

### Область техники

Это изобретение относится, в общем, к способам заканчивания подземных скважин, и конкретнее к способам и устройствам для вскрытия слабо затвердевших формаций, приводящим к устранению или уменьшению выноса песка.

### Уровень техники

Углеводородные флюиды, такие как нефть и природный газ, получают из подземной геологической формации, то есть резервуара, бурением скважин, которое вскрывает формации, содержащие углеводороды. Как только ствол скважины пробурен, скважина должна быть закончена; заканчивание предусматривает проектирование, выбор и установку оборудования и материалов в стволе скважины или вокруг него для транспортирования, перекачивания или регулирования добычи или закачивания флюидов. После того как скважина закончена, может начаться добыча нефти и газа.

Гидравлический разрыв является первичным инструментом для улучшения производительности скважины размещением или расширением каналов ствола скважины в резервуаре. Эта операция практически выполняется гидравлическим закачиванием жидкости гидроразрыва в ствол скважины, проникающей в подземную формацию, и подачи под давлением жидкости гидроразрыва к пластовым слоям. В результате пластовые слои или горная порода трескаются и ломаются. Расклинивающий агент помещают в разлом для предохранения разлома от закрытия и, таким образом, обеспечения улучшенного течения добываемого флюида, то есть нефти, газа или воды.

В случае, если формация является "мягкой" или слабо затвердевшей, маленькие частицы, типично песка, присутствующие в формации, могут перемещаться с углеводородами. Такой вынос песка очень нежелателен, поскольку это эродировывает поверхностное и подземное оборудование, требует процесса удаления прежде, чем углеводород может быть обработан, и обычно противодействует желательным эффектам способов интенсификации добычи, таких как кислотный способ интенсификации добычи.

Самым общим подходом к минимизации потока маленьких частиц является фильтрование добываемых флюидов через гравийный фильтр, задерживаемый ситом. Добытые флюиды перемещаются через гравийный фильтр и сито без существенного уменьшения выноса перед входом в ствол скважины, в то время как более мелкие частицы блокированы. Однако этот метод является сравнительно затруднительным, и со временем гравийный фильтр и сито могут быть засорены нагаром или эродированы песком.

Это объясняет развитие так называемых бесситовых способов вскрытия скважины. Эти способы типично включают в себя закачивание отверждающего флюида, включающего смолу, вулканизирующий агент, катализатор и гидрофобизатор. Смола располагается в формации, отверждая ее и уменьшая концентрацию свободных маленьких частиц. Примеры отверждающих флюидов и способов их использования описаны, например, в патентах США №№ 5806593; 5199492; 4669543; 4427069 и 4291766.

Обычно применяемые отверждающие флюиды обладают относительно долгим временем схватывания. Поэтому флюиды имеют тенденцию сохранять течение в области наименьшего сопротивления, оставляя остальные необработанными. Это решительно ограничивает длину ствола скважины, которая может быть обработана в однократном применении, не больше чем приблизительно 6 м (20 футов). Дополнительно, неважные результаты достигнуты с гетерогенными формациями, состоящими, например, из слоев, имеющих различные проницаемости. Системы отверждения на основе смолы, как известно, очень усложнены в применении, например, требуя до пяти стадий обработки, и они часто вызывают экологические проблемы.

Для устранения недостатков обычно применяемых флюидов были предложены многостадийные обработки скважины. Большинство из них включает или эмульсию, или пену. US № 5363917 указывает вспененный отверждающий флюид, который может способствовать сгоранию углеводородов в формации. Продукты сгорания углеводорода отверждают формацию. US №№ 5010953 и 5567088 раскрывают отверждающий флюид, получаемый как аэрозоль в паре. Вышеупомянутый патент указывает, что пар поддерживает пространство пустот в формации в течение схватывания полимеризуемого соединения, например фурфуролилового спирта. US № 6364020 указывает эмульсии, содержащие по меньшей мере две дисперсные фазы, содержащие гелеобразующий полимер, такой как полисахарид, в одной фазе и неорганический или органический сшивающий агент в другой.

Известны другие способы заканчивания незатвердевшей формации с отверждающей обработкой или без нее. US № 5551514 предлагает многостадийное отверждение, сопровождаемое гидравлической обработкой гидроразрыва, в которой применяются способы контроля обратного потока расклинивающего агента. US № 6450260 описывает способ выполнения техники, приведенной в US № 5551514, используя гибкую систему геля.

Другие способы минимизации выноса песка включают определение направления распространения гидроразрыва и определение местонахождения или формирования перфорационных каналов (см. US №№ 5386875 и 6283214). US № 6431278 определяет кривую, которая коррелирует процентное отношение потока через перфорационные каналы не в фазе с интервалом проводимости гидроразрыва к проницаемости формации. При желаемом выносе потока может быть определена проводимость формации. Это позволяет нефтедобывающей фирме проектировать и выполнять операцию гидроразрыва для достижения проводимости, необходимой для получения скважины ниже критического перепада давления для выноса песка.

Хотя некоторые успехи были получены с большинством вышеупомянутых способов, ни один из

них не достиг большого коммерческого одобрения, в особенности ввиду технических и стоимостных ограничений.

Поэтому объект настоящего изобретения - обеспечение улучшенного способа заканчивания незатвердевшего интервала.

### **Сущность изобретения**

Одной задачей настоящего изобретения является способ вскрытия в подземной формации незатвердевшего интервала, способного к образованию частиц, таких как песок, включающий стадию затвердевания упомянутого интервала закачиванием в упомянутый интервал водного раствора коллоидных частиц и рН модификатора и/или модификатора ионного состава для образования плотного геля, который скрепляет частицы вместе, и затем стадию гидравлического гидроразрыва затвердевшего интервала.

Другой задачей настоящего изобретения является способ вскрытия в подземной формации незатвердевшего интервала, способного к образованию частиц, таких как песок, включающий стадию затвердевания упомянутого интервала закачиванием в упомянутый интервал водного раствора коллоидных частиц и рН модификатора и/или модификатора ионного состава для образования плотного геля, который скрепляет частицы вместе, и закупоривающего агента для поддержания однородных скоростей потока водного раствора через области интервала с несходными проницаемостями и затем стадию гидравлического гидроразрыва затвердевшего интервала.

### **Краткое описание чертежей**

Вышеупомянутые и дополнительные задачи, признаки и преимущества настоящего изобретения будут лучше поняты при ссылке на приложенное детальное описание и чертежи, где

фиг. 1 показывает изменение времени гелеобразования при комнатной температуре раствора коллоидного диоксида кремния в зависимости от концентрации соляной кислоты;

фиг. 2 является схематичным видом устройства, используемого для оценки приемистости коллоидного диоксида кремния в песчаные пробки различной проницаемости;

фиг. 3 показывает измерения неограниченной прочности на сжатие (UCS) песчаных пробок с различной проницаемостью через формацию гелей частиц коллоидного диоксида кремния;

фиг. 4 показывает основную конфигурацию оборудования, используемого для выполнения испытаний затвердевания песка песчаных пробок, имеющих различную проницаемость, для моделирования операции одновременного затвердевания интервалов с несходной проницаемостью;

фиг. 5 показывает собранные объемы флюидов через песчаные пробки низкой (50-70 мД) и высокой (750 мД) проницаемости и входное давление для обеих песчаных пробок в эксперименте, выполненном с использованием оборудования, описанного на фиг. 4. Наблюдалось закупоривание пробки низкой проницаемости с последующим предпочтительным потоком через пробку высокой проницаемости;

фиг. 6 показывает средние скорости потока (6-A) и собранные объемы флюидов на выходах ячеек (6-B) в эксперименте, выполненном с использованием оборудования, изображенного на фиг. 4, когда состав микрометрических частиц был добавлен к раствору коллоидного диоксида кремния для улучшения отклонения потока к песчаной пробке низкой проницаемости;

фиг. 7 показывает результаты, подобные показанным на фиг. 6, с другим составом микрометрических частиц;

фиг. 8 показывает результаты, подобные показанным на фиг. 6, когда состав осажденных частиц диоксида кремния был добавлен к раствору коллоидного диоксида кремния для улучшения отклонения потока к песчаной пробке низкой проницаемости;

фиг. 9 показывает результаты, подобные показанным на фиг. 6, когда состав частиц слюды и крахмала эксперимента, показанного на фиг. 6, был добавлен к раствору коллоидного диоксида кремния для улучшения отклонения потока к песчаной пробке низкой проницаемости и система была предварительно промыта буферным раствором с оговоренным рН песчаных пробок.

### **Подробное описание изобретения**

Первой стадией способа вскрытия слабо затвердевших формаций согласно настоящему изобретению является отверждение упомянутых формаций закачиванием жидкости, содержащей коллоидную суспензию.

Коллоидными суспензиями являются типично дисперсии дискретных очень маленьких частиц сферических или удлиненных по форме, заряженных так, что отталкивание между одноименно заряженными частицами стабилизирует дисперсию. Нарушение зарядного баланса, например, из-за удаления воды, изменения рН или добавления соли или водно-смешивающегося органического растворителя заставляет коллоидные частицы соединяться, приводя к образованию геля.

Дисперсия предварительно уплотнена как жидкость, прозрачная в случае относительно низких концентраций частиц, становясь опалесцентной или молочной при более высоких концентрациях. В любом случае, дисперсия может быть взята как жидкость, которая очень упрощает дозировку.

Коммерческие растворы коллоидных частиц типично включают диоксид кремния (также известный как силиказоль) и оксиды алюминия, сурьмы, олова, церия, иттрия и циркония. Частицы являются, главным образом, сферическими с размерами частиц обычно в пределах от приблизительно 4 до приблизительно 250 нм, но удлиненные частицы с длиной до 300 нм являются также доступными и предположительно приемлемыми для изобретения. Частицы могут иметь отрицательный или положительный заряд.

Водные растворы коллоидных частиц диоксида кремния с размерами частиц в пределах между приблизительно 4 и приблизительно 100 нм, как было найдено, имели превосходную приемистость в песчаные пробки с такой низкой проницаемостью, как 50 мД. Предпочтительные коллоидные частицы имеют размер между 4 и 22 нм. Это уникальное свойство обеспечивает полную обработку матрицы на глубине нескольких футов. Не будучи связано с теорией, полагается, что после добавления рН модификатора и/или модификатора ионного состава диапазон соударений между частицами увеличивается и образуются силоксановые связи (Si-O-Si). Это приводит к плотному гелю, который скрепляет свободные частицы незатвердевшей формации (зерна песка). Действительно, после отверждения согласно изобретению песчаная пробка, которая перед обработкой не проявила абсолютно никакой когезии (поток песка как в песочных часах), показала сжимающую силу не менее чем приблизительно 1,72 МПа и проявилась как твердый разлом.

Коммерческие силиказолы доступны при концентрациях, находящихся между 15 и 50 вес.%. Такие коммерческие растворы могут быть использованы также или разбавлены до более низкого содержания диоксида кремния. Например, золи, содержащие между 25 и 50 вес.% диоксида кремния, обычно используются для целей этого изобретения, но могут быть разбавлены до 2 вес.%. Замечено, что объем закачанного раствора типично остается тем же самым, когда используются разбавленные растворы, но образуется гель более низкой сжимающей силы.

Температуры замерзания вызывают образование кристаллов льда в растворах коллоидного диоксида кремния, которое увеличивает концентрацию диоксида кремния в незамороженной части и ускоряет гелеобразование обогащенной диоксидом кремния фракции. При размораживании гелеобразный диоксид кремния не редиспергируется, но остается как осадок в расплавленном льду. В результате расплавленный материал также содержит пониженную концентрацию дисперсных частиц диоксида кремния и обычно является непригодным для использования. Необратимое гелеобразование коллоидного диоксида кремния при температурах ниже 0°C может быть предотвращено смешением упомянутого раствора коллоидного диоксида кремния с этиленгликолем, пропиленгликолем или метанолом при концентрации между 0,1 и 10 вес.%, предпочтительно между 0,1 и 5 вес.%.

Образование геля вызвано рН модификатором и/или модификатором ионного состава. Согласно одному варианту осуществления настоящего изобретения упомянутый модификатор ионного состава может быть солью. В этом случае суспензию коллоидного диоксида кремния (например, Ludox®) смешивают с минерализованной водой (солями, содержащимися в этой минерализованной воде, являются предпочтительно хлорид калия, хлорид натрия или хлорид кальция, но могут также быть любыми минеральными или органическими солями или соединениями, подходящими для изменения ионного состава коллоидного раствора). Когда соль добавлена, противоположно заряженные ионы (в бессолевои золе положительные/отрицательные противоположно заряженные ионы, уравнивающие отрицательный/положительный поверхностный заряд, являются диффузно ориентированными вокруг частицы) придвигаются намного более тесно к поверхности частицы, что уменьшает расстояние, через которое действуют силы отталкивания. Это вызывает понижение стабильности золя увеличением вероятности соударений между частицами, и это вызывает образование плотного геля. Время гелеобразования может быть установлено с концентрацией минерализованной воды или температурой. Распределение размера частиц и концентрация частиц могут также влиять на время гелеобразования.

Согласно другому варианту осуществления настоящего изобретения упомянутым рН модификатором является кислота или основание. Дисперсии коллоидного диоксида кремния, используемые для применений цементирования песка, обычно имеют рН между 8 и 11, но могут также быть кислыми (рН приблизительно 4). Добавлением кислого раствора/раствора основания рН коллоидной дисперсии может быть уменьшен/увеличен. Таким образом, заряды на поверхности частиц диоксида кремния уменьшаются и частицы могут войти в контакт и образовать силоксановые связи. Тенденция наиболее коллоидного диоксида кремния к гелю является самой большой при рН 5-6. Время гелеобразования может быть установлено с рН раствора и/или температурой для данного размера частиц диоксида кремния и концентрацией.

Концентрация рН модификатора и модификатора ионного состава находится между 0,1 и 5 вес.% и предпочтительно между 0,1 и 1,5 вес.%.

Объем закачиваемых отверждающих флюидов предпочтительно равен, по меньшей мере, двойному объему пор отверждаемой области формации. Упомянутая область формации обычно не больше чем 10 объемов пор в отверждаемой области. Обычно отверждаемая область имеет глубину между приблизительно 15 и приблизительно 90 см, типично приблизительно 30 см.

В случае, если отверждаемая формация является гетерогенной, процесс отверждения может быть выполнен с использованием выдержки по времени, в силу чего накачана часть отверждающего флюида, тогда накачивание остановлено так, что зоны более высокой проницаемости и, следовательно, более высокой приемистости являются затвердевшими. Ступенчатую процедуру повторяют, пока весь отверждающий флюид не будет накачан.

Согласно другому варианту осуществления настоящего изобретения отверждающий флюид включает не только коллоидные частицы, но также микрометрические частицы, такие как осажденные частицы диоксида кремния. Под микрометрическими частицами подразумевают частицы в диапазоне между

приблизительно 0,5 и приблизительно 100 мкм и наиболее предпочтительно системы, имеющие по меньшей мере 80% частиц в диапазоне размера между приблизительно 1 и приблизительно 60 мкм. Микрометрические частицы имеют тенденцию проникать в области более высокой проницаемости и начинают образовывать низкопроницаемую корку на стенках резервуара, таким образом отклоняя отверждающий флюид к областям более низкой проницаемости и поддерживая постоянные скорости потока через отверждающиеся зоны с неравномерной проницаемостью. Упомянутые микрометрические частицы могут быть, например слюдой, осажденным диоксидом кремния, коллоидальным диоксидом кремния, неразбухающей глиной и крахмалом.

#### Пример 1. Выбор суспензии.

Десять коммерческих суспензий водного коллоидного диоксида кремния были протестированы. Некоторые характеристики суспензий приведены в табл. 1 ниже, включая заряд (N: отрицательный, P: положительный), средний размер частиц, содержание диоксида кремния, удельную поверхность (Ssp) и pH. Суспензии были загущены или добавлением соли (2 мл 4M NaCl, добавленные к 14 мл коллоидной суспензии, см. результаты в табл. 2), или добавлением соляной кислоты (15 вес.% водного раствора кислоты, добавленного к 15 мл коллоидной суспензии, см. результаты в табл. 3). После 2 дней при 66°C сопротивление геля было оценено со шпателем приложением низкого давления (сопротивление 1 геля) или высокого давления (сопротивление 5 геля). Значение, располагающееся между 1 и 5, было оценено в зависимости от сопротивления геля (1 - для геля очень низкой силы, 5 - для геля высокой силы).

Таблица 1

№	Заряд	Средний размер частиц (нм)	Диоксид кремния (вес.%)	Удельная поверхность (м <sup>2</sup> /г)	pH
1	N	7	30	345	10
2	N	12	30	220	8,9
3	N	12	40	220	9,7
4	N	22	50	140	9
5	N	4	15	Неизвестно	11
6	N	100	50	Неизвестно	9
7	N	40	50	80	9,5
8	N	12	30	215	8,2
9	N	13-14	30	210-230	9,6
10	P	12	30	230	4,5

Таблица 2

№	Сопротивление геля
1	4,5
2	3
3	4,5
4	4,5
5	2,5
6	3
7	4
8	1
9	1
10	1

Таблица 3

№	15 вес.% HCl (мл)	pH		Сопротивление геля
		до	после	
1	0,5	10	7	4
2	0,3	9	3	2
3	0,3	10	7	4
4	0,3	9	3	4
5	0,75	11	8	3
6	0,3	9	2	1
7	0,3	9	3	2
8	0,2	8	2	1
9	0,5	7,0	6	1
10	0,2	4,5	3	Нет геля

Эти предварительные тесты показали, что суспензии с наименьшим размером коллоидных частиц (ниже 10 нм) обеспечивают лучшую прочность геля. Чем выше концентрация частиц, тем более прочный гель. Было дополнительно найдено, что меньшие частицы и более высокие концентрации приводили в лаборатории к более быстрому развитию геля.

Пример 2. Оптимальный pH.

Была выбрана суспензия № 3 примера 1. К 15 мл суспензии были добавлены различные количества соляной кислоты. Отношение между общей концентрацией HCl в суспензии и временем гелеобразования (в часах) при комнатной температуре изображено на фиг. 1. Самое короткое время гелеобразования было получено с концентрацией кислоты 0,32 вес.%, соответствующей pH между приблизительно 6 и приблизительно 7.

Когда тот же самый тест был повторен с суспензией № 1 примера 1, было найдено, что самое короткое время гелеобразования - с pH между приблизительно 5 и приблизительно 6. Это показывает, что, когда используют кислоту, чтобы вызвать гелеобразование, концентрация должна предпочтительно быть подобрана так, чтобы pH суспензии был немного слабощелочным (pH между приблизительно 5 и приблизительно 7) для получения самого короткого времени гелеобразования.

Пример 3. Тесты закачивания.

Фиг. 2 является схематичным видом устройства, используемого для оценки приемистости коллоидного диоксида кремния в песчаные пробки различной проницаемости. Это устройство включает в себя трубчатую ячейку 1, закрытую на одном конце верхним колпачком 2 и нижним колпачком 3 на другом конце. Песчаная пробка 4 помещена в ячейку 1 между двумя ситами 5. Поршень 6 включает в себя вход 7 жидкости для закачивания жидкостей обработки и предварительной обработки. Ячейка дополнительно соединена с источником 8 газа, таким как азот, который позволяет уплотнять песок проталкиванием поршня. Нижний колпачок содержит выход 9 жидкости для сбора жидкостей, которые передвигаются через песчаную пробку 4.

Песчаная пробка с 750 мД была предварительно промыта 2 вес.% KCl раствором перед закачиванием суспензии № 1 коллоидного диоксида кремния примера 1 с концентрацией соляной кислоты приблизительно 0,45 вес.% (pH между 6 и 7). Давление закачивания было только 0,04 МПа при температуре окружающей среды. Ячейка была оставлена в духовом шкафу на одну ночь при 93°C. Возвратная проницаемость была меньше чем 1 мД.

Песчаная пробка с 50 мД была предварительно промыта раствором соляной кислоты при pH 4. Тест был выполнен при 82°C. Та же самая жидкость обработки, как в высокопроницаемой пробке, была закачана под давлением закачивания приблизительно 0,34 МПа. Пробку отверждали 3 дня в духовом шкафу при 93°C. Возвратная проницаемость была меньше чем 1 мД.

Пример 4. Сжимающие тесты.

Неограниченная прочность на сжатие (UCS) затвердевших пробок была измерена после нескольких недель отверждения при 65°C. Три песчаные пробки, имеющие начальную проницаемость приблизительно 50-70 мД, приблизительно 750 мД и приблизительно 3 Д, были протестированы (2 теста были выполнены для каждой песчаной пробки). Песчаные пробки были отверждены коллоидным диоксидом кремния № 3 примера 1 с KCl, используемым как модификатор ионного состава. Результаты показаны на фиг. 3. Во всех случаях образование гелей приводило к достижению отвержденных пробок с прочностями на сжатие, располагающимися между 1,72 и 3,45 МПа.

Пример 5. Приемистость и отклонение без закупоривающих агентов.

Отверждаемые формации являются часто неомогенными с зонами более низкой и более высокой проницаемости. Когда отверждающий флюид закачан в такую формацию, он предпочтительно внедряется в зоны более высокой проницаемости. Если время гелеобразования отверждающего флюида является длинным по сравнению с временем закачивания, вероятно, что ни одна из зон более низкой проницаемости не отвержена.

Для оценки возможности обеспечения обработки по всему отверждаемому интервалу использовалось экспериментальное устройство, изображенное на фиг. 4. Оборудование состоит из двух ячеек (11 и 12) Hassler, связанных параллельно, в которых песчаные пробки (13 и 14), имеющие различные проницаемости, ограничены. Флюиды накачивают поршневыми насосами А и В и собирают через выходы ячеек (15 и 16). Ограничивающее давление установлено гидравлически насосом С, и электрическая система нагрева взаимосвязана с ячейками для достижения желательной температуры теста.

Ячейка 11 была заполнена песчаной пробкой 13, имеющей проницаемость приблизительно 50 мД. Ячейка 12 была заполнена песчаной пробкой 14, имеющей проницаемость приблизительно 750 мД. Каждая песчаная пробка имела диаметр 2,5 см и длину 30 см. Обработка была выполнена при 93°C и ограничивающем давлении 6,9 МПа. Два объема порового пространства 2 вес.% KCl и два объема порового пространства HCl при pH 4 были использованы как жидкость для предварительной промывки. Отверждающая обработка состояла из коллоидного диоксида кремния состава № 3 примера 1 с pH, установленным 8. Фиг. 5 показывает объем, собранный из выходов 15 и 16, соответственно, ячеек 11 и 12, и давление закачивания. В течение приблизительно 25 мин никакой флюид не был собран из выхода 15; толь-

ко песчаная пробка высокой проницаемости была отверждена. В конце этой первой фазы началось отклонение, и флюид был собран на выходе 16. Приблизительно 103 мин пробка низкой проницаемости была закупорена. Наблюдалось закупоривание низкой проницаемости с последующим предпочтительным течением через пробку высокой проницаемости.

Пример 6. Приемистость и отклонение с закупоривающими агентами.

Пример 5 подтверждает, что полная обработка гетерогенной зоны может быть достигнута с отверждающим флюидом, основанным только на коллоидном диоксиде кремния; добавление более крупных микрометрических частиц, имеющих размеры между приблизительно 0,5 и приблизительно 100 мкм, может существенно уменьшить продолжительность обработки и, тем самым, необходимый накачиваемый объем. Три типа более крупных частиц были протестированы. Распределение этого размера частиц представлено в табл. 4 ниже. Распределение размера частиц было таким, что, например, 80% частиц типа А были между приблизительно 4,7 и приблизительно 51,8 мкм.

Таблица 4

	А	В	С
$d_{0.5}$	14,5 мкм	23,2 мкм	3,4 мкм
$d_{0.5}$	4,7 мкм	6,7 мкм	1,7 мкм
$d_{0.5}$	51,8 мкм	58,1 мкм	7,0 мкм

Было использовано экспериментальное устройство фиг. 4. Отверждающий флюид был закачан при 93°C при давлении ограничения 6,9 МПа. рН отверждающих флюидов был установлен между 7 и 8, с раствором 15 вес.% HCl. К отверждающим флюидам примера 5 были добавлены растворы микрометрических частиц А, В и С при концентрациях между 0,1 и 0,5 вес.%.

Фиг. 6 показывает средние скорости потока (6-А) и объемы флюидов, собранные на выходах ячеек (6-В), в эксперименте, выполненном с помощью оборудования, изображенного на фиг. 4, когда состав частиц слюды и крахмала (размеры частиц между 0,5 и 100 мкм, средний диаметр 14,5 мкм) был добавлен к раствору коллоидного диоксида кремния для улучшения отклонения потока к песчаной пробке низкой проницаемости (50-70 мД), когда вторая пробка была пробкой высокопроницаемой (750 мД).

С частицами типа А при 0,25 вес.% наблюдалось, что начало затвердевания пробки низкой проницаемости произошло только после приблизительно 10 мин и что было достигнуто отношение скоростей потока 4:1 (высокая проницаемость:низкая проницаемость). Отношение между 10:1 и 15:1 ожидается без закупоривающих агентов. Поэтому добавление более крупных микрометрических частиц увеличило относительную скорость потока через пробку низкой проницаемости. После приблизительно 40 мин обе пробки оказались закупоренными.

Фиг. 7 показывает средние скорости потока как функцию времени (фиг. 7-А), протекающего через пробку высокой проницаемости (750 мД) и пробку низкой проницаемости (50 мД), для жидкости, содержащей частицы типа В (0,5 вес.% в данном примере). Объемы жидкости, собираемой на конце каждой пробки, показаны на фиг. 7-В. Частицы типа В оказались менее эффективными, чем частицы типа А с началом затвердевания пробки низкой проницаемости, происходящего приблизительно после 20 мин, и среднего отношения расходов между пробками высокой и низкой проницаемости приблизительно 6:1.

Фиг. 8 показывает результаты, подобные показанным на фиг. 6, когда состав осажденных частиц диоксида кремния (размеры частиц между 0,5 и 100 мкм, средний диаметр 3,4 мкм) был добавлен к раствору коллоидного диоксида кремния для улучшения отклонения потока к песчаной пробке низкой проницаемости (50-70 мД). Отношение скоростей потока около 1:1 (высокая проницаемость:низкая проницаемость) было достигнуто с этим закупоривающим агентом.

На фиг. 8-А показаны средние скорости потока как функция времени, протекающего через пробку высокой проницаемости (750 мД) и пробку низкой проницаемости (50 мД), для жидкости, содержащей частицы типа В (0,1 вес.% в данном примере). Объемы жидкости, собираемой на конце каждой пробки, показаны на фиг. 8-В. Обе пробки оказались затвердевшими почти одновременно, и среднее отношение скоростей потока между пробками высокой и низкой проницаемости было приблизительно 1:1, показывая, что комбинация коллоидных частиц и микрометрических частиц, подобных частицам типа С, привела к гомогенной обработке негомогенной формации.

Фиг. 9 показывает результаты, подобные показанным на фиг. 6, когда состав частиц слюды и крахмала, изложенный на фиг. 6, был добавлен к раствору коллоидного диоксида кремния для улучшения отклонения потока к песчаной пробке низкой проницаемости (50-70 мД) и система была предварительно промыта буферным раствором с оговоренным рН песчаных пробок. Частицы типа А были использованы (0,5 вес.% в данном примере) с предварительной промывкой буферного раствора с рН 9,3, применяемой до закачивания раствора коллоидного диоксида кремния, который также содержит буферный агент для регулирования их рН до 9,3. Объемы жидкости, собираемой на конце каждой пробки, показаны на фиг. 9-В. Обе пробки оказались затвердевшими почти одновременно, и среднее отношение скоростей потока меж-

ду пробками высокой и низкой проницаемости было приблизительно 3:1, показывая, что больше жидкости было закачено и закупоривающий эффект был улучшен контролем pH системы.

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ вскрытия незатвердевшего интервала в подземной формации, включающий стадию затвердевания упомянутого интервала закачиванием в упомянутый интервал водного коллоидного раствора, микрометрических частиц, pH модификатора и/или модификатора ионного состава для образования плотного геля, который удерживает частицы вместе, и затем стадию гидравлического разрыва затвердевшего интервала.

2. Способ по п.1, в котором коллоидные частицы имеют средний диаметр между 4 и 100 нм.

3. Способ по п.1 или 2, в котором коллоидные частицы являются частицами диоксида кремния.

4. Способ по п.3, в котором частицы диоксида кремния присутствуют в растворе с концентрацией между 2 и 50 вес.% и раствор содержит этиленгликоль, пропиленгликоль или метанол с концентрацией между 0,1 и 10 вес.%.

5. Способ по любому из предшествующих пунктов, в котором затвердевший интервал имеет прочность на сжатие, большую чем 1,72 МПа, и область затвердевания имеет глубину между приблизительно 15 и приблизительно 90 см.

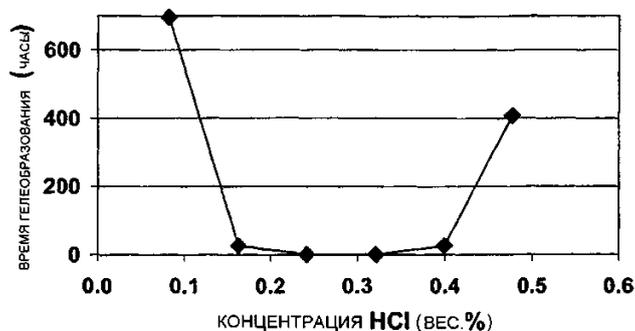
6. Способ по любому из предшествующих пунктов, в котором модификатор ионного состава является рассолом, модификатор pH является кислотой или основанием и концентрация pH модификатора и/или модификатора ионного состава находится между 0,1 и 5 вес.%.

7. Способ по любому из предшествующих пунктов, в котором на стадии гидравлического разрыва гидроразрыв рассчитывают для создания длины, большей чем приблизительно удвоенная глубина затвердевшего интервала, и объем закачиваемых отверждающих флюидов находится между приблизительно 2 и приблизительно 10 объемов пор отверждаемой формации.

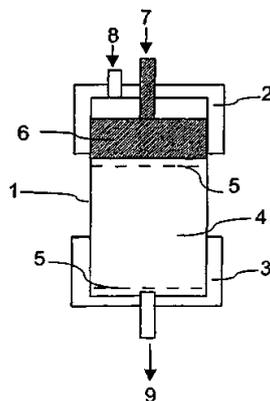
8. Способ по любому из предшествующих пунктов, дополнительно включающий отверждающую обработку закачиванием с использованием схемы с выдержкой по времени.

9. Способ по любому из предшествующих пунктов, в котором упомянутые коллоидные частицы являются заряженными.

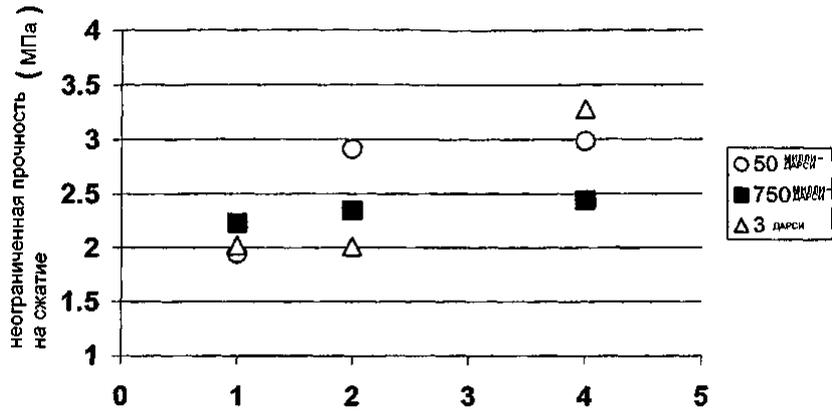
10. Способ по любому из пп.1-9, в котором упомянутые микрометрические частицы выбраны из группы, состоящей из слюды, осажденного диоксида кремния, коллоидного диоксида кремния, неразбухающей глины и крахмала, и 80% упомянутых микрометрических частиц имеют распределение по размерам в диапазоне между приблизительно 1 и приблизительно 60 мкм.



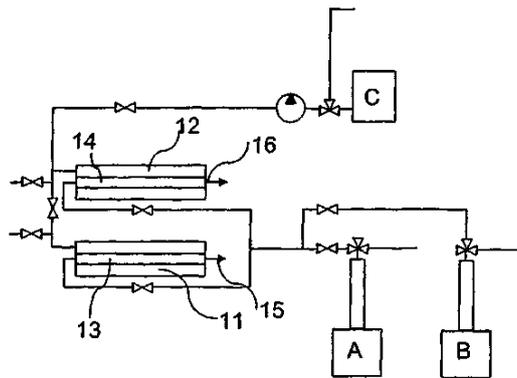
Фиг. 1



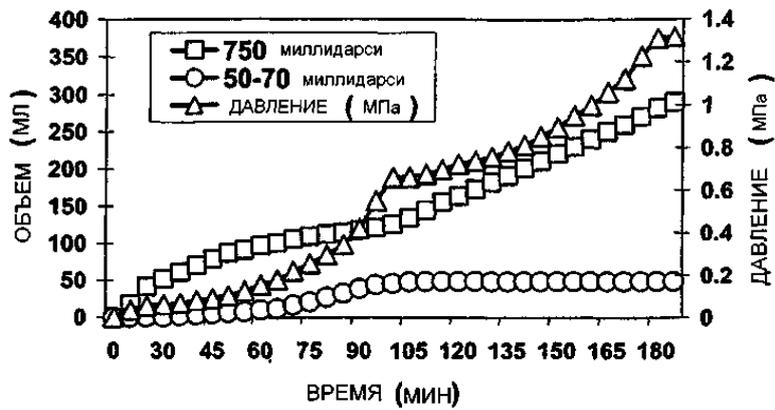
Фиг. 2



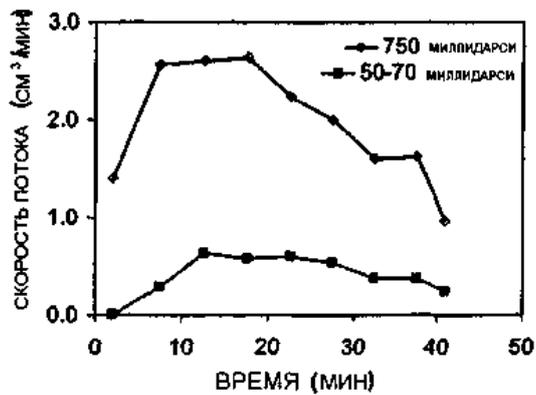
Фиг. 3



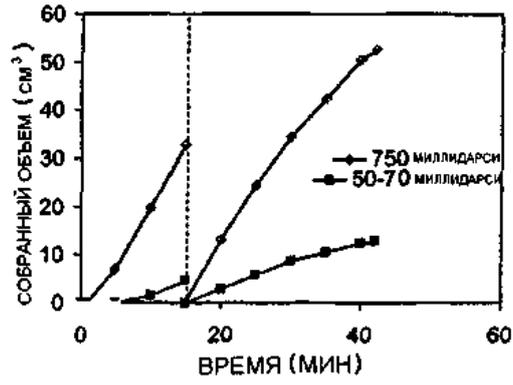
Фиг. 4



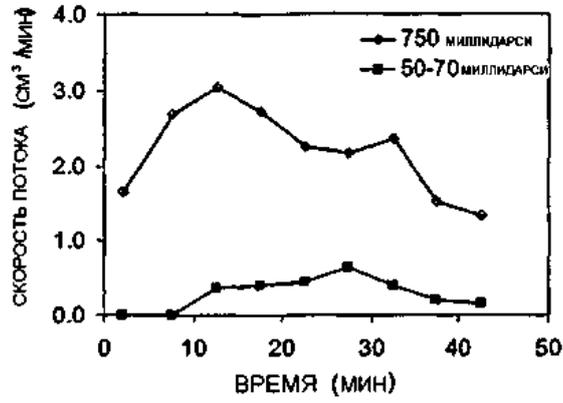
Фиг. 5



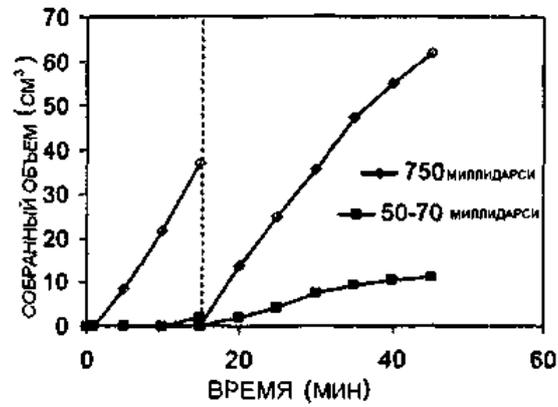
Фиг. 6-A



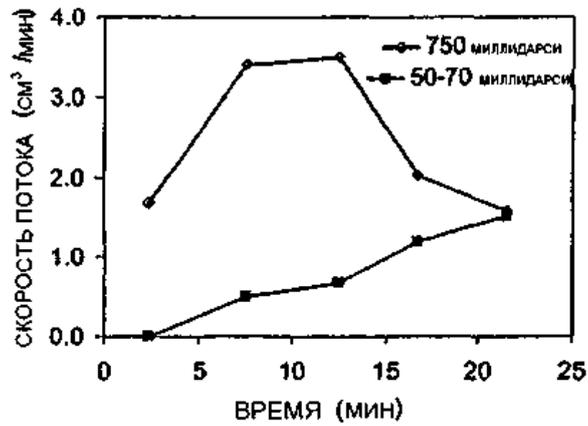
Фиг. 6-В



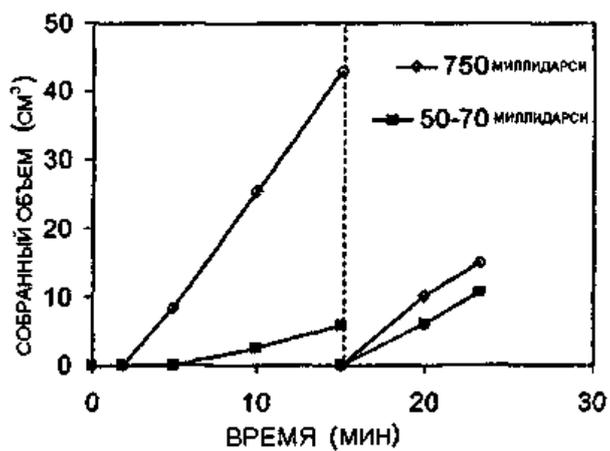
Фиг. 7-А



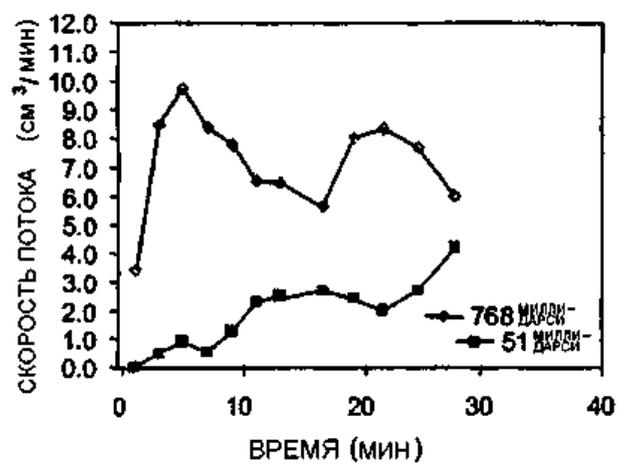
Фиг. 7-В



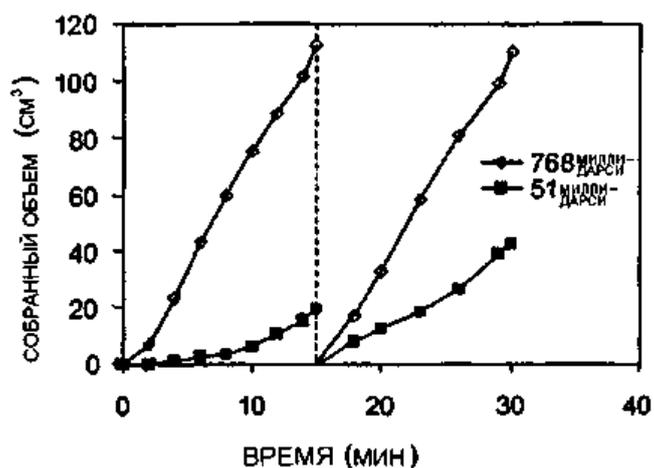
Фиг. 8-А



Фиг. 8-В



Фиг. 9-А



Фиг. 9-В

