

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **026640**(13) **B1**(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2017.04.28

(21) Номер заявки
201400769

(22) Дата подачи заявки
2012.12.20

(51) Int. Cl. *E21B 43/20* (2006.01)
B01D 61/44 (2006.01)
C02F 1/469 (2006.01)

(54) **СПОСОБ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПУТЁМ ВПРЫСКИВАНИЯ
ОБРАБОТАННОЙ ВОДЫ В НЕФТЕНОСНЫЙ ПЛАСТ И СИСТЕМА ДЛЯ ЕГО
ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ**

(31) **11196116.5**

(32) **2011.12.29**

(33) **EP**

(43) **2014.11.28**

(86) **PCT/EP2012/076415**

(87) **WO 2013/098193 2013.07.04**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**ШЕЛЛ ИНТЕРНЭШНЛ РИСЕРЧ
МААТСХАППИЙ Б.В. (NL)**

(72) Изобретатель:
**Янссен Альберт Йозеф Хендрик,
Схрадер Гёйло Александр, Вербеек
Паулюс Хенрикус Йоаннес (NL)**

(74) Представитель:
Стручков М.Н. (RU)

(56) **WO-A1-2007138327**
SHANKER MURALEEDAARAN ET AL.:
PROCEEDINGS OF SPE WESTERN REGIONAL
MEETING, 1 March 2009 (2009-03-01),
XP55052873, DOI: 10.2118/115952-MS, figure 3, the
whole document, table 1
US-A1-2008185346
US-A-3354068
US-B1-7789159
KR-A-20050022986
GB-A-1520877
WO-A1-9012758

(57) Изобретение относится к способу увеличения нефтеотдачи путём впрыскивания обработанной воды в нефтеносный пласт и системе для его осуществления. Нефтеотдачу повышают посредством отфильтровывания твёрдых частиц из морской воды в блоке (1, 2) фильтрации для получения предварительно обработанной морской воды; дополнительной обработки предварительно обработанной морской воды в блоке (3) емкостной деионизации (CDI), имеющем канал (17) для прохода потока предварительно обработанной морской воды между противоположно заряженными электродами (13, 14), которые адсорбируют ионы для получения обработанной морской воды (10); и впрыскиванием обработанной морской воды (10) с пониженной минерализацией и содержанием твёрдых частиц в пласт для сообщения подвижности сырой нефти и увеличения нефтеотдачи (EOR). Блоки (1-3) фильтрации и деионизации обеспечивают обработку морской воды (10) до чистоты, минерализации и содержания TDS, подходящими для увеличения нефтеотдачи без последующего составления смеси с необработанной морской водой для повторного регулирования величины TDS, и являются менее чувствительными к засорению и менее энергоёмкими, чем известные блоки обратного осмоса (RO) для обработки морской воды с целью осуществления увеличения нефтеотдачи.

B1**026640****026640****B1**

Область техники

Изобретение относится к способу увеличения нефтеотдачи путём впрыскивания обработанной воды в нефтеносный пласт и системе для его осуществления.

Уровень техники

Лишь только часть присутствующей в нефтеносном пласте нефти поддаётся извлечению за счёт естественного давления пласта. Количество нефти, извлекаемой в результате указанной "первичной" добычи, обычно составляет от 5 до 35% от количества находящейся в пласте нефти. Разработаны различные способы увеличения количества нефти, которое можно извлечь из нефтеносного пласта сверх того, что извлечено при первичной добыче.

Широко используемым способом вторичной добычи, применяемым для увеличения количества извлекаемой из пласта нефти после первичной добычи, является заводнение, при котором в нефтеносный пласт через нагнетательную скважину впрыскивают воду с целью сообщения подвижности нефти и прохождения её через пласт для добычи из продуктивной скважины. В последнее время при заводнении используют воду низкой минерализации, что увеличивает количество извлекаемой из пласта нефти по сравнению с традиционным заводнением с использованием воды повышенной минерализации. Воду с низкой минерализацией можно применять вместо традиционно используемой воды с повышенной минерализацией при вторичной добыче путем заводнения или в третичном процессе извлечения после традиционного нагнетания воды с повышенной минерализацией для дополнительного повышения нефтеотдачи.

Впрыскивание воды с низкой минерализацией в пласт может ослаблять ионное связывание нефти с пластом внутри пор пласта в результате двойного расширения слоя, что приводит к уменьшению адсорбционной ёмкости породы по углеводородам. Это увеличивает подвижность нефти в пласте с помощью перевода поверхности пор пласта в состояние большей смачиваемости водой и меньшей смачиваемости нефтью, позволяя подвижной нефти удаляться из пор, в которых она пребывает, и продвигаться к продуктивной скважине для добычи из пласта.

Вода с низкой минерализацией, используемая для нагнетания при заводнении, как правило, имеет общее содержание растворённых твёрдых частиц (TDS) от 200 до 5000 частиц на миллион частиц воды (ppm), преимущественно от 1000 до 5000 ppm, для обеспечения адекватной минерализации воды с целью предотвращения повреждения пласта.

Часто воду с низкой минерализацией, подаваемую для увеличения нефтеотдачи, получают опреснением исходной воды, имеющей гораздо более высокую минерализацию. Обычно исходной водой является морская вода, которая подвергается обработке для получения воды с низкой минерализацией, в частности для добычи нефти из месторождений под морским дном. Морская вода, как правило, имеет TDS от 30000 до 50000 ppm. В качестве исходной воды можно использовать солоноватую воду, пластовую воду с высокой минерализацией, добываемую из пласта, и воду водоносного горизонта с высокой минерализацией также, которые можно опреснять для получения воды с низкой минерализацией. Такие источники воды могут иметь TDS от 10000 до 250000 ppm.

Обычно применяемые технологии опреснения воды включают в себя процессы дистилляции, такие как многоступенчатое мгновенное выпаривание, многоколонная дистилляция, механическое и/или термическое сжатие паров, а также мембранные процессы, такие как обратный осмос (RO), нанофильтрация (NF) и/или вариации электродиализа. В заявке WO 2011/135048 и на сайте www.voltea.com раскрыты способ и устройство для удаления ионов, например, из сточных вод способом ёмкостной деионизации (CDI). Более подробную информацию по методу CDI можно обнаружить в научной работе, опубликованной в журнале *Environmental Science and Technology*, vol. 36/13, page 3017, 2002 и в статье "Capacitive deionization as an electrochemical means of saving energy and delivering clean water. Comparison to present desalination practices: Will it compete?" авторов M.A. Anderson et al., опубликованной в журнале *Journal Electrochimica Acta* 55(2010)3845-3856 и на сайте www.elsevier.com/locate/electacta.

В последней из указанных статье авторов M.A. Anderson et al. на фиг. 8 показано количество электрической работы, требуемой для опреснения воды различной минерализации, и содержится заключение о том, что в выбранных условиях и при концентрациях ниже 5000 мг/л, CDI могла бы быть конкурентной технологией даже в случае достижения умеренных коэффициентов полезного действия, составляющих от 60-70%.

Наиболее широко применяемый способ опреснения воды, используемый для увеличения нефтеотдачи, в общем случае включает в себя микрофильтр (MF) или ультрафильтр (UF) для отделения твёрдых частиц от воды фильтрованием и узел обратного осмоса (RO) или сочетание узла нанофильтрации и узла RO для последующего опреснения воды. В ряде исследований по опреснению морской воды в прибрежной зоне содержится заключение о том, что обратный осмос морской воды (SWRO) либо с традиционной, либо с мембранной предварительной обработкой, безусловно, является наиболее целесообразным способом опреснения, доступным для применения в прибрежной зоне, вследствие подходящей массы, стоимости, общей занимаемой площади и расчётной производительности.

Надлежащая обработка закачиваемой воды с низкой минерализацией для увеличения нефтеотдачи имеет решающее значение для предотвращения повреждения пласта, связанного с минерализацией. Если

глины, которые присутствуют в пласте, несовместимы с закачиваемой водой, может происходить дефлокуляция глин. При дефлокуляции глин в пласте частицы глин могут диспергироваться и мигрировать в каналы пор, приводя к повреждению пласта. В общем случае закачиваемая вода или текучая среда для завершения скважин должна иметь адекватную минерализацию (измеренную в виде общей концентрации и/или концентрации двухвалентных катионов) с целью предотвращения дефлокуляции пластовых глин в равновесном состоянии системы. В дополнение к этому, должно иметься достаточное количество двухвалентных катионов (т.е. Ca^{++} , Mg^{++}) в замещающей текучей среде (например, закачиваемой морской воде) для предотвращения дефлокуляции пластовой глины при переходе от одной водной композиции к другой.

Недостаток как технологий дистилляции, так и способов SWRO заключается в том, что обработанная исходная вода обладает слишком высокой чистотой, требующей составления смеси с морской водой или мембранным потоком ретентата, имеющим высокую минерализацию, для доведения величины TDS до желаемых уровней. Технологии опреснения на основе дистилляции и использования RO-мембран, как правило, обеспечивают снижение TDS в обработанной исходной воде до величины менее 500 ppm, а часто менее 200 ppm. Во избежание повреждения пласта желательно использовать воду с низкой минерализацией, характеризующуюся величиной TDS от 1000 до 5000 ppm, следовательно, к воде, полученной в результате использования технологий опреснения на основе дистилляции и применения RO-мембран, как правило, снова добавляют ионы с целью использования для увеличения нефтеотдачи, например, в виде составления смесей с морской водой или мембранным потоком ретентата, имеющим высокую минерализацию. Дополнительные недостатки способа RO состоят в том, что RO-мембраны чувствительны к засорению, а процесс RO является энергоёмким.

Таким образом, существует необходимость в разработке улучшенного и эффективного способа обработки морской воды и системы для увеличения нефтеотдачи, которые обеспечивают придание обрабатываемой воде подходящих для этих целей чистоты, минерализации и TDS и которые, следовательно, не требуют последующего повторного составления смеси с необработанной морской водой для повторного доведения величины TDS до желаемого уровня, и которые являются менее чувствительными к засорению, а также менее энергоёмкими, чем RO.

Раскрытие изобретения

В соответствии с изобретением разработан способ увеличения нефтеотдачи нефтеносного пласта, включающий в себя этапы, на которых

отделяют фильтрованием, по меньшей мере, некоторые твёрдые частицы от исходной воды, имеющей общее содержание растворённых твёрдых частиц от 10000 до 50000 ppm, в блоке фильтрации для получения предварительно обработанной воды;

дополнительно обрабатывают предварительно обработанную воду в блоке емкостной деионизации (CDI), включающем в себя по меньшей мере один канал для продвижения потока предварительно обработанной морской воды, расположенный между парой противоположно заряженных электродов, которые адсорбируют и посредством этого удаляют, по меньшей мере, некоторые ионы из предварительно обработанной воды, протекающей через данный канал для продвижения потока, получая, тем самым, обработанную воду с пониженной минерализацией и содержанием твёрдых частиц относительно исходной воды; и

впрыскивают обработанную воду с пониженной минерализацией и содержанием твёрдых частиц в пласт для сообщения подвижности сырой нефти и увеличения нефтеотдачи.

Электроды могут включать в себя практически параллельные пористые пластины, содержащие углеродный аэрогель и/или активированные угли и электрически соединенные с источником постоянного тока (DC).

Блок фильтрации может включать в себя блок нанофильтрации (NF) и/или блок микрофильтра. Блок нанофильтрации и/или блок микрофильтра может включать в себя узел нанофильтрации, в котором образуется предварительно обработанная морская вода с пониженной жёсткостью и концентрацией сульфатов и содержащая менее 1 ppm нефти и менее 1 ppm общего количества взвешенных твёрдых частиц (TSS).

Исходная вода может иметь общее содержание взвешенных твёрдых частиц (TDS) от 10000 до 50000 ppm. Исходная вода может представлять собой морскую воду; солоноватую воду; воду, попутно добываемую из пласта; минерализованную воду водоносного горизонта или их смеси. Обработанная вода имеет пониженную минерализацию и содержание твёрдых частиц относительно исходной воды. Обработанная вода может характеризоваться величиной TDS от 1000 до 5000 ppm или от 2000 до 5000 ppm.

Предполагается, что указанная выше область рабочих режимов узла NF и узла CDI обладает синергетическим эффектом, который оптимизирует эффективность и эксплуатационные характеристики узлов NF и CDI неожиданным образом, что обеспечивает преодоление предвзятого мнения, вытекающего из статьи авторов M.A. Anderson et al., о том, что способ CDI будет эффективным только для опреснения солоноватой воды с величиной TDS менее 5000 мг/л.

Кроме того, в соответствии с настоящим изобретением предлагается система для увеличения нефтеотдачи нефтеносного пласта, которая включает в себя

блок фильтрации для отделения фильтрованием, по меньшей мере, некоторых твёрдых частиц от исходной воды, имеющей TDS от 10000 до 50000 ppm, для получения предварительно обработанной воды;

блок емкостной деионизации (CDI), включающий в себя по меньшей мере один канал для потока предварительно обработанной воды, расположенный между парой практически параллельных противоположно заряженных электродов, обеспечивающих адсорбцию и посредством этого удаление, по меньшей мере, некоторых ионов из предварительно обработанной воды, протекающей через данный канал, с целью получения обработанной воды с пониженными минерализацией и содержанием твёрдых частиц; и

средства впрыскивания обработанной воды с пониженными минерализацией и содержанием твёрдых частиц в приповерхностный пласт с целью сообщения подвижности сырой нефти и увеличения тем самым степени извлечения сырой нефти из пласта.

Блок фильтрации может включать в себя блок капиллярной нанофильтрации (NF) и/или блок микрофильтра и может быть выполнен с возможностью получения предварительно обработанной воды с пониженной жёсткостью и концентрацией сульфатов и содержащей менее 1 ppm нефти и менее 1 ppm общего количества взвешенных твёрдых частиц (TSS).

Указанные и другие особенности изобретения, варианты его осуществления и преимущества изложены в дальнейшем подробном описании со ссылками на чертежи, на которых аналогичные номера позиций на различных фигурах обозначают одни и те же или аналогичные предметы.

Краткое описание чертежей

На фиг. 1 изображена технологическая схема блоков фильтрации и емкостной деионизации для получения обработанной воды, подходящей для увеличения нефтеотдачи в соответствии с настоящим изобретением.

На фиг. 2 более подробно показано продольное сечение канала для потока в показанном на фиг. 1 узле деионизации, в котором из минерализованной воды удаляются ионы.

Осуществление изобретения

Как показано на фиг. 1, технологическая схема установки обработки впрыскиваемой воды для увеличения нефтеотдачи согласно изобретению включает в себя блок 1 фильтра для удаления твёрдых частиц, блок 2 капиллярной нанофильтрации (NF) и блок 3 емкостной деионизации (CDI).

Поток 4 необработанной исходной воды, который может быть смешан в определённом соотношении с потоком рециркулированной впрыскиваемой и внутрислоевого воды из пласта или заменен им, подается в блок 1 для удаления твёрдых частиц. В этом блоке удаляются крупные частицы, и поток 4 разделяется на первый поток 5 предварительно обработанной воды и первый поток 6 отведенной воды. Первый поток 5 предварительно обработанной воды последовательно подается в блок 2 капиллярной или некапиллярной нанофильтрации (NF), в котором первый поток предварительно обработанной воды разделяется на второй поток 7 отведенной воды и второй поток 8 предварительно обработанной воды.

Второй поток 8 предварительно обработанной воды затем подается в блок 3 емкостной деионизации (CDI), в котором этот поток 8 разделяется на третий поток 9 отведенной воды и поток 10 обработанной воды, предназначенной для впрыска с целью увеличения нефтеотдачи.

Понижение жёсткости и минерализации обработанной для впрыска воды создаёт возможность для увеличения нефтеотдачи.

Смешивание потока исходной воды 4 с рассолом 10, имеющим низкую минерализацию, или замена им являются целесообразными, если в порах породы залежи нефтеносного пласта присутствует изначально высокоминерализованная пластовая вода, богатая двухвалентными ионами. Присутствие глин в породе залежи обуславливает пониженное общее содержание растворённых твёрдых частиц (TDS). Типичные предельные значения TDS составляют 1000-5000 ppm. Впрыскивание пресной воды для увеличения нефтеотдачи будет приводить к повреждению пласта в результате набухания глин.

Из патентного документа GB 2450269 известно, что опреснение воды и устранение ее жёсткости также является очень эффективным в отношении уменьшения количеств полимеров и поверхностно-активных веществ, требуемых для химического способа увеличения нефтеотдачи, и в отношении снижения рисков закисления продуктивного пласта и образования солевого отложения.

Источниками впрыскиваемой воды могут быть морская вода, солоноватая вода, вода водоносного горизонта или попутно добываемая вода, выбор которой зависит, например, от расположения месторождения, предельно допустимых сбросов в окружающую среду и/или целей повторного использования полученной воды.

Традиционные технологии опреснения морской воды можно классифицировать как способы дистилляции (например, MSF, MED) и мембранные процессы, такие как RO (обратный осмос), NF (нанофильтрация) и вариации электродиализа.

RO, как, например, SWRO (= обратный осмос морской воды) либо с традиционной, либо с мембранной предварительной обработкой, является в настоящее время наиболее практичным способом опреснения, доступным для применения в прибрежной зоне, где пространство, как правило, ограничено.

Однако способ RO обладает следующими недостатками:

получаемая вода имеет слишком высокую чистоту, и требуется составление ее смеси с исходной водой повышенной минерализации для достижения требуемого уровня TDS;
способ чувствителен к засорению;
высокое энергопотребление.

Настоящее изобретением представляет собой альтернативное решение для удаления частиц TDS, позволяющее устранить недостатки способа (SW)RO, т.е. применить способ емкостной деионизации (CDI), возможно, сочетаемого с капиллярной нанофильтрацией (NF).

Преимущество использования блока 3 CDI для обработки воды, применяемой для увеличения нефтеотдачи, состоит в том, что минерализацию/жесткость продукта можно регулировать посредством напряжения на электродах, следовательно, не потребуется составления смеси для повторного увеличения величины TDS.

Кроме того, не требуется никаких дополнительных химических веществ для регенерации блока 3 CDI.

Как показано на фиг. 2, блок 3 CDI имеет сквозной канал 17 для продвижения потока, расположенный между практически параллельными комплектами электродов, включающими в себя положительно и отрицательно заряженные электроды 11 и 12, которые покрыты верхним и нижним пористыми угольными электродами 13 и 14. Верхний пористый угольный электрод 13 может быть покрыт анионообменной мембраной 15, а нижний пористый угольный электрод 14 может быть покрыт катионообменной мембраной 16.

Поток предварительно обработанной воды 8, выходящий из блока 2 NF, показанный на фиг. 1, может протекать по каналу 17 между положительно и отрицательно заряженными электродами 11 и 12, которые притягивают анионы 20 и катионы 19, соответственно, вызывая в силу этого миграцию анионов в поры верхнего угольного электрода 13 и миграцию катионов в нижний угольный электрод 14.

Отсутствие барьеров для потока в сквозном канале 17 между анионообменной и катионообменной мембранами 15 и 16 может значительно снижать риск засорения по сравнению с RO-мембранами, которые склонны к засорению, обусловленному потоком воды через мелкую сетку отверстий в стенке RO-мембраны. К тому же, не требуется никаких насосов высокого давления, мембран, дистилляционных колонн или теплонагревателей.

Может потребоваться предварительная обработка, как показано на фиг. 1, для предотвращения забивания углеродной ткани, которую может использоваться в составе пористых угольных электродов 13 и 14 в блоке 3 CDI, например, в виде предварительной обработки потока 4 морской воды с помощью микрофильтра и/или другого фильтра в блоке 1 и/или в блоке 2 капиллярной или некапиллярной нанофильтрации (NF).

Было обнаружено, что присутствие природного органического вещества (NOM) в исходной воде снижает сорбционную способность углеродного аэрогелевого материала по отношению к неорганическим соединениям. Предварительная обработка для удаления NOM может способствовать эксплуатационной эффективности процесса CDI с использованием углеродных аэрогелей.

Частичное удаление двухвалентных ионов для снижения жесткости и концентрации сульфатов с помощью капиллярных нанофильтрационных мембран может быть эффективным в качестве предварительной обработки, поскольку такая мембрана менее подвержена засорению, чем спирально-навитые мембраны. Это делает раствор устойчивым в отношении присутствия следов нефти и твердых частиц, потенциально допуская повторное использование добываемой воды. Кроме того, частичное исключение ионов более высокой валентности потенциально позволяет лучше управлять процессом CDI, так как можно предполагать меньшую избирательность нагрузки.

Способ на основе CDI согласно изобретению по сравнению с известными способами опреснения MF-SWRO обладает следующими ключевыми особенностями.

1. Для осуществления способа опреснения на основе CDI может потребоваться меньшая масса и пространство, следовательно, способ опреснения на основе CDI можно применять для добычи нефти из месторождений под морским дном на отдельных платформах и судах, которые являются слишком ограниченными по объему и/или массе для применения способа MF-SWRO. К тому же, потребности в меньшем пространстве и массе могут приводить к значительно более низким затратам в случае применения на морской платформе или судне.

2. Способ опреснения на основе CDI может обеспечивать более высокую эффективность процесса вследствие того, что не требуется составления смеси.

3. Способ опреснения на основе CDI может приводить к меньшим проблемам, вызванным засорением, следовательно, данный процесс может требовать меньшего объема восстановительных мер.

4. Способ опреснения на основе CDI может приводить к меньшему энергопотреблению и отсутствию расходования химических веществ.

5. Способ опреснения на основе CDI может обеспечивать более высокие ремонтпригодность и эксплуатационную надежность.

Было обнаружено, что заводнение водой с низкой минерализацией (величина TDS около 3000 ppm) для увеличения нефтеотдачи, вместо впрыскивания необработанной морской воды, приводит к улучшению нефтеотдачи и характеризуется потенциально конкурентоспособной стоимостью по сравнению с химическими способами повышения нефтеотдачи. Испытания потока внутреннего контура и испытания отдельных скважин с применением химических индикаторов показали, что заводнение водой с низкой минерализацией может приводить к повышению эффективности извлечения углеводородов на величину от 5 до 38% в расчёте на начальные запасы нефти в пласте.

Впрыскивание потока 10 воды с низкой минерализацией может сдвигать смачиваемость породы залежи в направлении достижения состояния большего смачивания водой и, следовательно, может приводить к добыче дополнительного количества нефти. Возможен также и обратный эффект. Эффективность процесса, как известно, зависит от таких параметров, как состав пластовой воды (содержание ионов, pH), начальное насыщение воды, содержание глины в горной породе и свойства нефти. Кроме того, при использовании заводнения с применением раствора полимера для потока 10 воды с низкой минерализацией могут требоваться значительно меньшие количества полимера, что приводит тем самым к сокращению производственных мощностей, требуемых в прибрежной зоне для транспортировки, хранения и выполнения операций с полимерными химическими продуктами.

Ниже представлены возможные показатели блоков 1-3 обработки воды, показанных на фиг. 1.

1. Предварительная обработка в блоках 1 и 2 NF/RO (мембранное умягчение и опреснение):

нефть <1 ppm,

общее содержание взвешенных твёрдых частиц TSS <1 ppm.

2. Поток 10 низкой минерализации для заводнения:

соль: TDS ~ 1000-5000 ppm,

низкая жёсткость для ограничения количества полимера, необязательно добавляемого для увеличения нефтеотдачи и/или повышения вязкости.

3. Поток 10 обработанной воды для увеличения нефтеотдачи при использовании в качестве сырья для смеси ASP (щёлочь-ПАВ-полимер):

соль: TDS ~ 1000-2000 ppm,

деаэрат: O_2 <20 ppb (частиц на миллиард),

железо: Fe <2 ppm.

минимальные величины содержания O_2 и Fe требуются для предотвращения разложения/осаждения полимера

4. Отложение солей (жёсткость)/закисление потока 10 обработанной воды для увеличения нефтеотдачи:

умягчение: Ca <40 ppm, Mg <100 ppm,

SRU (блок удаления сульфатов) для противодействия закислению: SO_4 <20 ppm.

Блок удаления сульфатов (SRU) может включать в себя нанопористые мембраны (NF) для удаления из воды мультивалентных или двухвалентных анионов, таких как SO_4^{2-} . В присутствии SRB (сульфатовосстанавливающих бактерий) сульфат-ион превращается в HS^- , что приводит к закислению залежи.

Из международной заявки WO 2011/135048 известно, что ёмкостная деионизация (CDI) представляет собой технологию опреснения на основе накопления ионов в двойном электрическом слое. Указанный двойной слой образуется при введении электрически заряженных пористых угольных электродов 13, 14 в водный раствор электролита, подаваемый в виде потока 8 предварительно обработанной минерализованной воды. Количество заряда, используемого для образования двойного слоя, прямо пропорционально количеству ионов 19, 20, которые можно удалять. Способ CDI конкурирует со способами RO, ионного обмена и вариациями электролиза, но в отличие от некоторых из указанных традиционных процессов, не требует никаких дополнительных химических веществ для регенерации блока. Не требуется также насосов высокого давления, мембран, дистилляционных колонн или нагревателей. Принцип CDI берёт своё начало с 1970-х гг. Однако в то время не существовало доступных по цене подходящих материалов с высокой площадью поверхности и низким электрическим сопротивлением, следовательно, тогда было невозможно применять данную технологию для опреснения минерализованной воды. В настоящее время становятся доступными по более низким ценам такие материалы, как (экструдированный) порошок, волокна и нанотрубки. С целью достижения максимальной величины адсорбционной ёмкости за короткий период времени для изготовления пористых угольных электродов 13 и 14 используют материалы с высокой площадью поверхности и низким электрическим сопротивлением, такие как активированные угли. В большинстве текущих исследований по CDI в качестве адсорбирующего материала для пористых угольных электродов 13 и 14 используют углеродный аэрогель.

В конкурентной среде (т.е. в случае присутствия многочисленных ионов различающихся валентностей) сорбция двухвалентных частиц на пористых угольных электродах 13 и 14 ограничена.

Поток 8 предварительно обработанной воды может протекать по сквозному каналу 17 между анионообменной и катионообменной мембранами 15 и 16, покрываемыми положительно и отрицательно заряженными пористыми угольными электродами 13 и 14. При создании заданного электрического потенциала на

положительно и отрицательно заряженных угольных электродах 13 и 14, например, путём приложения положительного напряжения к положительно заряженному токосборнику первого электрода (анода) 11 и отрицательного напряжения к токосборнику второго электрода (катода) 12 анионы предварительно обработанной воды, проходящей по сквозному каналу 17, притягиваются к положительно заряженному пористому электроду 13, а катионы притягиваются к отрицательно заряженному пористому электроду 14. Таким путём ионы, включающие в себя катионы 19 и анионы 20, будут удаляться из воды, проходящей по каналу 17. При насыщении пористых электродов 13 и 14 ионами эти электроды можно регенерировать при помощи снятия разности потенциалов и их электрической разрядки. Это приведет к выделению ионов из пористых электродов 13 и 14 в проходящую по каналу 17 воду, повышая содержание ионов в воде, которая будет удаляться из канала 17. После выделения большинства ионов из пористых электродов 13 и 14 и удаления загрязнённой воды с повышенным содержанием ионов из канала 17 пористые электроды 13 и 14 регенерируются, и их можно снова использовать для притяжения ионов с целью опреснения воды.

Электрическая разность потенциалов между пористыми электродами 13 и 14 является довольно низкой, например меньше 2 В, предпочтительно меньше 1,7 В, а ещё более предпочтительно меньше 1,4 В. Также целесообразно, чтобы электрическое сопротивление электрического контура, образованного токосборниками 11, 12 и пористыми электродами 13, 14, было низким.

Углерод, используемый в составе пористых угольных электродов 13 и 14, может содержать активированный уголь и, возможно, любой другой углеродистый материал, такой как углеродная сажа, углеродные аэрогели, углеродные нановолокна, графен или углеродные нанотрубки.

Углерод может представлять собой химически активированный уголь или может быть углем, активированным паром. Углерод может иметь высокую площадь поверхности, равную по меньшей мере 500 м²/г, предпочтительно свыше 1000 м²/г, а более предпочтительно не менее 1500 м²/г. Катодный и анодный токосборники 11 и 12 могут быть изготовлены из различных углеродистых материалов. Пористые угольные электроды 13 и 14 могут включать в себя негибкие углеродные слои, содержащие углеродные аэрогели. Такие аэрогели можно получать в форме композитной бумаги: нетканой бумаги, изготовленной из углеродных волокон, пропитанных резорцин-формальдегидным аэрогелем и подвергнутых пиролизу. В зависимости от плотности углеродные аэрогели могут быть электропроводными, обеспечивая получение композитной аэрогелевой бумаги, применяемой при изготовлении электродов конденсаторов или электродов для деионизации. Углерод может присутствовать в пористых электродах 13 и 14 в концентрации не менее 60%, предпочтительно не менее 70%, более предпочтительно не менее 80% или даже свыше 85 мас.% в расчёте на сухой электрод. Для образования монолитов из порошкообразного материала широко используется термопластичный или вязкоэластичный материал, такой как латекс или отверждаемые смолы. Примерами углеродных слоев с использованием полифтортетраэтилена (PTFE) в качестве материала связующего являются серии продуктов PACMM™, доступных для приобретения у фирмы Material Methods LLC, расположенной по адресу: 30 Hughes, Suite 205, Irvine, CA 92618, США. Блок 3 CDI согласно изобретению может содержать пористые угольные электроды 13 и 14 с тканым слоем на основе волокна из активного углерода или с углеродной тканью, например, ZORFLEX®, который доступен для приобретения у фирмы Chemviron Carbon, расположенной по адресу: Zoning Industriel C de Feluy, B-7181 Feluy, Бельгия.

В качестве альтернативы блок 3 CDI согласно изобретению может включать в себя пористые угольные электроды 13 и 14, покрытые анионообменными и катионообменными мембранами 15 и 16 и имеющие в своём составе углеродное покрытие, содержащее полиэлектролит, связующее и углерод, которое может быть нанесено непосредственно на токосборник.

Токосборники 11 и 12 могут быть изготовлены из любого металла или подходящего электропроводного материала, не содержащего металл. Подходящие материалы, не содержащие металл, представляют собой, например, углерод, такой как графит, графен, графитовые листы или углеродные смеси с высоким содержанием графита. Предпочтительно использовать электрод, не содержащий металл, поскольку металлы являются дорогими и подвержены коррозии. Токосборник, как правило, выполнен в форме листа. Такой лист должен быть приспособлен для передачи по меньшей мере от 33 до 2000 А/м². Толщина графитового токосборника 11, 12 обычно составляет от 100 до 1000 мкм, обычно от 200 до 500 мкм.

Канал 17 может содержать прокладку из проницаемого материала инертного типа, такого как синтетический материал, пластик и/или стекловолокно с открытыми зонами.

Прокладка может быть изготовлена из материала, который, являясь электроизоляционным, обеспечивает ионную проводимость. Подходящими прокладками являются, например, продукты NITEX® или PETEX®, доступные для приобретения у фирмы Sefar Inc., размещённой по адресу: 111 Calumet Street, Depew, NY 14043, США, которые представляют собой сетчатые или фильтровальные изделия, выполненные из полиамида или полиэтилентерефталата. Анионообменные и катионообменные мембраны 15 и 16 могут обладать зарядным барьером, который является селективным по анионам или катионам, или определённым специфическим анионам или катионам, и который можно размещать между пористыми

электродами 13 и 14 и прокладкой в канале 17. Зарядный барьер может быть нанесен на слой электрода с большой площадью поверхности в виде покрытия или в форме ламинированного слоя.

Подходящие мембранные материалы могут быть гомогенными или гетерогенными. Подходящие мембранные материалы включают в себя анионообменные и/или катионообменные мембранные материалы, предпочтительно ионообменные материалы, содержащие сильно диссоциирующие анионные группы и/или сильно диссоциирующие катионные группы. Примерами таких мембранных материалов являются продукт NEOSEPTA™, доступный для приобретения у фирмы Tokuyama Corp., продукты PC-SA™ и PC-SK™, доступные для приобретения у фирмы PCA GmbH, ионообменные мембранные материалы, доступные для приобретения у фирмы FuMA-Tech GmbH, ионообменные мембранные материалы RALEX™, доступные для приобретения у фирмы Mega, или гетерогенный мембранный материал EXCELLION™, доступный для приобретения у фирмы Snowpure.

Пористые электроды 13 и 14 могут быть плавающими, которые не подсоединены непосредственно к источнику энергии, а получают свой заряд от других электродов в пакете блоков 3 CDI, которые соединены с источником электрической энергии. Плавающие электроды можно размещать параллельно и в промежутке между основными электродами в пакете блоков 3 CDI. Преимущество использования плавающих электродов заключается в том, что напряжения в блоке 3 CDI будут выше, тогда как токи, протекающие через блок 3 CDI, будут ниже. При использовании плавающих электродов можно значительно понизить удельное электрическое сопротивление в блоке 3 CDI.

Пример.

В данном примере сравниваются три различных способа опреснения морской воды, представленные в табл. 1. Во всех трёх способах для получения фильтрата, который обычно имеет содержание TDS, эквивалентное солоноватой воде, применяют стадию предварительной обработки с использованием стадии высокоэффективной нанофильтрации.

Таблица 1
Сравнение трёх мембранных способов опреснения морской воды

	Ступень 1	Ступень 2
Способ 1	высокоэффективная нанофильтрация	мембраны обратного осмоса солоноватой воды (BWRO)
Способ 2	высокоэффективная нанофильтрация	высокоэффективная нанофильтрация
Способ 3	высокоэффективная нанофильтрация	емкостная деионизация (CDI)

Способ 1 является широко применяемым способом получения питьевой воды из морской воды на основе нанофильтрации и обратного осмоса.

Способ 2 основан на известной системе для опреснения морской воды с использованием двухступенчатой нанофильтрации (NF), описанной в US 7144511. Недостатком двухступенчатой NF является его пониженная по сравнению со способом 1 общая скорость извлечения.

В способе 3 используется сочетание нанофильтрации с емкостной деионизацией (CDI) в соответствии с настоящим изобретением.

В табл. 2-4 представлены данные по показателям для трёх способов.

Можно видеть, что в известных способах 1 и 2 получают качество фильтрата, которое не соответствует требуемым техническим характеристикам по величине TDS (TDS=62 и 586 мг/л соответственно) для применения в целях осуществления улучшения или увеличения нефтеотдачи (IOR или EOR).

Для достижения желаемого качества воды требуется составление смеси с необработанной морской водой.

В отличие от этого в способе 3 согласно настоящему изобретению можно получать заданные технические характеристики воды без необходимости в составлении смеси, что приводит к значительно более низким эксплуатационным затратам.

Таблица 2

Данные по показателям способа 1 (известный способ опреснения морской воды с использованием NF-BWRO)

	Состав морской воды мг/л	Фильтрат после первой ступени NF мг/л	Фильтрат после второй ступени BWRO мг/л
Ca ²⁺	410	16	0,1
Mg ²⁺	1310	52	0,5
Na ⁺	10900	1635	24
K ⁺	390	62	1
Ba ²⁺	0,05	0	0
Sr ²⁺	13	0	0
Fe ³⁺	0,02	0	0
Mn ²⁺	0,01	0	0
SiO ₄	8	0	0
Cl ⁻	19700	2758	36
SO ₂ ⁻	2740	55	0,3
F ⁻	1,4	0	0
HCO ₃ ⁻	152	8	0,2
TDS	35624	4587	62

Таблица 3

Данные по показателям способа 2 (известный способ опреснения морской воды с использованием линии NF-NF)

	Состав морской воды мг/л	Фильтрат после первой ступени NF мг/л	Фильтрат после второй ступени NF мг/л
Ca ²⁺	410	16	0,9
Mg ²⁺	1310	52	3
Na ⁺	10900	1635	218
K ⁺	390	62	9
Ba ²⁺	0,05	0	0
Sr ²⁺	13	0	0
Fe ³⁺	0,02	0	0
Mn ²⁺	0,01	0	0
SiO ₄	8	0	0
Cl ⁻	19700	2758	353
SO ₂ ⁻	2740	55	1
F ⁻	1,4	0	0
HCO ₃ ⁻	152	8	0,6
TDS	35624	4587	586

Таблица 4

Данные по показателям способа 3 (опреснение морской воды с использованием линии NF-CDI в соответствии с настоящим изобретением)

	Состав морской воды мг/л	Фильтрат после первой ступени NF мг/л	Фильтрат после второй ступени CDI мг/л
Ca ²⁺	410	16	8,2
Mg ²⁺	1310	52	26,2
Na ⁺	10900	1635	817,5
K ⁺	390	62	31,2
Ba ²⁺	0,05	0	0,0005
Sr ²⁺	13	0	0,195
Fe ³⁺	0,02	0	0,0002
Mn ²⁺	0,01	0	0,0001
SiO ₄	8	0	0,04
Cl ⁻	19700	2758	1379
SO ₄ ⁻	2740	55	27,4
F ⁻	1,4	0	0,098
HCO ₃ ⁻	152	8	3,8
TDS	35624	4587	2294

Настоящее изобретение хорошо адаптировано для достижения упомянутых, а также присущих ему целей и преимуществ. Раскрыты выше конкретные варианты осуществления изобретения лишь иллюстрируют, как настоящее изобретение можно модифицировать и осуществлять на практике различными, но эквивалентными способами, очевидными для специалистов в данной области техники и обладающими положительным эффектом замыслов, изложенных в настоящем документе. Кроме того, не подразумеваются никакие ограничения в отношении элементов конструкции или схемного решения, представленных в настоящем документе, отличные от тех, что описаны в формуле изобретения. Несмотря на то что системы и способы описаны в терминах "содержащий", "имеющий в своём составе" или "включающий в себя", разнообразные компоненты или стадии, составы и способы также могут "состоять по существу из" или "состоять из" различных компонентов и стадий. Во всех случаях при описании численного диапазона с нижним и верхним пределом любое число и любой включённый диапазон, попадающие в пределы диапазона, раскрыты конкретно. В частности, следует понимать, что каждый диапазон значений (в форме "от а до b" или эквивалентно "a-b"), раскрытый в настоящем документе, описывает каждое число и диапазон, заключённый внутри более широкого диапазона значений. Во всех случаях раскрытия численного диапазона, имеющего только конкретный нижний предел, только конкретный верхний предел или конкретный верхний предел и конкретный нижний предел, диапазон также включает в себя любое численное значение "около" заданного нижнего предела и/или заданного верхнего предела. К тому же, термины в формуле изобретения имеют своё простое, обычное значение, если иное явно и чётко не определено отдельно.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ увеличения нефтеотдачи нефтеносного пласта, включающий в себя этапы, на которых отфильтровывают в блоке (1, 2) фильтрации, по меньшей мере, некоторые твёрдые частицы из исходной воды (4), имеющей общее содержание растворённых твёрдых частиц (TDS) от 10000 до 50000 ppm, получая предварительно обработанную воду (8);

обрабатывают предварительно обработанную воду (8) в блоке (3) емкостной деионизации, содержащем по меньшей мере один канал (17) для прохода потока предварительно обработанной воды (8), расположенный между парой противоположно заряженных электродов (11, 12), выполненных с возможностью адсорбции, по меньшей мере, некоторых ионов из протекающей через указанный канал предварительно обработанной воды (8), удаляя, тем самым, эти ионы из потока предварительно обработанной воды с получением обработанной воды (10), имеющей TDS от 1000 до 5000 ppm; и

впрыскивают обработанную воду (10) с пониженными минерализацией и содержанием твёрдых частиц в нефтеносный пласт для придания подвижности сырой нефти и увеличения нефтеотдачи.

2. Способ по п.1, в котором электроды (11, 12) содержат практически параллельные пористые пластины (13, 14), включающие в себя активированные угли и электрически заряженные посредством подсоединённого к этим пластинам источника постоянного тока.

3. Способ по п.2, в котором пористые пластины содержат углеродный аэрогель.

4. Способ по любому из пп.1-3, в котором блок фильтрации (1, 2) включает в себя блок (2) капиллярной нанофильтрации или блок микрофильтра.

5. Способ по любому из пп.1-4, в котором блок (2) капиллярной нанофильтрации или блок микрофильтра включает в себя узел нанофильтрации, в котором получают предварительно обработанную воду (8) с пониженной жёсткостью и концентрацией сульфатов относительно исходной воды и содержащую менее 1 ppm нефти и менее 1 ppm общего количества взвешенных твёрдых частиц (TSS).

6. Способ по любому из пп.1-5, в котором исходная вода (4) имеет TDS от 30000 до 40000 ppm.

7. Способ по п.6, в котором обработанная вода (8) имеет TDS от 2000 до 5000 ppm.

8. Способ по п.7, в котором обработанная вода (8) имеет более низкую минерализацию, чем внутриводородная вода, присутствующая в пласте до начала впрыскивания обработанной воды.

9. Способ по любому из пп.7 или 8, в котором обработанная вода (8) характеризуется более низкой ионной силой, чем внутриводородная вода, присутствующая в пласте до начала впрыскивания обработанной воды.

10. Способ по п.1, в котором исходная вода (4) выбрана из группы, состоящей из морской воды; солоноватой воды; воды, попутно добываемой из нефтеносного пласта; минерализованной воды водоносного горизонта или их смесей.

11. Система для осуществления способа по п.1, содержащая

блок фильтрации (1, 2) для отфильтровывания, по меньшей мере, некоторых твёрдых частиц из исходной воды (4), имеющей TDS от 10000 до 50000 ppm, для получения предварительно обработанной воды (8);

блок (3) емкостной деионизации, включающий в себя по меньшей мере один канал (17) для прохода потока предварительно обработанной воды (8), расположенный между парой практически параллельных противоположно заряженных электродов (11, 12), обеспечивающих адсорбирование и посредством этого удаление, по меньшей мере, некоторых ионов из предварительно обработанной воды (8), протекающей через данный канал (17), обеспечивающий возможность получения обработанной воды, имеющей TDS от 1000 до 5000 ppm; и

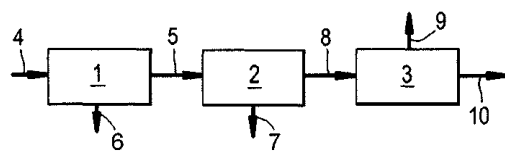
средства впрыскивания обработанной воды (10) с пониженными минерализацией и содержанием твёрдых частиц в нефтеносный пласт с целью сообщения подвижности сырой нефти и увеличения, тем самым, степени извлечения сырой нефти из пласта.

12. Система по п.11, в которой электроды (11, 12) содержат практически параллельные пористые пластины (13, 14), включающие в себя активированные угли и электрически заряженные посредством подсоединённого к этим пластинам источника постоянного тока.

13. Система по п.12, в которой пористые пластины (13, 14) содержат углеродный аэрогель.

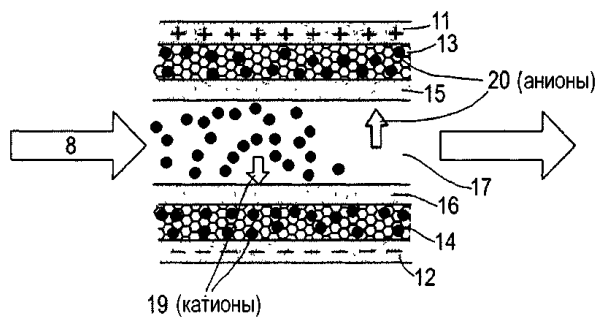
14. Система по любому из пп.11-13, в которой блок (1, 2) фильтрации включает в себя блок (2) капиллярной нанофильтрации или блок микрофильтра.

15. Система по любому из пп.11-14, в которой блок (2) капиллярной нанофильтрации или блок микрофильтра включает в себя узел нанофильтрации, который выполнен с возможностью получения предварительно обработанной воды с пониженной жёсткостью и концентрацией сульфатов, содержащей менее 1 ppm нефти и менее 1 ppm общего количества взвешенных твёрдых частиц (TSS).



Фиг. 1

Блок емкостной деионизации (CDI)



Фиг. 2

