

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **043010**(13) **B1**(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2023.04.19

(21) Номер заявки
202291351

(22) Дата подачи заявки
2019.10.31

(51) Int. Cl. **E21B 43/267** (2006.01)
E21B 47/10 (2012.01)
G06F 30/20 (2020.01)

(54) **СПОСОБ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА И СНИЖЕНИЯ ОБРАТНОГО ПРИТОКА ПРОППАНТА**

(43) **2022.07.29**

(86) **PCT/RU2019/000778**

(87) **WO 2021/086220 2021.05.06**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
ШЛЮМБЕРГЕР ТЕКНОЛОДЖИ Б.В.
(NL)

(56) **US-A1-20170075006**
RU-C2-2575947
US-A1-20170145793
US-A1-20160251948

(72) Изобретатель:
Алексеев Алексей Владимирович,
Чупраков Дмитрий Арефьевич,
Банников Денис Викторович,
Кузнецов Дмитрий Сергеевич,
Белякова Людмила Сергеевна,
Сыресин Денис Евгеньевич,
Спесивцев Павел Евгеньевич,
Юлдашева Алия Рафаиловна,
Великанов Иван Владимирович (RU)

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

(57) Представлен способ планирования гидравлического разрыва коллектора, который максимально увеличивает темп добычи из скважины и сводит к минимуму обратный приток проппанта. Указанный способ включает в себя применение компьютерных программ моделирования, которые анализируют схему обработки с применением гидроразрыва в контексте свойств скважины, свойств коллектора, флюидов и проппантов, а также расчета критической скорости фильтрации для набивки проппанта. Если скорость потока флюида в трещине превышает критическую скорость фильтрации, то возникает риск обратного притока проппанта. Указанный способ применим к скважинам, в которых гидроразрыв еще не был выполнен, а также к тем, которые ранее уже подвергались обработке путем гидроразрыва.

043010 B1

043010 B1

Область техники

Настоящее изобретение в целом относится к операциям гидравлического разрыва. В частности, изобретение относится к выполнению компьютерного моделирования операций гидравлического разрыва с целью минимизации обратного притока проппанта из трещины в ствол скважины во время очистки трещины и добычи.

Уровень техники

Гидравлический разрыв пласта представляет собой широко применяемую технологию интенсификации скважин, целью которой является создание в породе-коллекторе канала с высокой проводимостью. В образованную трещину закачивают большие объемы жидкости, содержащей частицы проппанта. Распространенной проблемой после интенсификации с применением гидравлического разрыва с расклинивающим материалом является возвратное извлечение проппанта во время обратного притока (также называемого обратным притоком проппанта). Обратный приток проппанта обычно происходит немедленно во время очистки скважины или в течение периода от нескольких дней до недель после обработки путем гидроразрыва, но также он может начаться в любое время в течение срока эксплуатации скважины. Обратный приток проппанта часто приводит к значительным потерям проводимости трещины из-за смыкания трещины в призабойной зоне скважины, не имеющей проппанта. Это может ухудшить экономические показатели темпа добычи из всей скважины. Также это может оказывать неблагоприятное воздействие на эксплуатационное оборудование из-за закупоривания или эрозии наземных и скважинных заканчиваний и привести к снижению доходов во время простоя, пока происходит замена оборудования. Кроме того, добытый проппант должен быть отделен от добытых углеводородов, что влечет за собой дополнительные затраты на обработку. Конечный эффект от обратного притока проппанта может заключаться в сокращении добычи, повреждении оборудования, простоях и в конечном итоге в снижении дохода.

Предпринимались попытки применения нескольких средств, имеющего своей целью ограничить или устранить обратный приток твердых частиц проппанта, попавших в пласт во время обработки путем гидроразрыва. Одним из средств, показавшим свою достаточную эффективность, являлось постепенное снижение давления гидроразрыва сразу после завершения операции гидроразрыва, чтобы действующее на проппант давление смыкания трещины возрастало постепенно, позволяя матрице проппанта стабилизироваться до того, как произойдет обратный приток жидкости для гидроразрыва и при эксплуатации скважины значительные объемы проппанта будут выноситься из трещин обратно в ствол скважины. Также широко применяли "проппант со смоляным покрытием" (RCP - англ.: resin-coated proppant), т.е. расклинивающий материал с твердыми частицами, имеющими клейкое покрытие, прикрепленное к их внешней поверхности так, что частицы проппанта связываются друг с другом - процесс, который дополнительно снижает вероятность обратного притока проппанта. Несмотря на способность RCP предотвращать обратный приток проппанта, он имеет ряд недостатков: меньшую проводимость по сравнению с проппантами, не имеющими покрытия, что может приводить к образованию в призабойной области ствола скважины зоны с пониженной проводимостью. RCP может иметь проблемы совместимости с жидкостями для гидроразрыва и, что важно, имеет температурные ограничения: ограниченные возможности для применения в низкотемпературном пласте. Еще одной распространенной в отрасли практикой является применение в качестве меры предотвращения обратного притока проппанта (PFB - англ.: proppant flowback) различных волокон, что также может снижать проводимость в призабойной области ствола скважины, а также характеризуется проблемами, связанными со сложностью эксплуатации.

Таким образом, существующие способы запуска добычи из скважин, а также применение различных добавок для предотвращения обратного притока проппанта имеют некоторые ограничения и не гарантируют того, что проппант не появится на поверхности через неделю, месяц или даже год. Периоды остановки, газовое закупоривание, дробление проппанта и другие отклонения от нормы в течение срока эксплуатации скважины могут приводить к заметным изменениям дебита, ширины трещины и нагрузки на проппант, что, в конечном итоге, вызывает обратный приток проппанта. В свою очередь, это ставит вопрос о долгосрочном прогнозировании проводимости трещины. Решение этой задачи является затруднительным без фундаментального понимания явления обратного притока проппанта и способности моделировать процессы, происходящие в скважине в любой момент времени. Наличие такой модели могло бы позволить выбирать наилучший сценарий эксплуатации конкретной скважины.

В данном изобретении определен план обработки путем гидроразрыва или обратного притока как выбор конкретных рабочих параметров для работ, связанных с гидроразрывом или обратным притоком, таких, например, как скорость закачивания, концентрации проппанта, общий объем закачки, депрессия в забое, график открытия штуцера в устье скважины. Моделирование по данному изобретению определено как компьютерное моделирование физического процесса гидроразрыва пласта или обратного притока, соответственно связанного с потоком флюида и проппанта внутри трещин.

Краткое описание графических материалов

На фиг. 1 представлена блок-схема, показывающая последовательность событий для предотвращения обратного притока проппанта. Данная блок-схема изображает рабочий процесс 1, который включает в себя как схему обработки путем гидроразрыва, так и схему обратного притока на основании моделиро-

вания обратного притока проппанта.

На фиг. 2 представлено графическое изображение трещины, из которой происходит вынос проппанта во время обратного притока. Черные области изображают проппант в трещине.

На фиг. 3 представлена блок-схема, показывающая последовательность событий для предотвращения обратного притока проппанта. Данная блок-схема изображает рабочий процесс 2, относящийся к скважинам, которые уже подвергались обработке путем гидроразрыва пласта. Соответственно, реализована только схема обратного притока на основании моделирования обратного притока проппанта.

На фиг. 4а показано распределение критических скоростей фильтрации, u_c , в начале обратного притока в "трещине 1".

На фиг. 4б показано поле скоростей флюида в начале обратного притока в "трещине 1".

На фиг. 5а показано распределение критических скоростей фильтрации, u_c , в начале обратного притока в "трещине 2".

На фиг. 5б показано поле скоростей флюида в начале обратного притока в "трещине 2".

На фиг. 6 показано давление в месте перфорации трещины для моделирования обратного притока.

На фиг. 7 показано сравнение совокупного обратного притока проппанта для сценариев двух смоделированных трещин.

На фиг. 8 показаны темпы добычи флюида для сценариев двух смоделированных трещин.

На фиг. 9 показана совокупная добыча флюида из трех расчетных трещин согласно примеру 2.

На фиг. 10 показан общий объем проппанта, полученного из трех расчетных трещин согласно примеру 2.

На фиг. 11 показана совокупная добыча флюида из трещины в результате быстрого снижения давления в течение первых 6 ч обратного притока и медленного снижения давления в течение 60 ч обратного притока.

На фиг. 12 показан общий объем обратного притока проппанта из трещины во время быстрого и медленного снижения давления.

Краткое изложение сущности изобретения

В одном аспекте варианты осуществления относятся к способам гидроразрыва подземной скважины и снижения обратного притока проппанта. Целью рабочего процесса (моделирование и корректировка расчетных параметров) является достижение двух удовлетворительных параметров, описывающих величину обратного притока проппанта и объем добычи флюида за определенный период.

(i) Обработка путем гидроразрыва предназначена для интенсификации коллектора, в котором будет создана трещина. Расчетные параметры включают в себя концентрацию проппанта, вязкость флюида, расход, этапы выполнения работ и окончательную геометрию трещины, а также их комбинации.

(ii) Выполняют компьютерное моделирование обработки путем гидроразрыва, в ходе которого формируется прогноз распространения трещины, распределения проппанта, распределения флюида и распределения проводимости трещины.

(iii) Задают расчетные параметры обратного притока. Такие расчетные параметры обратного притока включают в себя давление в забое или устье скважины, время и продолжительность обратного притока. При компьютерном моделировании окончательную форму трещины разделяют на отдельные ячейки.

(iv) Для каждой расчетной ячейки окончательной формы трещины определяют критическую скорость фильтрации u_c .

(v) Далее, для заданных условий обратного притока определяют дебит извлечения флюида и связанный с ним объем обратного притока проппанта.

(vi) Извлеченный объем проппанта V_s и добычу флюида Q_f на границе призабойной зоны ствола скважины рассчитывают путем повторного определения критической скорости фильтрации, соответствующего дебита извлечения флюида и объема обратного притока проппанта для последовательных интервалов продолжительности обратного притока.

(vii) Если $V_s < V_c$ и $Q_f > Q_{min}$, то обработка путем гидроразрыва и обратного притока выполнена в соответствии с расчетом. Q_{min} - минимально допустимый темп добычи флюида, а V_c - максимально допустимый объем обратного притока проппанта.

(viii) Если V_s или Q_f не удовлетворяют указанным выше условиям, этапы (i)-(vi) повторяют со скорректированными расчетными параметрами гидроразрыва и/или обратного притока.

В другом аспекте варианты осуществления относятся к способам гидроразрыва подземной скважины.

(i) Схема получена для ранее выполненной обработки путем гидроразрыва для интенсификации коллектора.

(ii) Выполняют компьютерное моделирование обработки путем гидроразрыва, формируют прогноз распространения трещины, распределения проппанта, распределения флюида и распределения проводимости трещины.

(iii) Устанавливают расчетные параметры обратного притока. Такие расчетные параметры обратного притока включают в себя давление в забое или устье скважины, время и продолжительность обратного притока. При компьютерном моделировании окончательную форму трещины разделяют на отдельные

ячейки.

(iv) Для каждой расчетной ячейки окончательной формы трещины определяют критическую скорость фильтрации u_c .

(v) Далее, для заданных условий обратного притока определяют дебит извлечения флюида и связанный с ним объем обратного притока проппанта.

(vi) Извлеченный объем проппанта V_s и добычу флюида Q_f на границе призабойной зоны ствола скважины рассчитывают путем повторного определения критической скорости фильтрации, соответствующего дебита извлечения флюида и объема обратного притока проппанта для последовательных интервалов продолжительности обратного притока.

(vii) Если $V_s < V_c$ и $Q_f > Q_{min}$, то найдена удовлетворительная схема обратного притока. Операция обратного притока выполнена в соответствии со схемой. Q_{min} - минимально допустимый темп добычи флюида, а V_c - максимально допустимый объем обратного притока проппанта.

(viii) Если V_s или Q_f не удовлетворяют указанным выше условиям, этапы (iii)-(vi) повторяют со скорректированными расчетными параметрами обратного притока.

Подробное описание сущности изобретения

Вначале следует отметить, что при разработке любого такого фактического варианта осуществления должны быть выполнены многочисленные реализации - конкретные решения для достижения конкретных целей разработчика, таких как соблюдение ограничений, связанных с системой и ведением экономической деятельности, которые будут варьироваться в разных вариантах реализации. Кроме того, следует понимать, что такие усилия по разработке могут быть сложными и длительными, но, тем не менее, будут обычным делом для специалиста в данной области техники, пользующегося преимуществом настоящего изобретения. Кроме того, композиция, применяемая/описанная в данном документе, также может содержать некоторые компоненты, отличные от указанных. В разделах "Сущность изобретения" и "Подробное описание изобретения" каждое числовое значение следует рассматривать как модифицированное термином "приблизительно" (кроме случаев, когда оно уже в явной форме модифицировано таким образом), а затем рассматривать как не модифицированное таким образом, если из контекста не следует иное. Также при прочтении разделов "Краткое изложение сущности изобретения" и "Подробное описание сущности изобретения" следует понимать, что под диапазоном концентраций, перечисленным или описанным как применимый, подходящий и т.п., подразумевается любая и каждая концентрация в пределах указанного диапазона, включая крайние значения. Например, "диапазон от 1 до 10" следует воспринимать как описывающий все без исключения возможные числа в континууме от около 1 до около 10. Таким образом, даже если определенные значения в пределах диапазона или ни одно из значений в пределах диапазона в явном виде указаны или обозначены лишь несколькими конкретными значениями, следует понимать, что авторы изобретения подразумевают и понимают под этим, что любые и все значения в пределах диапазона следует рассматривать, как указанные, и что авторы настоящего изобретения имеют в виду весь диапазон и значения в пределах этого диапазона.

В настоящем изобретении представлены новые способы планирования работ по гидроразрыву пласта и эксплуатации скважин, которые позволяют максимально повысить производительность скважины и минимизировать риск обратного притока проппанта.

Указанные способы представляют собой критерий, который позволяет операторам определять риск обратного притока проппанта в заданных условиях. Этот критерий основан на новой математической модели, которая позволяет рассчитать минимальную скорость фильтрации флюида (также называемую критической скоростью фильтрации, u_c), которая инициирует обратный приток проппанта для заданных размеров частиц проппанта, напряжения смыкания, ширины трещины и вязкости флюида. Обратный приток проппанта может происходить, если скорость фильтрации флюида, которая может быть выведена из темпа добычи, превышает свое критическое значение. В противном случае набивка проппанта является устойчивой. Этот критерий можно применять в любом имитаторе потока, который учитывает совместное течение флюидов и проппантов.

Указанные способы также представляют рабочие процессы, в которых предложенный критерий применяют для оптимизации схемы операции гидроразрыва, а также для определения оптимальной стратегии эксплуатации скважины.

Указанные способы позволяют операторам максимально повысить эффективность обработки путем гидроразрыва, максимально повысить производительность скважины и минимизировать время простоя и затраты на капитальный ремонт, связанные с обратным притоком проппанта.

В заявке на патент США 2018/0016897 A1 описано применение моделей нестационарного потока флюида для прогнозирования фазового состава добываемого флюида и управления потоком флюида через окно в устье скважины.

В заявке на патент США 2016/0341850 A1 представлена модель дискретной сети трещин (DFN - англ.: discrete fracture network), представляющая сеть трещин в подземной области и объединяющая несколько подмоделей, включая модель обратного притока/утечки (1D, 2D, 3D). Эта модель описывает объем обратного притока проппанта во время обработки путем гидроразрыва, но не описывает обратный приток проппанта (иммобилизацию твердого вещества) в закрытой трещине во время эксплуатации

скважины.

Milton-Taylor D. et al.: "Factors Affecting the Stability of Proppant in Propped Fractures: Results of a Laboratory Study", документ SPE 24821 (1992). В данном документе представлены эксперименты, в которых определены факторы, влияющие на устойчивость проппанта в трещинах с расклинивающим материалом. Абсолютный размер, распределение и тип проппанта могут влиять на устойчивость набивки и, следовательно, на вероятность обратного притока проппанта.

Asgian M.I. et al.: "The Mechanical Stability of Propped Hydraulic Fractures: A Numerical Study", документ SPE 28510-PA (1995). В данном документе продемонстрировано, как различные свойства и условия (например, напряжение смыкания, ширина трещины, внедрение проппанта в стенки трещины, гранулометрический состав, относительный наклон стенок трещины и депрессия) влияют на механическую устойчивость неслипавшихся, несвязанных набивок проппанта. Численные модели показывают, что трещины гидроразрыва, расклиненные несвязанным расклинивающим материалом, разрушаются под действием напряжения смыкания при критическом отношении среднего диаметра зерен к ширине трещины.

Aidagulov G.R. et al.: "Prediction of Long-Term Proppant Flowback in Weak Rocks", документ SPE 106264-MS (2007). В данном документе представлен подход к моделированию, имеющий своей целью прогнозирование количества проппанта при обратном притоке. Указанная модель учитывает ограниченное количество физических эффектов посредством численного расчета.

Shor R.J.: "Reducing Proppant Flowback From Fractures: Factors Affecting the Maximum Flowback Rate", документ SPE 168649 (2014). Для моделирования кубических объемов, состоящих из устьев трещин, стенок трещин и ограничивающего пласта, была разработана модель с применением имитатора частицы методом дискретного элемента (DEM - англ.: discrete element method). Было изучено влияние ширины трещины, ограничивающего напряжения, скорости потока флюида и связности проппанта. Было обнаружено, что ширина трещины зависит от ограничивающего напряжения и скорости потока флюида, при этом обратное извлечение проппанта также зависело от его связности.

Vernigora D. et al.: "Unveil the Unknown: Combining the Laboratory Study of Fracturing Fluids at High Pressure with a State-of-the-Art Hydraulic Fracturing Simulator", документ SPE 189518-MS (2018). В данном документе описано моделирование объема обратного притока флюида и проппанта с помощью программного обеспечения Kinetix® (товарный знак компании Schlumberger) в ходе этапа гидроразрыва перед этапом обратного притока.

Как описано ранее, раскрыты способы планирования работ по гидроразрыву и/или организации начальной эксплуатации скважины, которые минимизируют риск обратного притока проппанта из созданных гидроразрывом трещин при сохранении удовлетворительного темпа добычи флюида. Указанные способы включают в себя следующее.

1. Модель критической (минимальной) скорости фильтрации, которая инициирует обратный приток проппанта. В указанной модели для оценки областей, в которых возникает подвижность твердой фазы, применяют параметры трещины гидроразрыва и проппантов. В модели применяют два имитатора.

Имитатор обработки с применением гидроразрыва прогнозирует пространственное распределение закачиваемых проппантов по всей поверхности создаваемой трещины гидроразрыва. Указанный имитатор учитывает условия коллектора и выбранный график закачки.

Имитатор обратного притока описывает обратный поток закачиваемых флюидов и твердых частиц (проппанта) из трещины в ствол скважины, который возникает в результате снижения давления после обработки путем гидроразрыва. Количество и скорость извлечения проппанта являются конкретным результатом этой имитации, которая зависит от правильной модели обратного притока проппанта.

2. Созданные на основе моделей рабочие процессы для предотвращения обратного притока проппанта в ствол скважины, включающие в себя:

схему обработки путем гидроразрыва и

компьютерную имитацию обратного притока, в которой применяют модель для критической скорости фильтрации, u_c .

Предусмотрены два рабочих процесса. Рабочий процесс 1 применяют для скважин перед их обработкой путем гидроразрыва. Рабочий процесс 2 применяют для скважин с ранее выполненной обработкой путем гидроразрыва.

Модель критической скорости фильтрации.

Была разработана модель для прогнозирования возникновения подвижности проппанта в трещине в условиях высокого ограничивающего напряжения. Указанная модель определяет минимальную скорость фильтрации, при которой происходит инициирование подвижности проппанта, и далее в документе именуется моделью критической скорости фильтрации. Модель основана на концепции эрозии набивки проппанта от края набивки проппанта, где ограничивающие напряжения на несколько порядков ниже, чем те, которые действуют в центральной части набивки проппанта. Критическая скорость фильтрации для возникновения подвижности проппанта зависит от отношения ширины трещины (w [м]) к среднему диаметру частицы проппанта (d [м]), типа проппанта и вязкости фильтрующегося флюида (μ_f [Па·с]). Также учитывается эффект перекрытия (b), который зависит от внедрения частиц проппанта в стенки

трещины и также является функцией напряжения смыкания σ_n [Па].

Критическая скорость фильтрации в ячейке с проппантом, где при скорости, превышающей это значение, возникает подвижность проппанта, приведена ниже.

$$u_c = \frac{A}{\mu_f d} \left(\frac{w}{d} - b(\sigma_n) \right)^{-1}, \quad (1)$$

где A [Па·м²] - подгоночный коэффициент;

$b(\sigma_n)$ представляет собой логарифмическую функцию напряжения:

$$b(\sigma_n) = b_1 + b_2 \ln(\sigma_n [\text{Па}]), \quad (2)$$

где b_1 - подгоночный коэффициент, связанный с закупориванием проппантом;

b_2 - подгоночный коэффициент, связанный с внедрением проппанта, в значительной мере зависящий от напряжения смыкания.

Подгоночные коэффициенты были определены по результатам серии лабораторных экспериментов для ограниченного обратного притока проппанта при разных скоростях фильтрации и для разных проппантов.

Представленная выше модель является универсальной и может быть применена не только к проппантам, форма частиц которых близка к сферической, но и к проппантам с частицами стержневой формы. Например, для цилиндрических проппантов критическая скорость фильтрации может быть описана тем же уравнением, с применением эквивалентного диаметра сферы, которая по объему равна цилиндру.

$$d_{vol} = \sqrt[3]{1,5 \cdot L \cdot D^2}, \quad (3)$$

где L - средняя длина цилиндрической частицы;

D - средний диаметр частиц.

Рабочие процессы.

Описанные способы предотвращения обратного притока проппанта во время обратного притока и добычи предлагают два варианта: (1) за счет контроля как обработки путем гидроразрыва, так и планирования работ по обратному притоку, и (2) за счет контроля только планирования работ по обратному притоку. Рабочий процесс 1 применяют для скважин перед их обработкой путем гидроразрыва. Рабочий процесс 2 применяют для скважин, которые ранее уже подвергались обработке путем гидроразрыва.

Рабочий процесс 1.

На фиг. 1 представлена блок-схема, иллюстрирующая рабочий процесс планирования операции гидроразрыва с целью преодоления проблем обратного притока проппанта за счет применения модели критической скорости фильтрации. Применение этого рабочего процесса устраняет первопричину обратного притока проппанта - некачественное планирование работ. В этом случае модель может показать, увеличивает ли указанная схема риск обратного притока проппанта, и не требуется ли, чтобы этого избежать, внесение изменений в план обработки для достижения лучших экономических результатов (например, эффективное применение мощности насоса, стабильный темп добычи и увеличение производительности скважины).

Этап 1. Выбирают скважину-кандидат, руководствуясь коммерческими соображениями.

Этап 2. Планирование обработки с применением гидравлического разрыва включает в себя следующие этапы:

получение информации о механических и проводящих свойствах коллектора на основании данных каротажа и других измерительных инструментов;

сбор информации о скважине - траектория, заканчивание (например, расположение перфорационных отверстий в обсадной колонне);

сбор лабораторных данных, относящихся к свойствам материалов, применяемых для гидроразрыва - жидкостей (реологические параметры и плотность), проппанта (размер, тип и плотность), волокон (если таковые имеются, например влияние на скорость осаждения проппанта);

выбор схемы закачки при гидроразрыве - выбор материала для закачки (вязкие жидкости, проппант и добавки), расхода, объема материалов, закачиваемых при гидроразрыве, концентрации проппанта, содержания волокон и добавок, а также максимального давления при проведении гидравлического разрыва пласта;

моделирование операции гидравлического разрыва - моделирование распространения трещины и переноса в ней материалов, применяемых для гидравлического разрыва, расчет распределения проводимости трещины; и

принятие во внимание результатов моделирования на момент завершения плана гидравлического разрыва (локальная концентрация проппанта, концентрация остаточного геля, распределение проводимости по трещине с расклинивающим материалом).

Этап 3. Далее выполняют моделирование обратного притока проппанта. Это включает в себя следующие этапы.

Форма трещины гидроразрыва, смоделированная ранее согласно расчету трещины, обеспечивает прогнозируемое распределение концентрации проппанта внутри трещины, а также давления жидкости и напряжений в породе. Геометрическая форма и сетка смоделированной трещины гидравлического разрыва

показаны на фиг. 2. Каждая область между линиями сетки представляет собой "ячейку".

Давление в стволе скважины задано, например, как результат открытия штуцера в устье скважины.

Жидкость и твердые частицы, которые протекают внутри трещины, моделируют с учетом реологических свойств указанной суспензии.

Возникновение подвижности проппанта в трещине в условиях ограничивающего напряжения моделируют с применением модели потока жидкости с твердыми частицами в обратном направлении. Критическая скорость фильтрации u_c является важным параметром в этой программе, который рассчитывают в каждой расчетной ячейке (i, j) , как показано на фиг. 2. Величину u_c в конкретной ячейке сравнивают с аналогичным показателем в соответствующих ячейках. Если скорость фильтрации в конкретной ячейке превышает u_c , это означает, что проппант подвижен для выноса из этой ячейки. Если нет, то проппант устойчив.

Данные моделирования обратного притока проппанта учитывают на момент завершения плана обратного притока проппанта (добыча проппанта и флюидов, распределение проппанта, ширина трещины и пористость).

Этап 4. Далее оценивают общий объем обратного притока проппанта в ствол скважины, а также общий темп добычи флюида. Общее количество добытого проппанта V_s [m^3] представляет собой сумму скоростей потока проппанта в каждой расчетной ячейке, смежной с перфорациями (которые соединяют трещину со скважиной) за время моделирования Δt [с]:

$$V_s = \sum_{(i,j) \in \text{perf}} v_s^{ij} w^{ij} (1 - \varphi^{ij}) \Delta l^{ij} \Delta t, \quad (4)$$

где v_s^{ij} [м/с] - скорость твердого материала (проппанта) в ячейке (i, j) ,

w^{ij} [м] - локальная ширина трещины,

φ^{ij} [безразмерная величина] - пористость ячейки,

Δl^{ij} [м] - размер указанной ячейки.

Целью описанного способа является минимизация этого значения. Критический объем обратного притока проппанта V_c [m^3], превышение которого является неприемлемым, определяется персоналом, осуществляющим работы на промысле, или по коммерческим соображениям. Соответственно

$$V_s \leq V_c \quad (5)$$

Благодаря моделированию можно сделать вывод, что из-за обратного притока проппанта совокупный темп добычи флюида Q_f [m^3/c] из трещины может измениться. Поэтому величина Q_f должна быть больше минимального темпа добычи $Q_{\min}$ [m^3/c], который также определяется персоналом, осуществляющим работы на промысле, или по коммерческим соображениям.

$$Q_f \geq Q_{\min} \quad (6)$$

Расчет темпа добычи флюида Q_f аналогичен описанному выше расчету добычи твердого материала. Таким образом, также определяют сумму расходов флюида в каждой расчетной ячейке, смежной с перфорациями.

$$Q_f = \sum_{(i,j) \in \text{perf}} u_f^{ij} w^{ij} \Delta l^{ij}, \quad (7)$$

где u_f^{ij} [м/с] представляет собой скорость фильтрации флюида в ячейке (i, j) .

Этап 5. Если общее количество добытого проппанта V_s превышает допустимый предел V_c или темп добычи флюида Q_f меньше минимально допустимого значения $Q_{\min}$, указанный метод возвращает оператора к этапу 2 или этапу 3, где изменяют либо схему выполнения обработки путем гидравлического разрыва, либо схему обратного притока. Этот процесс повторяют до тех пор, пока не будет удовлетворен критерий этапа 5.

Этап 6. В противном случае, если общее количество добытого проппанта V_s меньше V_c , а темп добычи флюида Q_f превышает $Q_{\min}$, предложенные схемы обработки путем гидравлического разрыва и обратного притока подходят для применения на указанном промысле.

Рабочий процесс 2.

На фиг. 3 представлен еще один способ уменьшения обратного притока проппанта. Этот способ относится к скважинам, которые уже подвергались обработке путем гидроразрыва пласта. Этот рабочий процесс может быть применен для минимизации ущерба, когда операция гидроразрыва уже была выполнена, но план операции для конкретной скважины не является оптимальным (например, прогнозируемый объем обратного притока проппанта выше, чем V_c). В этом случае указанная модель может предложить такой темп добычи флюида, который сводит к минимуму обратный приток проппанта и предотвращает снижение притока в призабойной зоне ствола скважины.

Порядок действий аналогичен рабочему процессу 1, за исключением этапа 5. Поскольку обработка путем гидроразрыва уже была проведена, если темп добычи флюида Q_f и/или обратный приток проппанта V_s являются неудовлетворительными, указанный способ возвращает оператора только к этапу 3. Для снижения риска обратного притока проппанта при поддержании удовлетворительного темпа добычи корректируют план обратного притока.

Примеры

Для дополнительного иллюстрирования данного изобретения служат следующие примеры.

Пример 1.

Уменьшение обратного притока проппанта за счет изменения схемы обработки путем гидроразрыва.

Чтобы проиллюстрировать, как разница в распределении критической скорости фильтрации u_c в трещинах влияет на объем проппанта, выносимого из трещины во время обратного притока, были применены синтезированные данные. В качестве примера рассмотрены две синтезированные по разным схемам трещины (трещина 1 и трещина 2), созданные в одном коллекторе и при одинаковых условиях давления. Обе трещины содержат один и тот же однокомпонентный несжимаемый флюид с плотностью 1 г/см^3 и вязкостью 1 сП , и один и тот же проппант со следующими свойствами: плотность проппанта: $3,24 \text{ г/см}^3$, диаметр зерна проппанта: $1,05 \text{ мм}$; плотность набивки проппанта: $0,39$.

Все моделирование формы трещины и распределения проппанта осуществляли с помощью имитатора гидравлического разрыва пласта Kinetix® (товарный знак компании Schlumberger). "Трещина 1" была создана с помощью схемы закачки, обычно применяемой во время операции гидроразрыва, и ее можно считать эталонной. Чтобы изменить эту схему на "трещину 2", уменьшили вязкость геля и максимальную концентрацию проппанта, что привело к уменьшенному раскрытию трещины вблизи зоны перфорации. Схему "трещины 2" можно считать оптимизированной. Обе смоделированные трещины имеют разную склонность к возникновению подвижности проппанта, что проиллюстрировано распределениями критической скорости фильтрации u_c , которые рассчитаны по уравнению. 1. На фиг. 4а показано распределение проппанта u_c , рассчитанное для эталонной схемы ("трещина 1"), а на фиг. 5а показано аналогичное распределение u_c для оптимизированной схемы ("трещина 2"). Белый цвет в палитре цветов фиг. 4а и 5а соответствуют расчетным ячейкам с более высокими значениями u_c , а затемненные области соответствуют расчетным ячейкам с более низкими значениями u_c . Как пояснялось ранее, проппант в областях, где скорость фильтрации ниже u_c , будет устойчив и неподвижен - будет допускаться только движение флюида. Следовательно, белые ячейки соответствуют областям, где проппант устойчив, а черные ячейки соответствуют областям, где проппант обладает подвижностью. Для упрощения на фиг. 4а и 5а не показано поле скорости флюида на этапе эксплуатации. Поле скорости флюида на этапе эксплуатации представлено на фиг. 4б и 5б. Более темные области соответствуют участкам с более высокими скоростями флюида.

В трещине 1 существует высокий риск обратного притока проппанта. Величина u_c в непосредственной близости от перфорации составляет менее 5 см/с . В трещине 2 существует пониженный риск обратного притока проппанта. Величина u_c в непосредственной близости от перфорации составляет около 50 см/с . Меньший риск для трещины 2 можно объяснить меньшим раскрытием трещины в зоне перфорации. Поскольку наиболее нестационарные потоки обычно возникают вблизи зоны перфорации, более высокие значения u_c в трещине 2 обеспечивают более высокую устойчивость набивки проппанта.

Для инициирования обратного притока в зоне перфорации трещины создают разрежение с временной зависимостью давления, показанной на фиг. 6 (показаны только первые 15 ч). Для моделирования обратного притока к обеим трещинам 1 и 2 применяли один и тот же перепад давления. Указанные модели охватывают 20 дней обратного притока, причем в течение первых 6 часов давление в перфорации линейно уменьшалось от давления 280 бар в коллекторе до 150 бар , а затем оставалось постоянным до конца моделирования.

На фиг. 7 показано сравнение общего объема проппанта, вынесенного из трещины для трещины 1 (сплошная кривая) и трещины 2 (пунктирная линия). Через 10 ч обратный приток проппанта в обеих трещинах прекратился. В результате между трещиной 1 и трещиной 2 можно увидеть четырехкратную разницу в совокупном объеме извлеченного проппанта. Это указывает на более высокую устойчивость набивки проппанта в трещине 2 и, следовательно, на лучшую схему трещины.

На фиг. 8 показаны мгновенные значения темпа добычи жидкости в течение первых 20 дней эксплуатации. Схема трещины 1 обеспечивает повышенные темпы добычи в начале обратного притока, однако данная модель не показывает существенной разницы между обработкой трещины 1 (сплошная линия) и трещины 2 (пунктирная линия) для более длительного периода, что является потенциально приемлемым сценарием для планирования добычи.

Следует отметить, что в этом примере показана только одна итерация рабочего процесса проектирования операции гидроразрыва (см. фиг. 1). Однако для реальных применений количество таких итераций может быть настолько велико, насколько это необходимо для достижения желаемого улучшения схемы трещины.

Пример 2.

Оптимизация планирования обработки путем гидроразрыва для снижения обратного притока проппанта и повышения производительности скважины.

Этот пример показывает, как можно скорректировать график внесения проппанта в ходе планирования обработки путем гидроразрыва с целью оптимизации темпа добычи и снижения обратного притока

проппанта. В базовом варианте обработка путем гидроразрыва была спланирована с максимальной концентрацией проппанта на этапе ввода в эксплуатацию 1000 кгДП (килограммов проппанта, добавленного на кубический метр) и общей массой закачиваемых проппантов 8 метрических тонн (табл. 1).

Таблица 1

Концентрации проппанта и совокупные массы для трех вариантов планирования гидроразрыва

Вариант	Максимальная концентрация проппанта, кгДП	Совокупная масса проппанта, т
Базовый вариант	1000	8
Низкая концентрация проппанта	800	8
Низкая концентрация и масса	800	6

В этом случае моделирование обратного притока для заданной схемы трещины демонстрирует значительный объем извлечения проппанта ($0,28 \text{ м}^3$) и умеренный темп добычи (фиг. 9 и 10). Если такое значительное количество извлеченного проппанта превышает максимально допустимый объем обратного притока проппанта из этой скважины, необходима оптимизация обработки с применением гидроразрыва.

Во втором случае (низкая концентрация проппанта) наблюдается снижение концентрации проппанта с 1000 до 800 кгДП при сохранении того же количества проппанта, закачанного в трещину. Моделирование обратного притока для второго варианта показывает, что количество извлеченного проппанта уменьшается в два раза по сравнению с базовым вариантом. При этом в конце первых суток наблюдаемый темп добычи выше, чем в базовом варианте. Увеличение добычи из трещины связано с уменьшением потерь проппанта, что позволяет сохранять первоначальную проводимость трещины. Этот вариант может быть достаточным, но может оказаться полезным дальнейшее уточнение.

В третьем случае (низкая концентрация и масса проппанта) сохраняется низкая концентрация проппанта на этапе завершения, при этом общая масса закачиваемого проппанта снижается с 8 до 6 т (см. табл. 1). Такое планирование гидроразрыва полностью предотвращает обратный приток проппанта из трещины (фиг. 10), но приводит к снижению темпа добычи флюида из трещины (фиг. 9). Снижение проводимости трещины происходит из-за уменьшения массы проппанта, закачанного в трещину.

Таким образом, процедура оптимизации показала, что второй случай обеспечивает наиболее продуктивную трещину при одновременном снижении обратного притока проппанта.

Пример 3.

Оптимизация схемы обратного притока для снижения обратного притока проппанта и повышения производительности скважины.

Этот пример предусматривает рабочий процесс оптимизации, аналогичный тому, который приведен в примере 2, но вместо изменений в схеме обработки путем гидроразрыва изменен план снижения давления при обратном притоке.

Во-первых, в базовом варианте депрессия коллектора составляет 20 бар в течение первых 6 ч обратного притока. После 6 ч давление в забое остается постоянным. При моделировании темп добычи флюида в течение первых 4 дней обратного притока может быть достаточным, но, к сожалению, это сопровождается значительным обратным притоком проппанта из трещины ($0,28 \text{ м}^3$) (фиг. 11 и 12). Таким образом, схема обратного оттока требовала пересмотра.

Во втором случае был рассмотрен тот же план гидроразрыва, но период снижения давления на 20 бар был увеличен до 60 ч. Такое медленное снижение давления привело к снижению темпа добычи в течение первых 60 ч обратного притока; однако внутри трещины осталось больше проппанта. Объем извлеченных проппантов во втором случае был уменьшен (фиг. 12). Кроме того, к концу вторых суток во втором случае темп добычи возрос. Это является следствием сниженного обратного притока проппанта и сохраненной проводимости трещины.

Пример 4.

Оптимизация параметров эксплуатации и трещины для снижения обратного притока проппанта.

Этот пример демонстрирует, что обратный приток проппанта можно оптимизировать с применением модели критической скорости фильтрации u_c . На данном примере показано, что общий объем проппанта, добытого из скважины при снижении давления, может быть как увеличен, так и уменьшен за счет изменения ряда параметров, таких как ширина трещины w , средний диаметр частиц проппанта d , вязкость жидкости гидроразрыва μ , падение давления Δp и время падения давления t_{drop} .

Базовый сценарий предполагает образование в коллекторе трещины с заданными свойствами ($w=10 \text{ мм}$, $d=0,74 \text{ мм}$, $\mu=1 \text{ сП}$). Депрессия в базовом сценарии составляла $\Delta p=30 \text{ бар}$ и $t_{\text{drop}}=2 \text{ ч}$.

По указанной модели в базовом сценарии прогноз общего количества извлеченного проппанта составил $0,53 \text{ м}^3$. Этот пример показывает, как изменение нескольких параметров гидроразрыва и эксплуатации влияет на объем извлеченного проппанта V_s . В исследовании предполагалась трещина со свойствами, представленными в табл. 2. Было рассмотрено 11 сценариев (табл. 3).

Таблица 2

Параметры, полагаемые для оценки объема обратного притока проппанта

Параметр	Значение
Поверхность трещины, м ²	7800
Ширина трещины w, мм	10
Проницаемость набивки проппанта k, Д	10
Вязкость жидкости для гидроразрыва μ , сП	1
Сжимаемость коллектора C, Па ⁻¹	10 ⁻¹⁰
Пористость коллектора ϕ , безразмерная	0,1
Проницаемость коллектора k_{res} , Д	0,1
Давление в коллекторе, бар	90
Средний размер частиц проппанта d, мм	0,74

Таблица 3

Параметрическое исследование для модели обратного притока проппанта

Сценарий	w, мм	d, мм	w/d, -	μ , сП	dp, бар	t _{drop} , ч	V _s , м ³
1	10	0,74	13,5	1	30	2	0,53
2	5	0,74	6,8	1	30	2	0,0057
3	15	0,74	20,3	1	30	2	4,8
4	10	1,5	6,7	1	30	2	0,2
5	10	0,3	33,3	1	30	2	0,99
6	10	0,74	13,5	10	30	2	0,82
7	10	0,74	13,5	100	30	2	0,99
8	10	0,74	13,5	1	40	2	1,81
9	10	0,74	13,5	1	20	2	0,08
10	10	0,74	13,5	1	30	6	0,5
11	10	0,74	13,5	1	30	0,5	0,55

Во-первых, ширина w трещины с расклинивающим материалом изменялась пропорционально общей массе проппанта, закачанного в трещину. Выбрали три значения ширины w трещины: 5, 10, 15 мм (сценарии 1-3). Количество извлеченного проппанта в этих трех сценариях составило 0,0057; 0,53 и 4,8 м³ соответственно. Следовательно, широкие трещины могут оказаться нежелательными с точки зрения обратного притока проппанта.

Во второй серии изменений параметров трещины изменяли средний размер зерна проппанта d в диапазоне d=0,3; 0,74 и 15 мм (сценарии 1, 4 и 5). Соответствующие объемы обратного притока проппанта составили: 0,99; 0,53 и 0,2 м³ соответственно. Следовательно, для снижения интенсивности извлечения твердых частиц предпочтительными могут являться частицы проппанта более крупных размеров.

В качестве третьего параметра изменяли вязкость извлекаемой жидкости для гидроразрыва: μ (1, 10, 100 сП) (сценарии 1, 6 и 7). Для этих трех типов жидкостей извлечение проппанта составило 0,53; 0,82; 0,99 м³ соответственно. Таким образом, существует прямая зависимость между вязкостью флюида и извлечением проппанта.

Четвертым параметром, влияющим на обратный приток проппанта, является перепад давления (dp). Для сравнения применяли три значения dp (20, 30 и 40 бар) (сценарии 1, 8 и 9). Количество извлеченного проппанта составило 0,08; 0,53; 1,81 м³ соответственно. Таким образом, осторожное снижение давления может предотвратить обратный вынос в скважину значительных объемов проппанта.

Пятым параметром, выбранным для этого исследования, была длительность снижения давления

(t_{drop}). При длительности снижения давления 0,5, 3 и 6 ч (сценарии 1, 10 и 11), объемы извлеченного проппанта составили 0,5; 0,53 и 0,55 м³ соответственно. Разница может показаться незначительной; однако, если депрессия будет продолжаться в течение нескольких дней, а не нескольких часов, совокупное извлечение проппанта может достичь нежелательного уровня.

Пример 5.

Пример рабочего процесса 1 с несколькими итерациями для снижения объема обратного притока проппанта.

В этом примере представлен пример реализации рабочего процесса 1 (фиг. 1). Придерживаясь этого рабочего процесса, следует определить параметры планирования гидравлического разрыва и обратного притока для достижения величины объема обратного притока проппанта V_s ниже $V_c=0,5$ м³. В качестве базового рассмотрен сценарий 8 (см. табл. 3). Моделирование обратного притока для базового варианта показывает обратный приток проппанта в 1,81 м³, что превышает V_c .

Согласно рабочему процессу 1 на второй итерации можно изменить расчетный параметр обратного притока. Уменьшение перепада давления dp с 40 бар (сценарий 8, табл. 3) до 30 бар (сценарий 1, табл. 3) приводит к снижению объема обратного притока проппанта до 0,53 м³. Этот объем все еще выше целевого значения V_c .

Во второй итерации рабочего процесса 1 изменяют расчет гидравлического разрыва, увеличивая диаметр частицы проппанта с 0,74 мм (сценарий 1, табл. 3) до 1,5 мм (сценарий 4, табл. 3). Моделирование гидравлического разрыва и обратного притока демонстрирует обратный приток проппанта 0,2 м³. Это значение удовлетворяет условию $V_s < V_c$, поэтому при выполнении операций гидроразрыва и обратного притока следует применить сценарий 4.

Хотя выше подробно были описаны только несколько иллюстративных вариантов осуществления, специалистам в данной области техники будет очевидно, что в иллюстративных вариантах осуществления возможны многие модификации без существенного отступления от сути настоящего изобретения. Соответственно, все такие модификации предназначены для включения в объем настоящего изобретения, который определен в следующей формуле изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ гидроразрыва подземной скважины, включающий в себя:

(i) планирование обработки путем гидроразрыва для интенсификации коллектора, при которой будет создана трещина, а расчетные параметры включают в себя концентрацию проппанта, вязкость флюида, расход, этапы выполнения работ и окончательную форму трещины, а также их комбинации;

(ii) выполнение компьютерного моделирования обработки с применением гидроразрыва, при котором формируется прогноз распространения трещины, распределения проппанта, распределения флюида и распределения проводимости трещины;

(iii) задание расчетных параметров обратного притока, содержащих давление в забое или устье скважины, время и продолжительность обратного притока;

(iv) определение критической скорости фильтрации u_c в каждой расчетной ячейке для окончательной формы трещины;

(v) определение расхода при добыче флюида и объема обратного притока проппанта для заданных условий обратного притока;

(vi) расчет объема извлеченного проппанта V_s и добычи флюида Q_f на границе призабойной зоны ствола скважины за счет повтора этапов (iv) и (v) для последовательных интервалов продолжительности обратного притока;

(vii) если $V_s < V_c$ и $Q_f > Q_{min}$, выполнение обработки путем гидроразрыва, как запланировано на этапе (i), причем Q_{min} - минимально допустимый темп добычи флюида, а V_c - максимально допустимый объем обратного притока проппанта; или

(viii) если V_s или Q_f не удовлетворяют условиям этапа (vii), повторение этапов (i)-(vi) со скорректированными расчетными параметрами гидроразрыва.

2. Способ по п.1, в котором критическая скорость фильтрации u_c зависит от параметров, включающих в себя напряжение в стенке, эффективный диаметр частиц проппанта, ширину трещины, вязкость флюида и внедрение проппанта, а также их комбинации.

3. Способ по п.1, в котором спрогнозированные во время компьютерного моделирования скорости потока проппанта, которые меньше критической скорости фильтрации u_c , указывают на нулевую подвижность проппанта в трещине.

4. Способ по п.1, в котором вычисление извлеченного объема V_s проппанта выполняют с применением параметров, включающих в себя площадь поверхности трещины, ширину трещины, проницаемость набивки проппанта, вязкость флюида, сжимаемость коллектора, пористость коллектора, давление в коллекторе и эффективный размер частиц проппанта, а также их комбинации.

5. Способ по п.1, в котором этап (i) дополнительно включает в себя получение информации о механических и проводящих свойствах коллектора, траектории скважины и расположении перфорационных

отверстий обсадной колонны.

6. Способ по п.1, в котором этап (i) дополнительно включает в себя сбор лабораторных данных, касающихся свойств флюида и свойств проппанта.

7. Способ по п.1, в котором этап (i) дополнительно включает в себя выбор схемы гидравлического разрыва.

8. Способ гидроразрыва подземной скважины, включающий в себя:

(i) получение плана ранее выполненной обработки путем гидроразрыва для интенсификации коллектора;

(ii) выполнение компьютерного моделирования обработки с применением гидроразрыва, при котором формируется прогноз распространения трещины, распределения проппанта, распределения флюида и распределения проводимости трещины;

(iii) задание расчетных параметров операции обратного притока, содержащих давление в забое или устье скважины, время, продолжительность обратного притока;

(iv) определение критической скорости фильтрации u_c в каждой расчетной ячейке для окончательной формы трещины;

(v) определение расхода при добыче флюида и объема обратного притока проппанта;

(vi) расчет объема извлеченного проппанта V_s и добычи флюида Q_f на границе призабойной зоны ствола скважины за счет повторения этапов (iv) и (v) для последовательных интервалов продолжительности обратного притока;

(vii) если $V_s < V_c$ и $Q_f > Q_{min}$, выполнение обработки путем гидроразрыва, как запланировано, причем Q_{min} - минимально допустимый темп добычи флюида, а V_c - максимально допустимый объем обратного притока проппанта; или

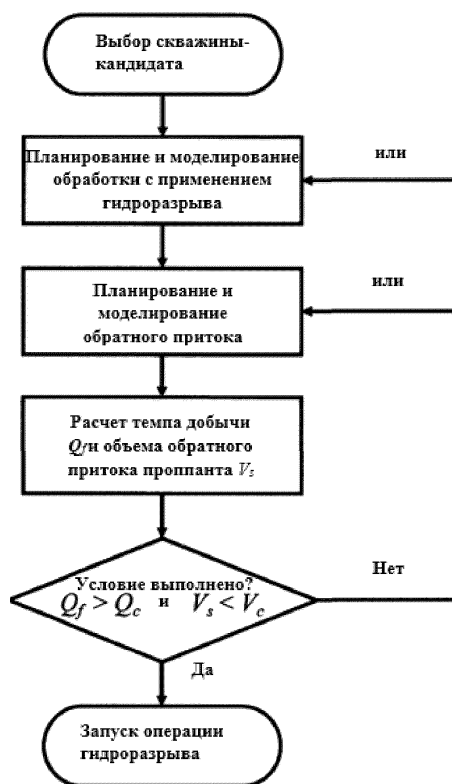
(viii) если V_s или Q_f не удовлетворяют условиям этапа (vii), повторение этапов (iii)-(vi) со скорректированными расчетными параметрами обратного притока.

9. Способ по п.8, в котором расчетные параметры ранее выполненной обработки путем гидроразрыва включают в себя концентрацию проппанта, вязкость флюида, расход, этапы выполнения работ и форму трещины, а также их комбинации.

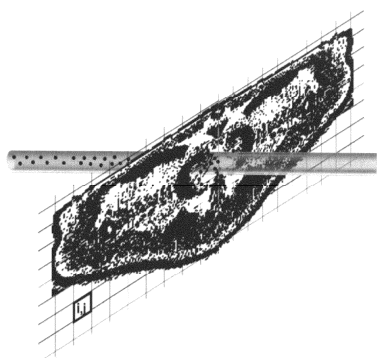
10. Способ по п.8, в котором критическая скорость фильтрации u_c зависит от параметров, включающих в себя напряжение в стенке, эффективный диаметр частиц проппанта, ширину трещины, вязкость флюида и внедрение проппанта, а также их комбинации.

11. Способ по п.8, в котором спрогнозированные во время компьютерного моделирования скорости потока проппанта, которые меньше критической скорости фильтрации u_c , указывают на нулевую подвижность проппанта в трещине.

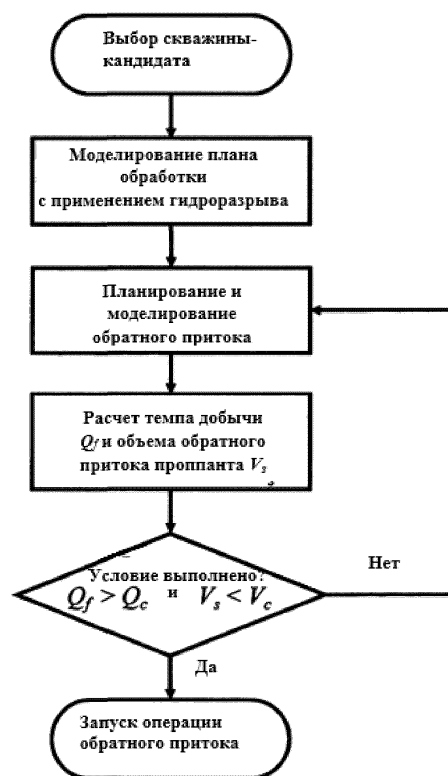
12. Способ по п.8, в котором вычисление извлеченного объема V_s проппанта выполняют с применением параметров, включающих в себя площадь поверхности трещины, ширину трещины, проницаемость набивки проппанта, вязкость флюида, сжимаемость коллектора, пористость коллектора, давление в коллекторе и средний размер частиц проппанта, а также их комбинации.



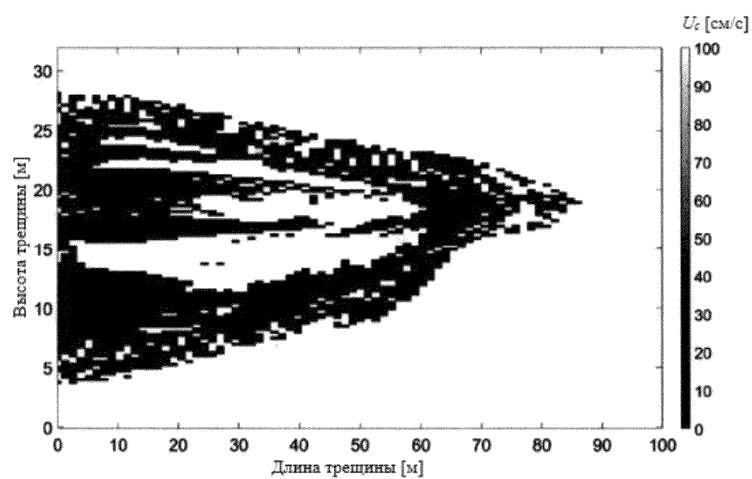
Фиг. 1



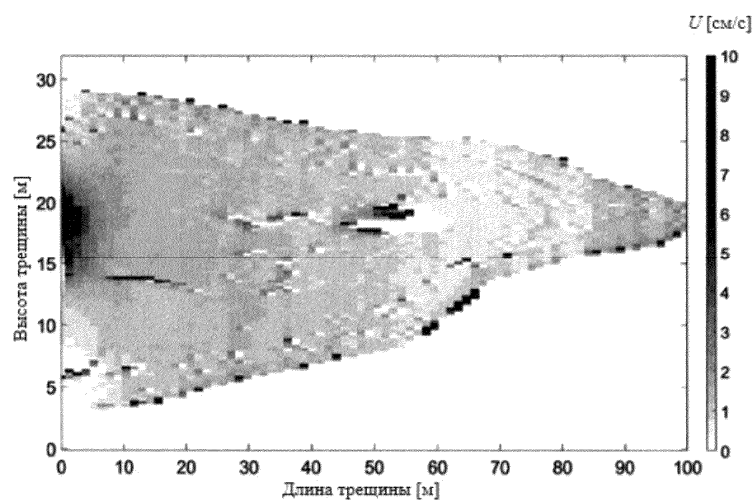
Фиг. 2



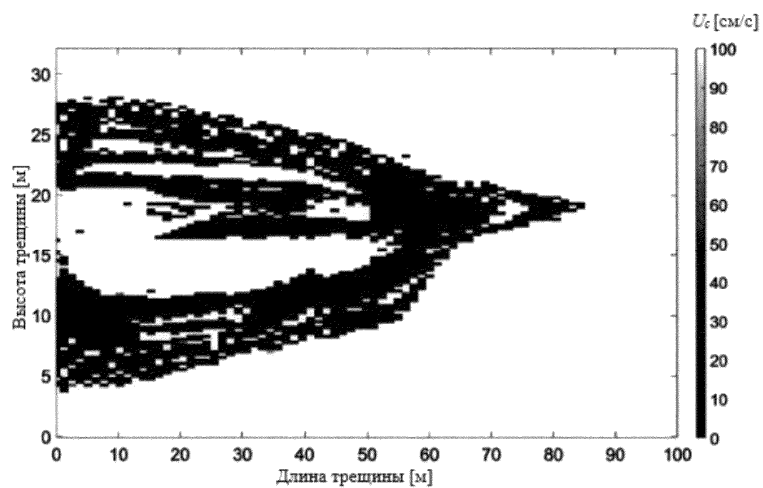
Фиг. 3



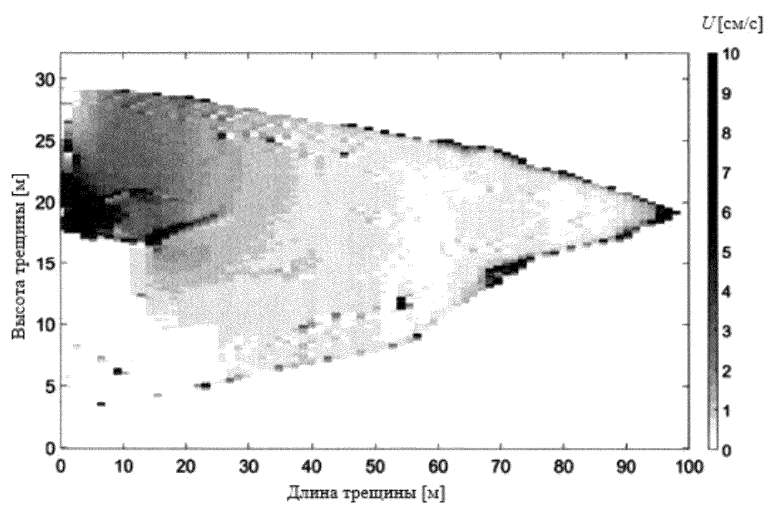
Фиг. 4а



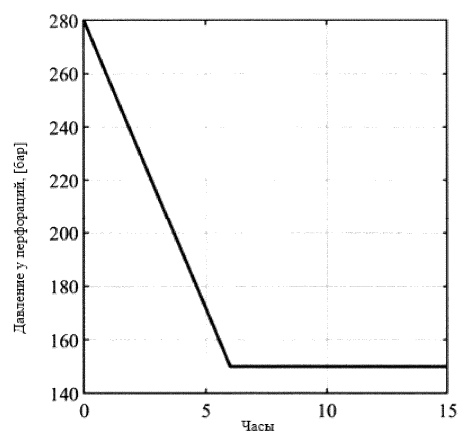
Фиг. 4b



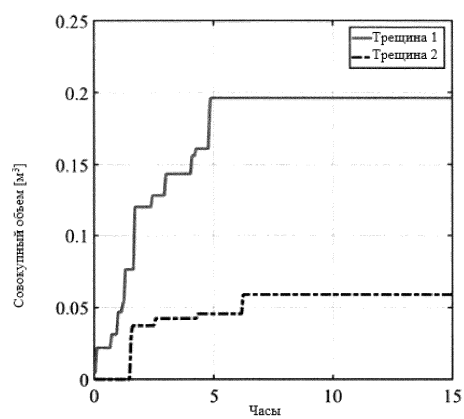
Фиг. 5a



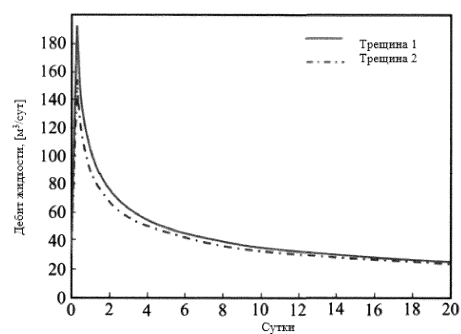
Фиг. 5b



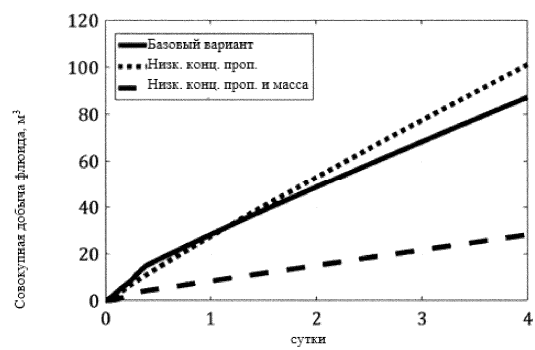
Фиг. 6



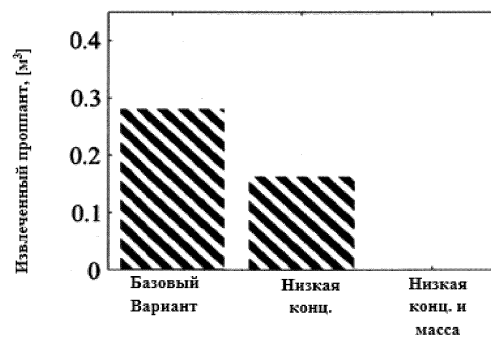
Фиг. 7



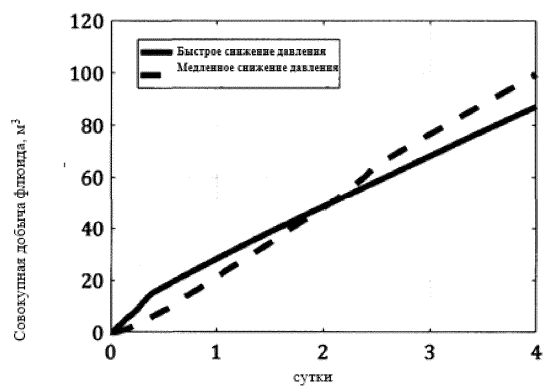
Фиг. 8



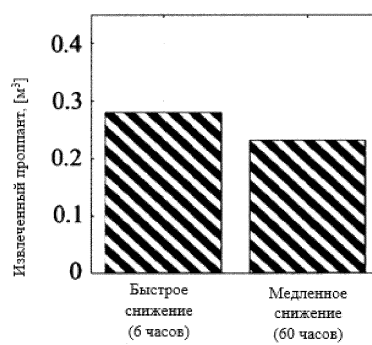
Фиг. 9



Фиг. 10



Фиг. 11



Фиг. 12

