себя как ячейки породы, к этапу роста канала-"червоточины", на которой они ведут себя как двойная среда, ячейки с двойной проницаемостью, зависящей от насыщения твердыми частицами. В некоторых вариантах реализации изобретения разбивка может также включать ячейку(и), соответствующую источнику(ам) кислоты или нагнетательной скважине(ам), и необязательную ячейку(и), соответствующую утечке(ам) кислоты или эксплуатационной скважине(ам). В некоторых вариантах реализации изобретения источник(и) и/или утечка(и) могут быть расположены как буферный элемент(ы) на границах или в краевых областях моделируемой обрабатываемой зоны.

В некоторых вариантах реализации изобретения способ может также включать заполнение 22 компьютерной модели интенсификации притока петрофизическими характеристиками имитируемой обрабатываемой зоны, такими как пористость, проницаемость и отношения коэффициентов песчаности. Эти данные могут быть получены из экспериментальных данных или прямым измерением обрабатываемой зоны и/или образцов керна, представляющих обрабатываемую зону. Если экспериментальные данные или прямые измерения отсутствуют, характеристики можно оценивать по геофизическим методикам оценки. Например, обрабатываемую зону можно рассматривать как имеющую гомогенные или гетерогенные характеристики. В некоторых вариантах реализации изобретения проницаемость породы можно рассчитать по закону Дарси, исходя из начального падения давления на образце керна.

В соответствии с некоторыми вариантами реализации изобретения в начале этапа 30 инициации канала-"червоточины" модель ведет себя как система с одинарной проницаемостью и одинарной пористостью. Когда кислота поступает в модель через источник, такой как, например, нагнетательная скважина, соединения, например заканчивания скважины, определены таким образом, что источник только вступает в контакт с породой. В некоторых вариантах реализации изобретения порода искусственно разделена на две среды, одна из которых является предшественником скопления червоточин, которые вместе упоминаются как канал-"червоточина". На этом этапе среды рассматриваются как изолированные друг от друга, так что кислота не может достичь предшественника червоточин. Это достигается заданием очень низких значений, например 0,01, 0,001, 0,0001, 0,00001 или 0,000001 или т.п., переменной, упоминаемой в данном документе как коэффициент переноса соединения порода-канал "червоточина" или сигма (σ), который аналогичен коэффициенту переноса соединения порода-трещина, используемому при компьютерном моделировании системы трещина-порода.

Исходно химическая реакция протекает в породе М, при этом увеличения проницаемости не происходит. После растворения определенного количества материала из породы в модели принимается, что поры достигли достаточно большого размера, чтобы стать равными или превысить размер пор, соответствующий критическому уровню насыщения твердыми частицами, после чего происходит переход к модели 36, в которой начинается инициация червоточин F. Затем применяется множитель к сигма, чтобы восстановить ее значение в соответствующих ячейках до единицы, что позволяет кислоте в модели достичь второй среды канала-"червоточины" и начать образование канала-"червоточины". Это соответствует этапу 28 модели с двойной пористостью и двойной проницаемостью, которая называется также этапом роста канала-"червоточины".

Когда кислота достигает ячеек канала-"червоточины", в которых сигма равна единице, начинается этап 30 роста канала-"червоточины". Перенос кислоты и реакция теперь имеют место в обеих средах породы и канала-"червоточины" М, F, которые интенсивно конкурируют за доступную кислоту, тем не менее в некоторых вариантах реализации изобретения повышение проницаемости ограничено червоточинной F. Это эквивалентно допущению, в некоторых вариантах реализации изобретения, что растворение породы М не приводит к образованию связанных каналов, которые могут значительно усиливать поток. В некоторых вариантах реализации изобретения это управляется таблицей увеличения подвижности в зависимости от насыщения твердыми частицами, которая может быть получена в результате экспериментальных исследований, например, с использованием образца керна из предполагаемой обрабатываемой зоны или представительного образца обрабатываемой зоны, как указано выше. На этом этапе проницаемость канала-"червоточины" изменяется с течением времени. В некоторых вариантах реализации изобретения максимальную проницаемость канала-"червоточины" можно также рассчитать по закону Дарси; эквивалентная проницаемость рассчитывается с использованием средневзвешенного арифметического усреднения (уравнение 5) и с учетом конечного экспериментального падения давления:

$$k_f = \frac{k - NTG_m \cdot k_m}{NTG_f} \quad \text{Уравнение (5)}$$

где k = проницаемость, мД;

NTG = песчанистость породы, безразмерная;

m, f = порода и канал-"червоточина" соответственно

В некоторых вариантах реализации изобретения отношение NTG , т.е. объемную долю керна, которая рассматривается как проницаемая порода или проницаемый канал-"червоточина", можно оценить визуальным осмотром металлических образцов из экспериментов по заводнению керна.

Червоточины F можно рассматривать как один кластер, иными словами, они могут не быть пред-

ставлены дискретно.

В некоторых вариантах реализации изобретения распространение канала-"червоточины" может стартовать с самого начала, т.е. индукционный период отсутствует и, следовательно, критическое насыщение твердыми частицами аналогично исходному насыщению твердыми частицами. В этих вариантах реализации изобретения инициация червоточин может имитироваться заданием более высокого множителя для подвижности по отношению к насыщению твердыми частицами в зоне канала-"червоточины".

В некоторых вариантах реализации изобретения исходно может рассматриваться модель, в которой керн насыщен водой или пластовым флюидом другого состава, за исключением нагнетательной буферной ячейки, соответствующей нагнетательной скважине, которая может содержать раствор кислоты или другой флюид, эквивалентный нагнетаемому обрабатываемому флюиду. Из-за растворения кислотой материала породы объем твердого вещества трансформируется в объем флюида, таким образом увеличивая пористость флюидного пространства.

В некоторых вариантах реализации изобретения ячейки и породы, и канала-"червоточины" исходно могут моделироваться на этапе 20 как состоящие из материала породы, имеющего характер системы с одинарной проницаемостью и одинарной пористостью. Когда стандартный объем, состоящий из одной ячейки или произвольной группы ячеек, достигает среднего насыщения твердыми частицами, равного соответствующему критическому насыщению твердыми частицами ячейки или группы ячеек, начинается этап 30 роста канала-"червоточины". После начала этапа 30 роста канала-"червоточины" реакция между HCl и карбонатом кальция в породе продолжает протекать в червоточине, растворяя твердое вещество и, следовательно, уменьшая насыщение твердыми частицами. Затем компьютерная модель интенсификации притока переходит к варианту, в котором подвижность любого флюида в этой ячейке может быть умножена на множитель, коэффициент подвижности, который был функцией насыщения твердыми частицами, и эта функция в некоторых вариантах реализации изобретения может быть предоставлена компьютерной модели интенсификации притока в табличной форме, созданной на основе экспериментальных данных, если они доступны.

В некоторых вариантах реализации изобретения начальное насыщение ячейки твердыми частицами может исходно соответствовать коэффициенту подвижности 1,0, но, поскольку насыщение твердыми частицами уменьшается, по мере растворения породы, до значений ниже критического насыщения твердыми частицами, коэффициент подвижности увеличивается в соответствии с функцией коэффициента подвижности или таблицей. В некоторых вариантах реализации изобретения при данном насыщении ячейки канала-"червоточины" могут достигать максимальной проницаемости, определенной экспериментально или путем оценки, которая используется в дальнейшем.

В некоторых вариантах реализации изобретения, как иллюстрировано на фиг. 6, экспериментальные результаты 50 исследований заводнения керна могут быть получены, например, закачкой раствора реагента в ячейку, содержащую стандартный образец керна подземного пласта или другой среды, подлежащей обработке. В некоторых вариантах реализации изобретения для соответствия между экспериментальными результатами 50 и компьютерной модели интенсификации притока следует предпринять исследования 60 чувствительности, чтобы определить влияние различных параметров на форму кривых падения давления. За получением этой информации может следовать процесс ручного согласования 70, который проводится до получения калибровочной кривой к нужной точности. В некоторых вариантах реализации изобретения исследования чувствительности 60 могут исходно проводиться с использованием заданной скорости закачки. В некоторых вариантах реализации изобретения исходно может рассматриваться условие насыщения закрытого канала-"червоточины", т.е. насыщения твердыми частицами, при котором подвижность флюида в червоточине начинает увеличиваться. Так можно получить кривые смоделированного падения давления на обрабатываемой зоне как функции совокупного закачанного объема пор, из которых кривая, наилучшим образом соответствующая экспериментальным данным, может быть согласована вручную для определения критического насыщения твердыми частицами, при котором подвижность в червоточине начинает увеличиваться.

Далее, в некоторых вариантах реализации изобретения методика согласования вручную может последовательно использоваться для определения чувствительности кривой падения давления к насыщению открытого канала-"червоточины"; константы скорости реакции в червоточине A в уравнении (1) для ячеек канала-"червоточины"; константы скорости реакции в породе для ячеек канала-"червоточины"; насыщения инициации канала-"червоточины", т.е. среднего насыщения произвольной группы ячеек, ниже которого ячейки породы и ячейки канала-"червоточины" начинают сообщаться; коэффициента переноса порода-канал-"червоточина", т.е. коэффициента переноса между ячейкой породы и ячейкой канала-"червоточины", известный также как σ ; и т.п.

В некоторых вариантах реализации изобретения при наличии информации о базовых значениях, полученных из исследований чувствительности 60, можно произвести ручную калибровку 70 кривой падения давления. В некоторых вариантах реализации изобретения могут быть использованы те же скорости закачки и значения для базового варианта, позволяющие изменять следующие переменные, в определенном порядке относительной важности:

- а) константа скорости реакции в червоточине;

- b) насыщение в закрытой червоточине;
- c) константа скорости реакции в породе;
- d) насыщение в открытой червоточине.

В некоторых вариантах реализации изобретения промежуточные точки в таблице зависимости коэффициента подвижности от насыщения твердыми частицами можно подстраивать точнее и повторять моделирование до возникновения хорошего соответствия наклона кривой падения давления.

В некоторых вариантах реализации изобретения для первой заданной ячейки породы может быть построен график зависимости насыщения твердыми частицами от экспериментального падения давления для идентификации насыщения запуска инициации канала-"червоточины", т.е. переменной, сдвигающей ниспадающую ветвь кривой падения давления в горизонтальном направлении, как видно из исследований чувствительности 60. Затем эти значения можно использовать для компьютерного моделирования в соответствии с экспериментами при разных скоростях закачки, и результаты сопоставить с экспериментальными данными, повторяя процедуру до достижения корректного соответствия с выбранными экспериментами.

В некоторых вариантах реализации изобретения полученное наилучшее соответствие может предоставить наилучшие для использования в модели значения константы скорости реакции в породе, константы скорости реакции в червоточине, насыщения твердыми частицами, запускающего инициацию канала-"червоточины", таблицы коэффициента подвижности по отношению к насыщению твердыми частицами и/или коэффициента переноса порода-трещина. В некоторых вариантах реализации изобретения один или более из параметров может рассматриваться как фиксированный, например коэффициент переноса порода-трещина может быть принят равным 1,0, при этом он не рассматривается как неопределенный параметр.

В некоторых вариантах реализации изобретения значения параметров, полученные из калибровки 70, можно использовать в компьютерной модели интенсификации притока, и результаты, полученные для профиля падения давления и порового объема для прорыва, можно сопоставить с экспериментальными результатами. Следует отметить, что данный набор значений параметров может быть не единственным, а, скорее, одним из возможных вариантов некоторых значимых решений. При необходимости, можно произвести дополнительные экспериментальные измерения, чтобы дополнительно подтвердить или повысить точность значений параметров.

При необходимости, полученные параметры могут быть использованы в качественном анализе 80 для определения изменения в насыщении твердыми частицами в ячейках породы и ячейках канала-"червоточины" в начале и в конце закачки для различных заданных скоростей закачки. Качественный анализ 80 должен подтвердить, что на поверхности керна происходит очень слабое растворение, например, на это указывает незначительное изменение в среде породы при продвижении канала-"червоточины" через весь керн. В некоторых вариантах реализации изобретения падения давления при различных скоростях закачки, полученные при помощи компьютерного моделирования, могут быть нанесены на график вместе с экспериментальными результатами для подтверждения хорошего соответствия результатов моделирования экспериментальным данным, особенно убедительно это подтверждают наличие плато на нисходящей ветви кривой начального падения давления и точка прорыва.

В некоторых вариантах реализации изобретения, когда модель тщательно откалибрована экспериментальными результатами, способ включает нанесение 90 на график закачанных поровых объемов до прорыва как функции скорости закачки. В некоторых вариантах реализации изобретения это может оказаться эффективным средством проектирования технологии вызова притока для получения оптимальной скорости закачки, соответствующей скорости закачки, при которой для получения максимального увеличения проницаемости можно закачивать наименьшее количество жидкости, которое часто коррелирует с образованием единственной канала-"червоточины". Поровый объем до прорыва представляет собой количество закачанных поровых объемов кислоты, после которых не наблюдается дальнейшего значительного уменьшения в падении давления. В некоторых вариантах реализации изобретения на этом графике может быть отражено отмеченное ранее соответствие между экспериментальными данными и результатами моделирования. В некоторых вариантах реализации изобретения можно получить дополнительные смоделированные точки прогоном компьютерной модели с введенными в модель дополнительными скоростями закачки, что может идентифицировать 100 оптимальную скорость закачки, при которой можно достичь образования канала-"червоточины" при минимальном количестве закачанной кислоты.

Следовательно, компьютерная модель интенсификации притока обеспечивает инструмент для эффективного проектирования кислотной обработки под давлением ниже давления гидроразрыва, например, параметры, полученные с использованием компьютерной модели интенсификации притока, можно применять для обработки подземного пласта с оптимальной скоростью закачки кислоты, определенной при помощи моделирования предполагаемой обрабатываемой зоны. Применение имеющейся в продаже численной компьютерной модели интенсификации притока обеспечивает гибкость использования, которая создает широкий спектр потенциальных применений, таких как компьютерное моделирование скважины и моделирование в масштабе месторождения для прогнозирования увеличения добычи в результате интенсификации притока, причем моделирование может включать применения в системах с гетеро-

генными характеристиками, так же как с различными парами порода-флюид в 1, 2 или 3 измерениях.

В соответствии с вариантами реализации изобретения способ может быть использован с гомогенными или гетерогенными характеристиками. В соответствии с некоторыми вариантами реализации изобретения, когда характеристики являются гетерогенными, для генерирования равновероятных реализаций петрофизических свойств, например пористости, проницаемости и т.п., можно использовать стохастические методы. Для оценки репрезентативности конкретной реализации или группы реализаций, сгенерированных предварительно заданными входными параметрами, в некоторых вариантах реализации изобретения допускается отбор, основанный на включении экспериментальных индикаторных данных, который упоминается в данном документе как "рабочий цикл отбора на основе отклика индикатора".

В рабочем цикле отбора на основе отклика индикатора экспериментальные данные отклика индикатора могут быть подтверждены проведением численного компьютерного моделирования, в котором модель ядра исходно содержит флюид-носитель, такой, например, как вода, а затем заводится аналогом флюида-носителя, содержащим не вступающий в реакцию индикаторный материал, моделируемый как дополнительный компонент флюида-носителя с конкретной концентрацией. В результате этого моделирования имеющиеся экспериментальные данные, такие как кривые прорыва индикатора и измерения падения давления, могут быть сопоставлены с данными моделирования, как проиллюстрировано на фиг. 7, на которой показаны типичные результаты сравнения для различных наборов реализаций. Количественный расчет ошибки можно произвести по уравнению (6)

$$\text{Err} = \sqrt{\sum \frac{(S_i - O_i)^2}{\sigma_i^2}} \quad \text{Уравнение (6)},$$

где Err обозначает остаток общей погрешности для компьютерного моделирования, относящейся к экспериментальным данным;

S_i - отдельные опорные точки, полученные численным моделированием;

O_i - отдельные экспериментальные опорные точки и

σ_i - взвешивающий параметр, который может применяться к каждой независимой паре опорных точек.

В соответствии с некоторыми вариантами реализации изобретения затем для отбора реализаций можно использовать пороговое значение, исключающее любые наборы, которые не соответствуют критерию, и, следовательно, не должны быть потенциально подходящими для дальнейшей калибровки в исследованиях кислотной обработки. Как указано выше, его можно использовать для выбора конкретной реализации или полного набора стохастических реализаций, созданных из одних и тех же входных параметров.

На фиг. 8 представлен общий вид последовательности операций 200, включающих итеративный анализ данных 210, петрофизическое моделирование 220, индикаторное компьютерное моделирование 230, анализ погрешностей 240 и, если ошибка соответствует критерию точности, проведение окончательного моделирования кислотной обработки 250.

Примеры

Данный пример моделирует поведение системы в экспериментах по нагнетанию соляной кислоты, выполненных на образцах известняковых кернов с месторождения Pink Desert, описанных в Zakaria, A.S., Nasr-El-Din, H.A. & Ziauddin, M., 2013. Impact of Pore-scale Heterogeneity on Carbonate Stimulation Treatments. Lafayette, SPE. Цилиндрические образцы ядра (3,8 см (1,5 дюйма) в диаметре, длиной 15,2 см (6 дюймов), с общим объемом 174 см³), выдержанные при температуре 65,6°C (150°F), сначала залили водой. Эту воду вытеснили раствором соляной кислоты (15% по массе), которая растворила породу. Измеряли падение давления на керне и результаты использовали для подтверждения модели. Эксперимент повторяли для различных скоростей закачки (2,0, 5,0 и 7,5 см³/мин) с использованием различных образцов с одинаковыми характеристиками.

Для моделирования кислотной обработки под давлением ниже давления гидроразрыва была использована численная модель, введенная в систему моделирования пласта-коллектора ECLIPSE. Характеристики модели включали использование двойной проницаемости, химических реакций, многокомпонентной водной фазы, твердой фазы и коэффициента подвижности, зависящего от насыщения твердыми частицами.

Использованная сетка 300 показана на фиг. 9, она состояла в общей сложности из 2004 ячеек 310, половина из которых попеременно задавалась как материал породы, а другая половина попеременно задавалась как среда канала-"червоточины". На каждой границе были две большие буферные ячейки, имитирующие закачку флюида 320 и источник отдачи нефти 330.

Общая длина ядра (15,24 см) была дискретизирована на 1000 центральных ячеек размером $\Delta x = 0,1524$ мм каждая. Другие две длины были рассчитаны таким образом, чтобы создать площадь квадратного поперечного сечения, эквивалентную кругу в образце ядра, что привело к размеру $\Delta y = \Delta z = 3,376$ см. Ячейки породы и ячейки канала-"червоточины" имели одинаковый размер, который был модифицирован с использованием переменной песчаности (NTG), определенной как часть объема соответствующего типа (порода или канал-"червоточина") от общего объема ядра или пласта.

Для характеристики модели были использованы петрофизические характеристики, такие как пористость, проницаемость и коэффициент песчаности. Из-за отсутствия экспериментальных данных в данном примере модель была задана как гомогенная; тем не менее эта модель может использоваться и в варианте гетерогенных свойств. Статические свойства, использованные для характеристики модели, приведены в табл. 1.

Таблица 1
Статические свойства для образцов керна Pink Desert
при различных скоростях закачки

Свойство	Скорость закачки		
	2,0 мл/мин	5,0 мл/мин	7,5 мл/мин
Пористость, %	23	24	26
Объем пор, мл	40	42	45
Проницаемость, мД	43	51	74
Максимальная проницаемость канала- «червоточины», мД	8,833	26,489	38,245
Песчанистость породы, %	99	99	99
Песчанистость канала- «червоточины», %	1	1	1

Проницаемость была рассчитана по закону Дарси, с использованием начального падения давления в эксперименте. Сначала это использовалось применительно ко всей сетке, но проницаемость канала-«червоточины» изменялась с течением времени. Таким образом, максимальная проницаемость канала-«червоточины» тоже была рассчитана по закону Дарси; с эквивалентной проницаемостью, рассчитанной с использованием средневзвешенного арифметического усреднения (уравнение (5)) и с учетом конечного экспериментального падения давления:

$$k_f = \frac{k - NTG_m \cdot k_m}{NTG_f} \quad \text{Уравнение (5)}$$

k = проницаемость, мД;

NTG = песчанистость породы, безразмерная;

M, f = порода и канал-«червоточина» соответственно.

Отношение NTG , т.е. объемная доля керна, которая рассматривалась как проницаемая порода или проницаемый канал-«червоточина», оценили путем визуального осмотра металлических образцов из экспериментов.

В модели сначала рассматривалось, что керн насыщен водой, за исключением нагнетательной буферной ячейки, которая содержала раствор кислоты, эквивалентный закачиваемому, т.е. 15% HCl по массе. Ячейки, представляющие образец керна, также содержали 50% их порового объема в качестве реакционно-способных твердых частиц, например, для ячейки с общим объемом 1 м³ и заданной пористостью 46%, 0,23 м³ должно быть жидким поровым объемом, 0,23 м³ должно быть реакционно-способной породой и остальные 0,54 м³ - не вступающей в реакцию породой. Соответственно, введенное значение обычной петрофизической пористости было удвоено, поскольку половина ее должна быть отведена для реакционно-способного твердого материала.

В модель были заложены две моделируемые скважины: нагнетательная, как крайняя слева ячейка, и источник отдачи нефти, как крайняя справа ячейка. Нагнетательная ячейка может рассматриваться как источник кислоты для керна, а источник отдачи - как сток. Источник нагнетания поставляет 15% по массе раствор HCl с постоянной скоростью, т.е. 2,0, 5,0 или 7,5 мл/мин, в зависимости от пробного запуска, а производящая скважина сохранялась при постоянном давлении 100 атм. Максимальный шаг по времени был задан равным 3,6 с.

Исходно, оба типа ячеек: и породы, и канала-«червоточины», моделировались как состоящие из материала породы, имеющего характер системы с одинарной проницаемостью и одинарной пористостью. Репрезентативный объем [конкретной ячейки канала-«червоточины» или произвольной группы ячеек] достигал среднего насыщения твердыми частицами, равного соответствующему критическому насыщению твердыми частицами ячейки или группы ячеек, принятый за 50% в данном примере. После того как начинался период роста канала-«червоточины», реакция между HCl и карбонатом кальция в породе продолжалась в червоточине, растворяла твердые частицы и, таким образом, уменьшала насыщение твердыми частицами. Затем в компьютерной модели интенсификации притока считалось, что подвижность любого флюида в этой ячейке должна быть умножена на множитель, коэффициент подвижности, который

был функцией насыщения твердыми частицами.

На фиг. 10 показано графическое представление примера этой информации, которая была задана компьютерной модели интенсификации притока в табличном виде.

Если ячейка исходно имела 50%-ное насыщение твердыми частицами, как в этом примере, это соответствовало коэффициенту подвижности 1,0. Когда насыщение твердыми частицами становилось меньше 49%, по мере растворения породы, коэффициент подвижности увеличивался. При заданном насыщении, 42% в данном примере, ячейки канала-"червоточины" достигали своей максимальной проницаемости, которая указана в табл. 1, и был применен максимальный коэффициент, 203,21. Чтобы использовать в различных экспериментах одну и ту же таблицу, на базе ячейки был определен дополнительный коэффициент по методике, аналогичной масштабированию предельного значения относительной проницаемости.

Для согласования экспериментальных результатов с данными компьютерной модели интенсификации притока были проведены исследования чувствительности, чтобы определить влияние различных параметров на форму кривых падения давления. С этой информацией процесс ручного согласования проводился до получения калибровочной кривой до необходимой точности. Исследования чувствительности в данном примере были проведены с использованием скорости закачки 2,0 мл/мин. Исходно, авторы изобретения рассматривали насыщение в "закрытой червоточине", т.е. насыщение твердыми частицами, при котором подвижность флюида в червоточине начинает увеличиваться. Результаты показаны на фиг. 11-16.

Значение насыщения в закрытой червоточине для базового варианта составляло в данном примере 50%, при этом было видно, что происходит мгновенное увеличение подвижности. Эти данные показывают, что насыщение в закрытой червоточине оказывает влияние на наклон; тем не менее наибольшее влияние оно оказывает на суммарные закачанные поровые объемы в начальной части нижнего плато на кривой падения давления. В данном примере результаты очень чувствительны к этому значению: изменение в третьем десятичном разряде влияет на результаты. Чем ниже значение, тем труднее добиться падения давления.

Далее, авторы изобретения рассмотрели чувствительность кривой падения давления к насыщению в открытой червоточине. Результаты приведены на фиг. 11 и 12.

В данном примере насыщение в открытой червоточине оказывало наименьшее относительное влияние по сравнению с другими переменными в данном примере, но оно изменяло форму кривой вблизи прорыва. Отмечено, что более низкое насыщение не достигается, пока растворение не продвинется до определенной степени. Чем выше было это насыщение, тем проще было достичь нижнего плато на кривой падения давления.

Далее, авторы изобретения рассмотрели чувствительность кривой падения давления к константе А скорости реакции в червоточине в уравнении (3) для ячеек канала-"червоточины". Результаты приведены на фиг. 13. В данном примере значение для базового варианта составляло 300000 л/ч.

В данном примере константа скорости реакции в червоточине резко меняет наклон кривой падения давления, поскольку она влияет на скорость растворения в среде, которая делает свой вклад в проницаемость. В данном примере следует отметить также, что при очень высоких значениях результаты для этого параметра растут более интенсивно. Скорее всего, в данном примере это связано с тем, что в данной временной шкале реакция протекает практически мгновенно. Более высокие константы скорости реакции в данном примере приводят к более быстрому растворению и, следовательно, к более резкому падению давления.

Далее авторы изобретения рассмотрели чувствительность кривой падения давления к константе скорости реакции породы для ячеек канала-"червоточины". Результаты приведены на фиг. 14. Значение для базового варианта составляло 3000 л/ч.

Константа скорости реакции породы в данном примере тоже оказывала влияние на наклон кривой падения давления, хотя и сравнительно меньший, чем константа скорости реакции в червоточине. Было сделано интересное наблюдение, что две среды конкурировали за имеющуюся кислоту, так что более высокая скорость реакции в породе в данном примере соответствует наличию меньшего количества кислоты в червоточине, следовательно, более медленному растворению и росту проницаемости, что приводит в конце концов к более медленному снижению падения давления.

Далее авторы изобретения мы рассмотрели насыщение на момент инициации канала-"червоточины", т.е. насыщение, ниже которого ячейки породы и ячейки канала-"червоточины" начинают сообщаться. Результаты представлены на фиг. 15. Для базового варианта значение на момент начала общения канал-"червоточина"-порода в данном примере составляло 50%.

Насыщение инициации канала-"червоточины" в данном примере может рассматриваться как переменная, которая контролирует протяженность начального плато: более низкое значение предоставляет больше времени до начала растворения канала-"червоточины". Отметим, что большого влияния на наклон падения давления в данном примере, после того как произошла инициация, не оказывалось, поскольку процесс продолжался нормально.

Далее авторы изобретения рассмотрели коэффициент переноса порода-канал-"червоточина", т.е.

коэффициент для переноса между ячейками породы и ячейками канала-"червоточины", известный также как σ . Результаты представлены на фиг. 16. Для базового варианта значение в данном примере составляло 1,0.

Коэффициент переноса порода-канал-"червоточина" в данном примере оказывал сравнительно небольшое влияние на наклон кривой снижения падения давления. Он влиял на конечное падение давления при значениях σ ниже единицы, поскольку присутствовало дополнительное сопротивление. С учетом этого анализа для следующего этапа было зафиксировано значение 1,0, и оно не рассматривалось на следующем этапе данного примера.

Затем с использованием информации, полученной в исследованиях чувствительности, произвели ручную калибровку кривой. В эксперименте с 2,0 мл/мин авторы изобретения начали со значений базового варианта и дали возможность изменяться следующим переменным, в порядке относительной значимости:

- a) константа скорости реакции в червоточине;
- b) насыщение в закрытой червоточине;
- c) константа скорости реакции в породе;
- d) насыщение в открытой червоточине.

Затем, при необходимости, точно подстраивали промежуточные точки в таблице зависимости коэффициента подвижности от насыщения твердыми частицами и повторяли процедуру до достижения хорошего соответствия наклона.

Затем нанесли на график насыщения твердыми частицами для первой заданной ячейки породы как функции экспериментального падения давления и идентифицировали насыщение запуска инициации канала-"червоточины", т.е. переменную, которая сдвигает кривую снижения падения давления в горизонтальном направлении, как показали исследования чувствительности. Затем использовали эти значения в экспериментах с 5,0 и 7,5 мл/мин и сопоставляли результаты с экспериментальными данными, повторяя процедуру до получения устойчивого соответствия для всех экспериментов.

Наилучшее соответствие, полученное в данном примере, достигалось при следующих параметрах:

константа скорости реакции в породе = 1000 мл/(моль-ч);

константа скорости реакции в червоточине = 300000 мл/(моль-ч);

насыщение твердыми частицами инициации канала-"червоточины" = 48,5%;

таблица коэффициента подвижности по отношению к насыщению твердыми частицами = см. табл. 2 и фиг. 17;

коэффициент переноса порода-трещина = 1,0, т.е. он не рассматривался как неопределенный параметр.

Таблица 2
Таблица коэффициента подвижности по отношению
к насыщению твердыми частицами
для наилучшего соответствия

Коэффициент подвижности	Насыщение твердыми
	частицами
203	0,42
183	0,44
102	0,47
41	0,48
1	0,50

Затем значения вышеупомянутого параметра в данном примере были использованы в компьютерной модели интенсификации притока, и результаты, полученные для профиля падения давления и порового объема до прорыва, были сопоставлены с экспериментальными данными. Следует отметить, что данный набор значений параметров в данном примере является не единственным, а, скорее, одним из возможных вариантов. Дополнительные экспериментальные измерения могут дополнительно подтвердить уместность их использования в данном примере.

Качественный анализ, фиг. 18, показывает изменение насыщения твердыми частицами в ячейках породы и ячейках канала-"червоточины" в начале и в конце закачки для случая 2,0 мл/мин.

Видно, что на поверхности зерна происходит очень слабое растворение в данном примере, на это указывает незначительное изменение в среде породы при продвижении канала-"червоточины" через весь керн, которое наблюдалось через среду канала-"червоточины".

Падения давления для случаев 2,0, 5,0 и 7,5 мл/мин, полученные посредством моделирования, нанесены на график относительно экспериментальных результатов на фиг. 19, 20 и 21 соответственно.

Хорошее согласие между результатами экспериментов и моделирования можно видеть при первых двух скоростях закачки. Модель инициации канала-"червоточины" прекрасно подходила для моделирования существования начального плато на кривой падения давления. Наклон был хорошо выраженным в

ходе процесса растворения, и, самое важное, хорошо улавливалась точка прорыва.

Для результатов варианта 7,5 мл/мин в данном примере наблюдалось отличие в наклоне кривой падения давления по сравнению с результатами моделирования. Возможно, что в этом случае экспериментальные данные имели два наклона, которые могли быть связаны с непрореагировавшей кислотой, вытекающей через концевую часть канала-"червоточины" и повышающей проницаемость породы перед концевой частью. Компьютерная модель интенсификации притока в данном примере может быть неспособна учитывать этот фактор при выбранных значениях параметра; тем не менее для двух важных характеристик проявилось соответствие: период инициации канала-"червоточины" и поровый объем до прорыва.

После тщательной калибровки модели с использованием экспериментальных результатов следующим шагом была подготовка функции закачанного порового объема до прорыва от скорости закачки. Это представляет собой эффективный инструмент проектирования интенсификации притока для определения оптимальной скорости закачки, при которой можно закачивать наименьшее количество флюида для достижения максимального увеличения проницаемости, которое часто коррелирует с образованием единственного канала-"червоточины". Поровый объем до прорыва представляет собой количество закачанного поровых объемов кислоты, после которых не наблюдается дальнейшего значительного уменьшения в падении давления. В данном примере эти значения могут быть нанесены на график кривой падения давления, показанной на фиг. 19-21. Затем для получения более подробной кривой моделирование распространяли на другие скорости закачки (0,01, 1,00, 3,00, 4,00 и 6,00 мл/мин). Полученный график представлен на фиг. 22.

На этом графике отражено отмеченное ранее согласие между экспериментальными данными и результатами моделирования.

Тем не менее более важна форма кривой с дополнительными точками моделирования, которая ясно указывает на существование оптимума скорости закачки в окрестности 3,0 мл/мин.

Данный пример показывает, что процедура численного моделирования может быть осуществлена на имеющейся в продаже компьютерной модели продуктивного пласта для моделирования кислотной обработки под давлением ниже давления гидроразрыва в соответствии с принципами настоящего изобретения. Характеристики модели могут включать использование двойной проницаемости, химических реакций, многокомпонентной водной фазы, твердой фазы и коэффициента подвижности по отношению к насыщению твердыми частицами.

В данном примере модель была подтверждена экспериментальными данными, полученными на образцах известняка с месторождения Pink Desert, которые были затоплены соляной кислотой при различных скоростях закачки. После калибровки модели было достигнуто хорошее согласие между экспериментальным и полученным в результате моделирования профилями падения давления. Кроме того, модель была использована для построения кривой получения порового объема до прорыва, на которой можно видеть оптимальную скорость закачки. Это обеспечивает инструмент для эффективного проектирования кислотной обработки под давлением ниже давления гидроразрыва.

Имеющаяся в продаже численная компьютерная модель интенсификации притока обеспечивает гибкость в использовании, которая создает широкий спектр потенциальных применений, таких как моделирование в масштабах скважины и месторождения для прогнозирования повышения добычи в результате интенсификации притока, которое может включать применения с гетерогенными свойствами, так же как различные пары порода-флюид в 1, 2 или 3 измерениях.

Хотя варианты реализации изобретения были проиллюстрированы и подробно описаны в графических материалах и вышеизложенном описании, их следует считать иллюстративными и не имеющими характера ограничений, при этом должно быть понятно, что были показаны и описаны только некоторые варианты реализации изобретения и что все изменения и модификации, которые относятся к сущности и объему описанных вариантов реализации изобретения, должны быть защищены. Следует понимать, что, хотя применение таких слов, как идеально, желательно, предпочтительный, предпочтительно, предпочтительный, более предпочтительный или используемый в качестве примера, использованные в приведенном выше описании, указывает, что описанная ими особенность может быть более желательной или характерной, тем не менее, она может не быть необходимой и варианты реализации изобретения, в которых она отсутствует, могут рассматриваться как входящие в объем изобретения, определенный представленной ниже формулой изобретения. При прочтении формул, следует иметь в виду, что использование единственного числа, выражений "по меньшей мере один" или "по меньшей мере одна часть" не ограничивает формулу единственным числом, если в формуле специально не оговорено противоположное. Если используется термин "по меньшей мере часть" и/или "часть", пункт может включать часть и/или весь элемент, если специально не оговорено противоположное.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ образования канала-"червоточины" в пористой среде с использованием прогона (20) компьютерной модели интенсификации притока, в котором прогон (20) компьютерной модели включает разбивку (22) обрабатываемой зоны пористой среды на множество ячеек, содержащее первую

часть, обозначенную как ячейки породы, и вторую часть, обозначенную как ячейки канала-"червоточины";

заполнение (24) компьютерной модели интенсификации притока статическими характеристиками пористой среды и кинетическими параметрами реакции при взаимодействии пористой среды с реагентом в обрабатывающем флюиде;

моделирование (26) ячеек породы, при том что среда ячеек породы состоит из материала породы, имеющего характер системы с одинарной проницаемостью и одинарной пористостью;

моделирование (28) ячеек канала-"червоточины" на этапе инициации канала-"червоточины", при том что среда соответствующих ячеек на этапе инициации канала-"червоточины" имеет насыщение твердыми частицами выше соответствующего критического насыщения твердыми частицами и состоит из материала породы, имеющего характер системы с одинарной проницаемостью и одинарной пористостью;

моделирование (30) по меньшей мере части ячеек канала-"червоточины" на этапе роста канала-"червоточины", причем соответствующие ячейки канала-"червоточины" имеют насыщение твердыми частицами, которое меньше или равно соответствующему критическому насыщению твердыми частицами, при этом ячейки этапа роста канала-"червоточины" содержат две различные взаимосвязанные среды, состоящие соответственно из материала породы и среды канала-"червоточины", в котором подвижность флюида является функцией насыщения твердыми частицами;

получение (32) параметров закачки обрабатывающего флюида, содержащих скорость закачки обрабатывающего флюида; и

закачку (34) обрабатывающего флюида внутрь обрабатываемой зоны пористой среды в соответствии с параметрами закачки обрабатывающего флюида, полученными компьютерной моделью интенсификации притока, с образованием канала-"червоточины",

при этом в компьютерной модели интенсификации притока используют метод конечных разностей, и способ включает в себя многократный прогон компьютерной модели интенсификации притока для получения точек данных, содержащих поровый объем до прорыва как функцию скорости закачки обрабатывающего флюида, для определения скорости закачки обрабатывающего флюида, соответствующей минимальному поровому объему для прорыва.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что компьютерная модель интенсификации притока учитывает присутствие в обрабатываемой зоне многокомпонентного флюида, выбранного из группы, состоящей из газа, водной и нефтяной фаз.

3. Способ по п.1, отличающийся тем, что компьютерная модель интенсификации притока учитывает присутствие в обрабатываемой зоне множества твердых фаз.

4. Способ по п.1, отличающийся тем, что обрабатываемая зона представляет собой подземный пласт, содержащий породу на основе карбоната кальция, а обрабатывающий флюид содержит кислоту, доставляемую к обрабатываемой зоне через ствол скважины, проходящий через подземный пласт.

5. Способ по п.1, отличающийся тем, что для описания различия в поведении разных типов породы в соответствующих ячейках подвижность флюида как функция насыщения твердыми частицами задается независимо для каждой ячейки.

6. Способ по п.1, отличающийся тем, что моделирование инициации канала-"червоточины" учитывает растворение материала породы для повышения проницаемости и порового объема в соответствующих ячейках.

7. Способ по п.1, дополнительно включающий присвоение наиболее низких значений коэффициента переноса (сигма) границе раздела порода-трещина при моделировании этапа инициации канала-"червоточины" так, чтобы реагент в обрабатывающем флюиде не взаимодействовал с материалом канала-"червоточины", при том что среда ячеек канала-"червоточины" содержит материал породы и среды канала-"червоточины".

8. Способ по п.1, дополнительно включающий переход к моделированию роста канала-"червоточины" при моделировании этапа инициации канала-"червоточины", увеличением коэффициента переноса границы раздела порода-трещина выше соответствующих исходных значений, при том что, среда ячеек содержит материал породы и среды канала-"червоточины", при этом на этапе инициации канала-"червоточины" коэффициенту переноса (сигма) границы раздела порода-трещина присваиваются очень низкие значения, так что реагент в обрабатывающем флюиде не взаимодействует с материалом канала-"червоточины".

9. Способ по п.1, отличающийся тем, что реакцию обрабатывающего флюида с материалом породы параметризуют независимо для учета растворения соответствующего материала(ов) в соответствующих ячейках, в случае когда насыщение твердыми частицами меньше или равно соответствующему критическому насыщению твердыми частицами, с материалом канала-"червоточины",

10. Способ по п.1, отличающийся тем, что скорость реакции R_r между обрабатывающим флюидом и твердым материалом в ячейках описывается уравнением

$$R_r = V_b \cdot A_r \cdot \text{Pc}_{ri}^{n_{ri}} \cdot \text{PD}_{mijk},$$

где V_b обозначает полный объем соответствующей ячейки;
 A_r - константа скорости реакции;
 c_n - произведение концентраций реагента и твердых частиц;
 n_n - показатель степени каждого концентрационного члена и
 D_{mijk} - величина отклонения реакции от равновесия, описываемая уравнением

$$D_{mijk} = \theta \cdot (F_k(a_i) - C_a)$$

где θ - пористость соответствующей ячейки,
 $F_k(a_i)$ - функция от концентрации реагента и
 C_a - концентрация твердых частиц.

11. Способ по п.1, отличающийся тем, что компьютерная модель интенсификации притока содержит таблицу функции подвижности по отношению к насыщению твердыми частицами.

12. Способ по п.1, включающий калибровку компьютерной модели интенсификации притока с использованием экспериментальных данных, полученных на образце породы из обрабатываемой зоны.

13. Способ по п.1, включающий калибровку компьютерной модели интенсификации притока с использованием экспериментальных данных, полученных на образце породы из обрабатываемой зоны для определения функции скорости реакции для реакции между обрабатывающим флюидом и твердым материалом в ячейках и для заполнения таблицы подвижности флюида по отношению к насыщению твердыми частицами.

14. Способ по п.1, в котором обрабатываемая зона включает приствольную зону подземного пласта, и способ дополнительно включает в себя прогон компьютерной модели интенсификации притока для определения оптимальной скорости закачки обрабатывающего флюида для обработки приствольной зоны.

15. Способ по п.1, отличающийся тем, что обрабатываемая зона содержит сектор подземного пласта, причем параметры закачки обрабатывающего флюида включают скорость закачки обрабатывающего флюида для обработки этого сектора.

16. Способ по п.1, отличающийся тем, что обрабатываемая зона содержит месторождение продуктивного пласта, причем параметры закачки обрабатывающего флюида включают скорость закачки обрабатывающего флюида для обработки этого месторождения.

17. Способ образования канала-"червоточины" в пористой среде, в котором осуществляют моделирование (40) стимулирующей обработки с использованием химической реакции между обрабатывающим флюидом и пористой средой в подземном пласте с использованием компьютеризированной модели, которое включает

разбивку обрабатываемой зоны подземного пласта на множество ячеек;

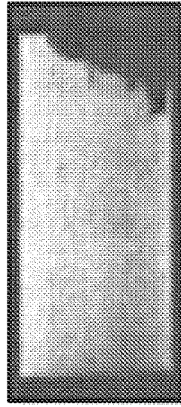
моделирование ячеек на этапе инициации канала-"червоточины", причем среда ячеек, имеющих насыщение твердыми частицами выше соответствующего критического насыщения твердыми частицами, состоит из материала породы, имеющего характер системы с одинарной проницаемостью и одинарной пористостью; и

моделирование ячеек, имеющих насыщение твердыми частицами, меньшее или равное соответствующему критическому насыщению твердыми частицами на этапе роста канала-"червоточины", причем ячейки содержат две различные взаимосвязанные среды, состоящие из материала породы и среды канала-"червоточины", обладающие подвижностью флюида, функционально зависимой от насыщения твердыми частицами;

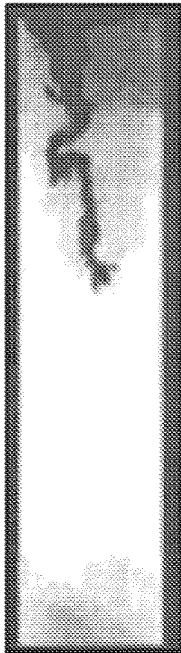
закачку обрабатывающего флюида внутрь обрабатываемой зоны пористой среды со скоростью закачки флюида в соответствии с полученной моделью стимулирующей обработки,

при этом в компьютерной модели интенсификации притока используют метод конечных разностей, и

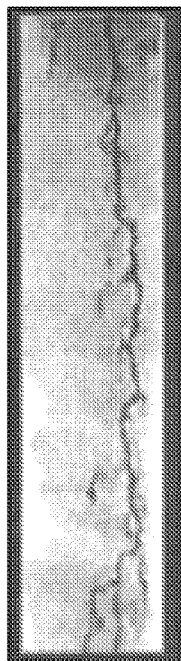
способ включает в себя многократный прогон компьютерной модели интенсификации притока для получения точек данных, содержащих поровый объем до прорыва как функцию скорости закачки обрабатывающего флюида, для определения скорости закачки обрабатывающего флюида, соответствующей минимальному поровому объему для прорыва.



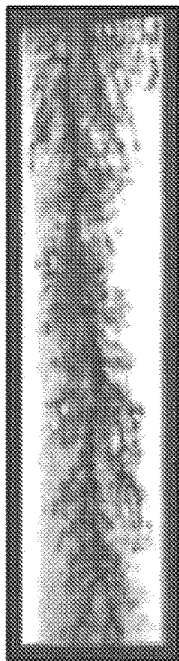
Фиг. 1А



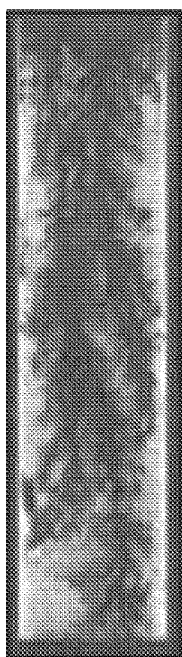
Фиг. 1В



Фиг. 1С



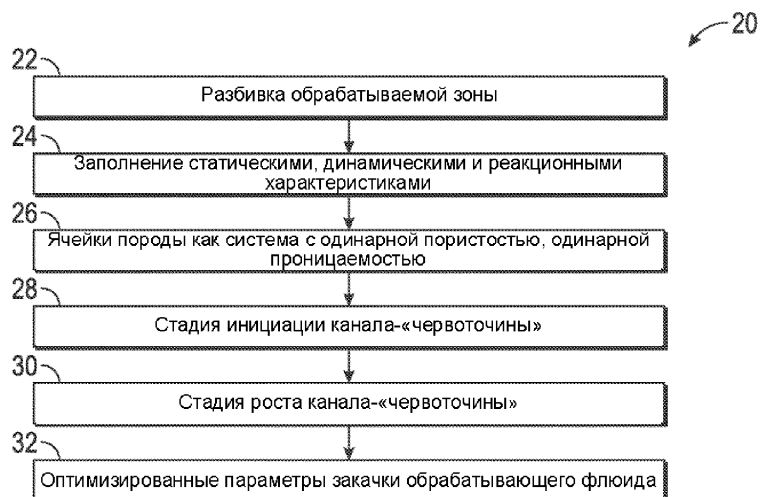
Фиг. 1D



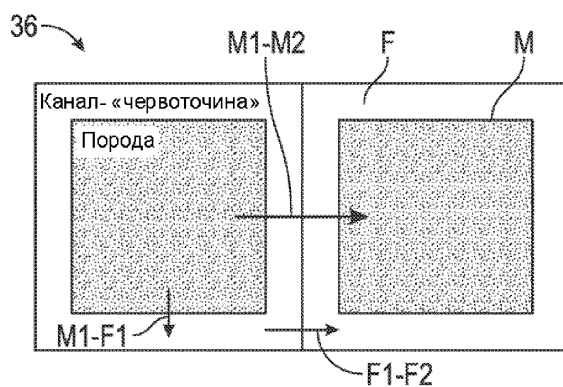
Фиг. 1E



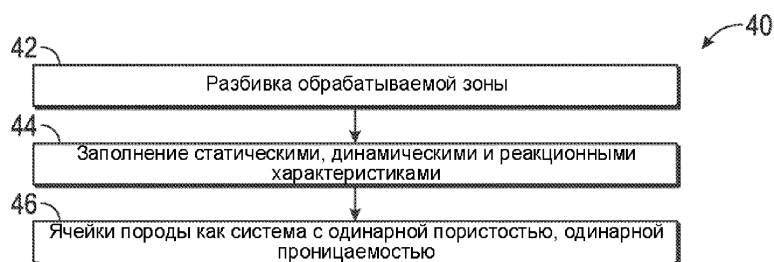
Фиг. 2



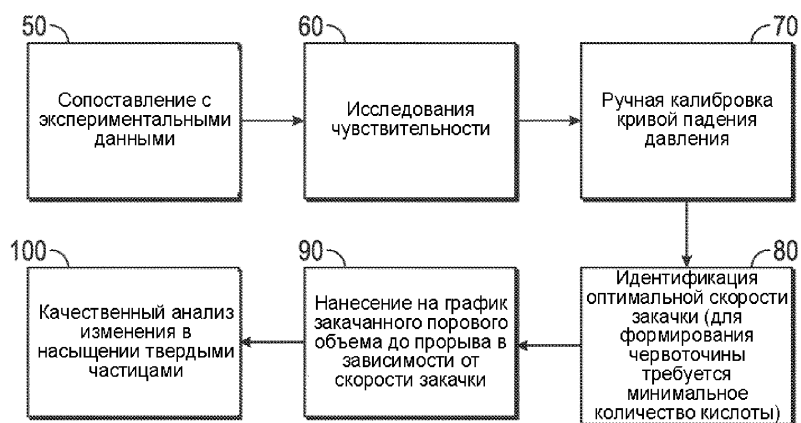
Фиг. 3



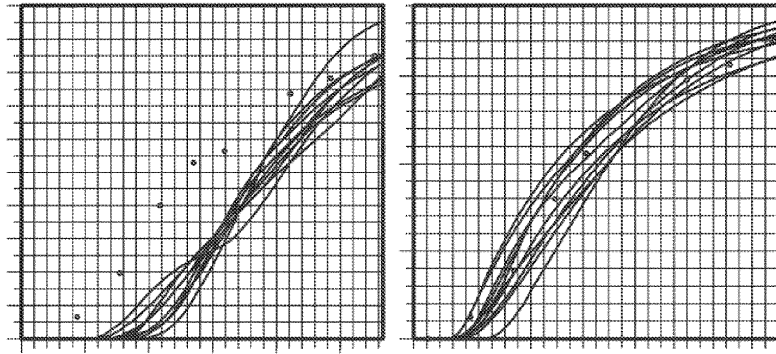
Фиг. 4



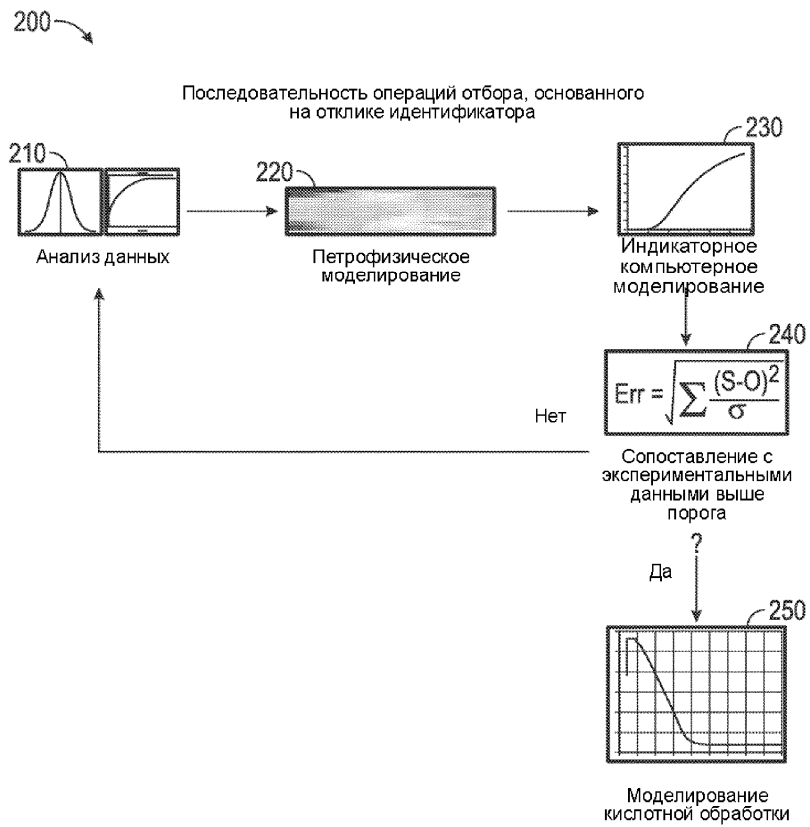
Фиг. 5



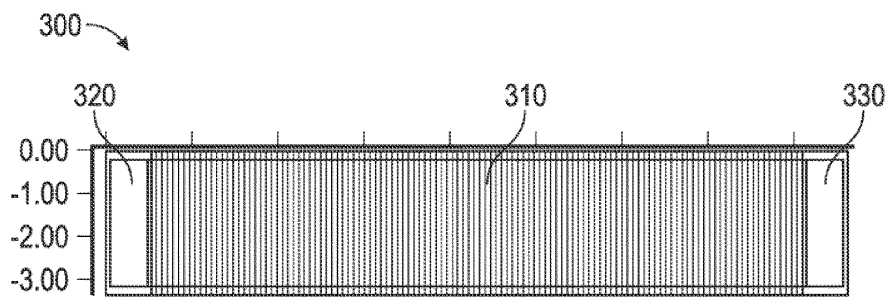
Фиг. 6



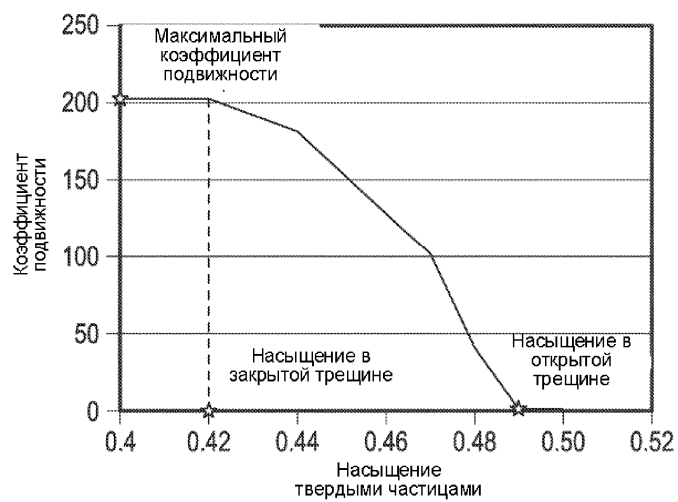
Фиг. 7



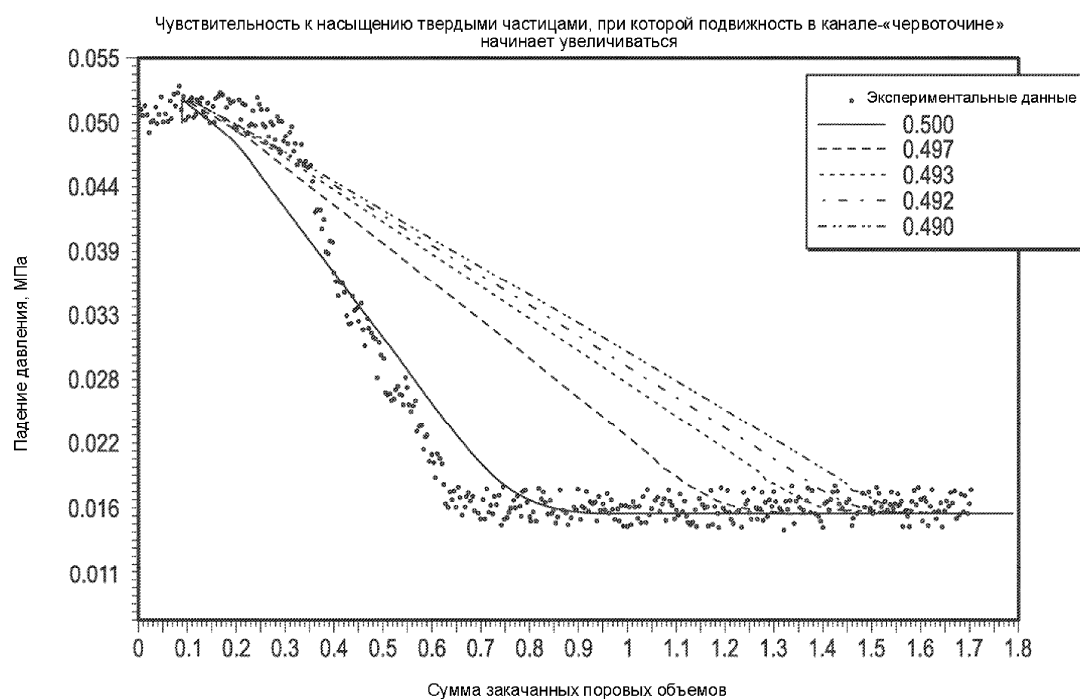
Фиг. 8



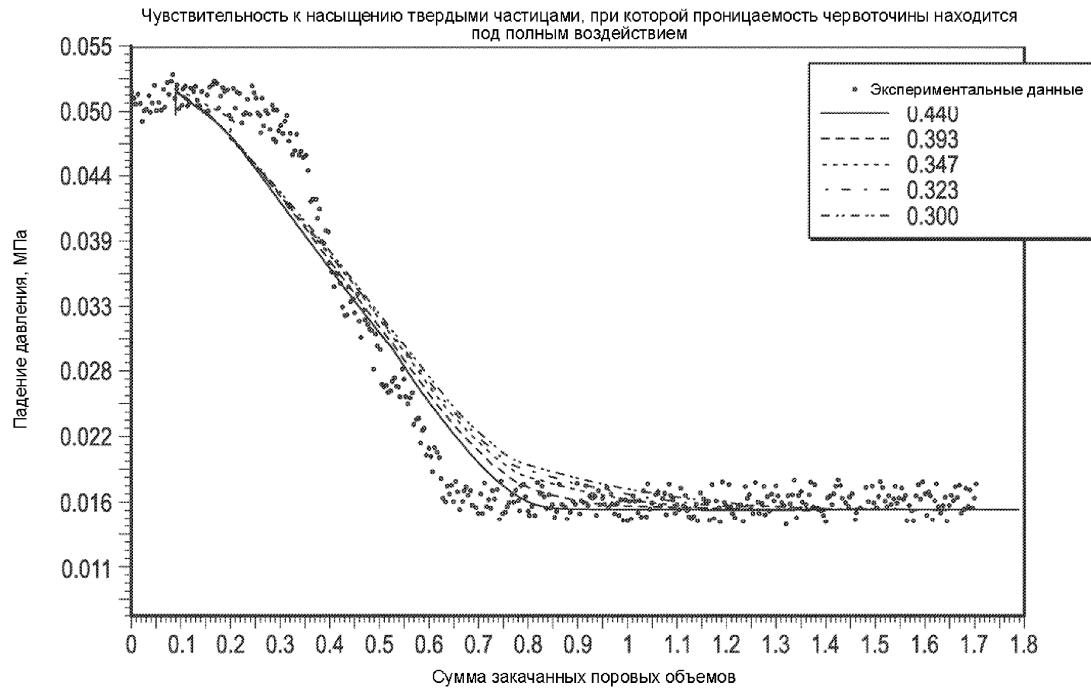
Фиг. 9



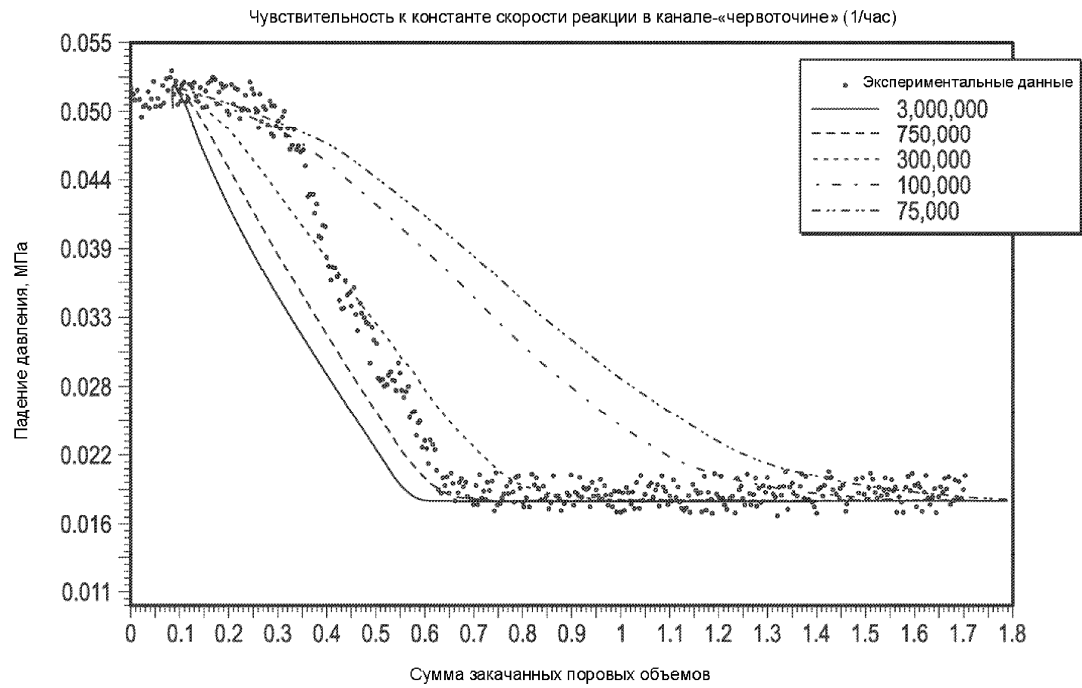
Фиг. 10



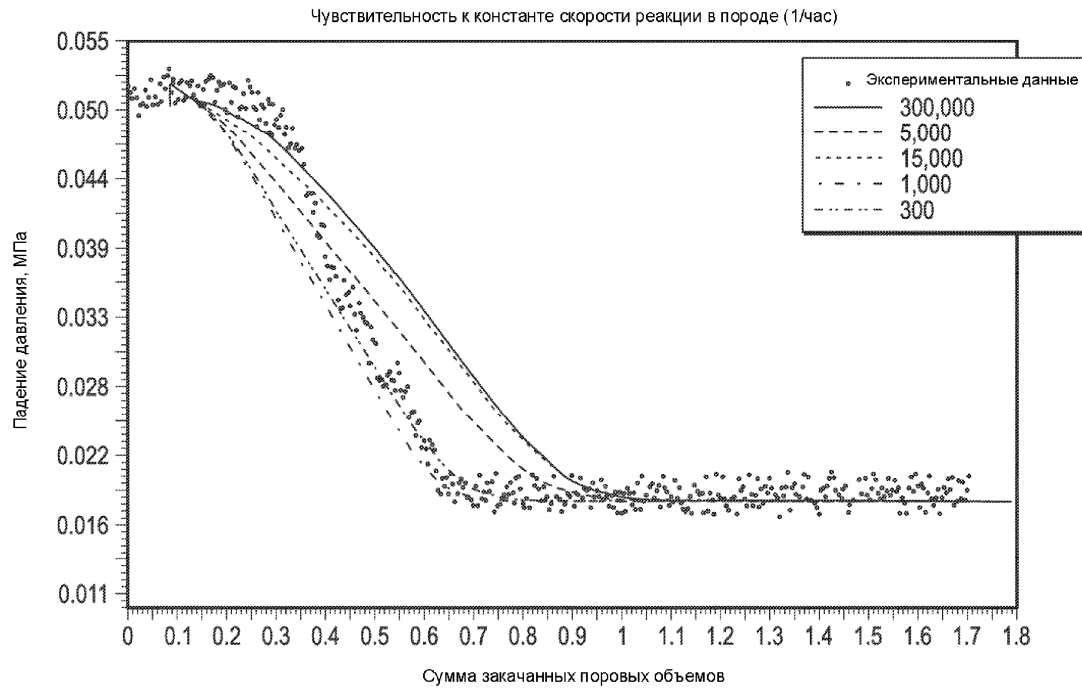
Фиг. 11



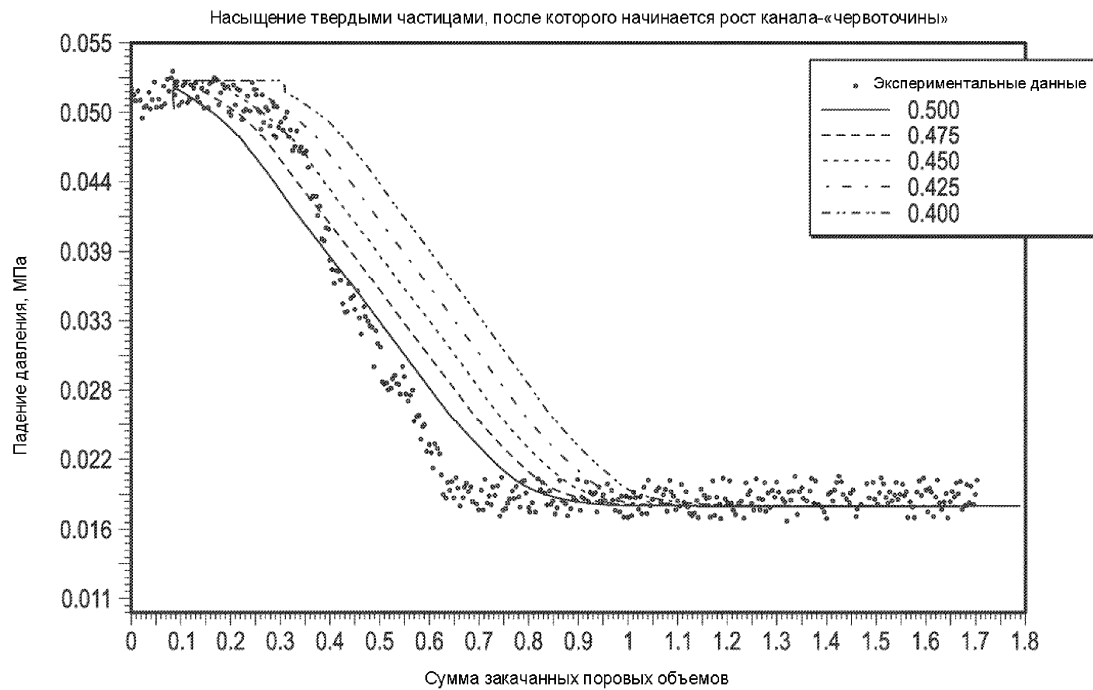
Фиг. 12



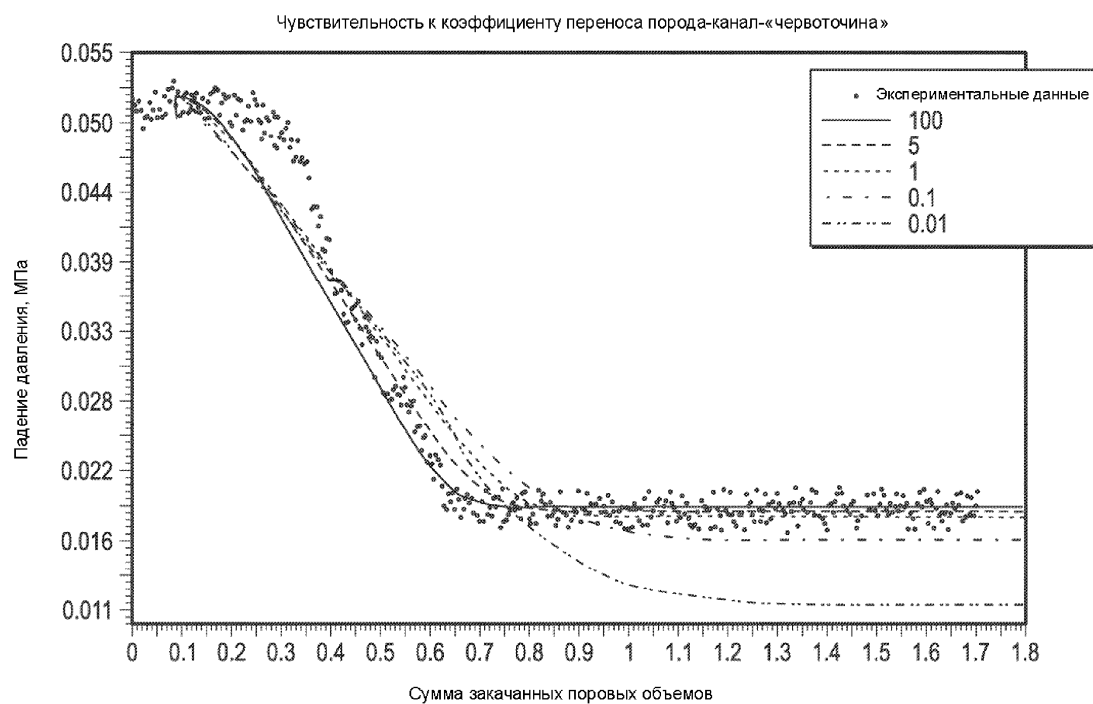
Фиг. 13



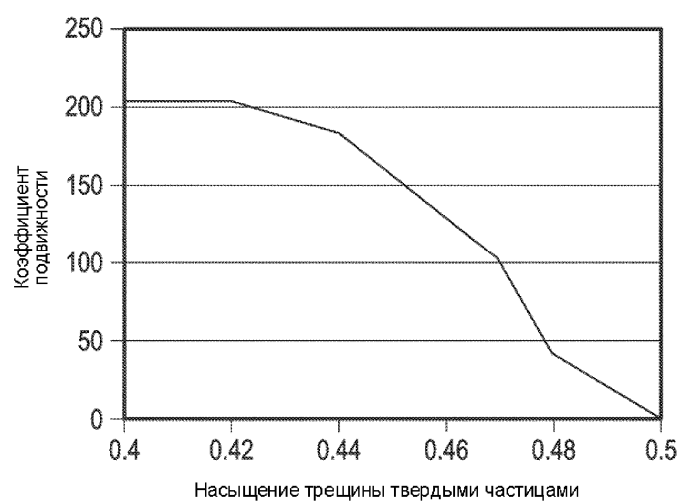
Фиг. 14



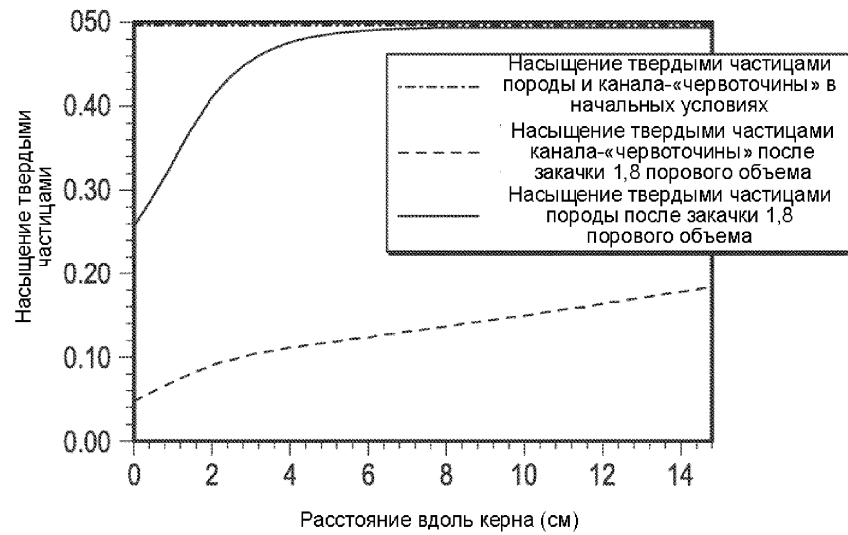
Фиг. 15



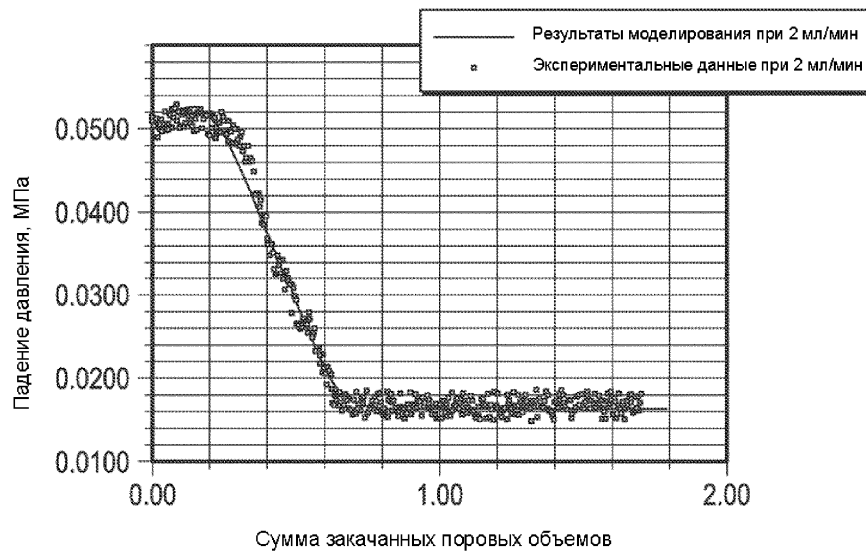
Фиг. 16



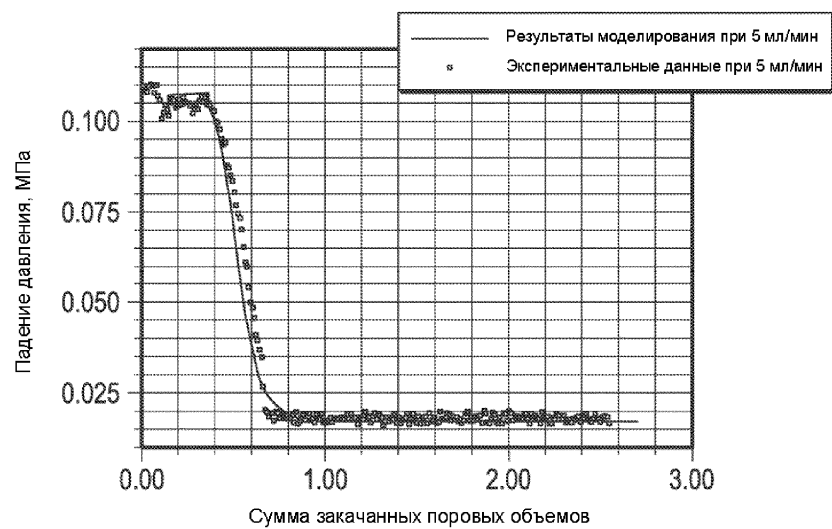
Фиг. 17



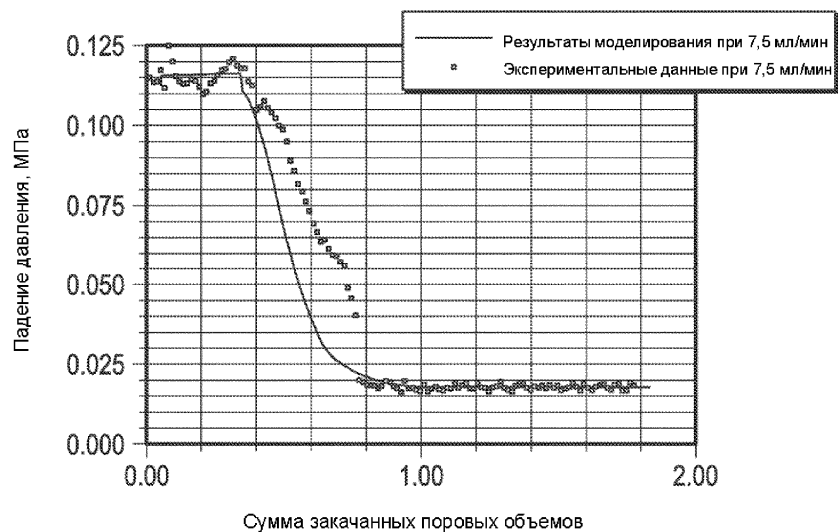
Фиг. 18



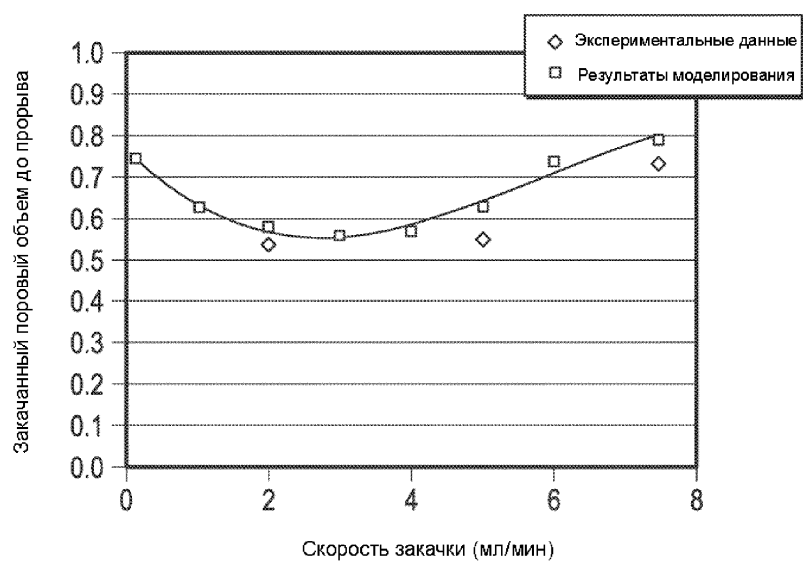
Фиг. 19



Фиг. 20



Фиг. 21



Фиг. 22



Евразийская патентная организация, ЕАПВ

Россия, 109012, Москва, Малый Черкасский пер., 2