(19) Евразийское патентное ведомство

(11) 037239 (13) B1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2021.02.25

(21) Номер заявки
201491106

(22) Дата подачи заявки
2012.12.19

(51) Int. Cl. ***E21B 28/00*** (2006.01)
E21B 43/00 (2006.01)
E21B 43/16 (2006.01)
E21B 43/25 (2006.01)

(54) СПОСОБ ДОБЫЧИ УГЛЕВОДОРОДНОЙ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ

(31) **PA 2011 70725; 11194897.2**
(32) **2011.12.19; 2011.12.21**
(33) **DK; EP**
(43) **2014.09.30**
(86) **PCT/EP2012/076148**
(87) **WO 2013/092712 2013.06.27**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
ИМПАКТ ТЕКНОЛОДЖИ СИСТЕМЗ АС (NO)

(72) Изобретатель:
Пеульсен Йим-Виктор (NO)

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

(56) WO-A1-2011157740
PRIDE S.R. ET AL.: "Seismic stimulation for enhanced oil recovery", GEOPHYSICS, SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS, US, vol. 73, no. 5, 1 September 2008 (2008-09-01), pages 023-035, XP001516140, ISSN: 0016-8033, DOI: 10.1190/1.2968090 the whole document
US-A1-2011108271
SINGH A.K.: "GENERATION OF PRESSURE PULSES BY IMPACTING AN OPPOSED-ANVIL SETUP WITH A LOW-VELOCITY PROJECTILE", REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, AIP, MELVILLE, NY, US, vol. 60, no. 2, 1 February 1989 (1989-02-01), pages 253-257, XP000111463, ISSN: 0034-6748, DOI: 10.1063/1.1140417 abstract

(57) Описан способ извлечения углеводородной текучей среды из пористой среды нагнетанием текучей среды в пористую среду. Способ включает стадии, в которых определяют временной параметр Рэлея на основе плотности текучей среды и углеводородной текучей среды, медианного диаметра пор пористой среды и поверхностного натяжения между текучей средой и углеводородной текучей средой. Далее производят стимуляцию давлением в текучей среде и генерированием с помощью процесса соударения при времени нарастания контактирования при соударении, которое составляет величину в диапазоне 1-100-кратного временного параметра Рэлея. Альтернативно или дополнительно проведение стимуляции давлением включает стадию, в которой генерируют ударное давление с амплитудой I давления и временем нарастания давления Δt, где амплитуда давления является большей, чем отношение $\gamma c \Delta t / a^2$, где γ представляет поверхностное натяжение между текучей средой и углеводородной текучей средой, и с представляет скорость звука в пористой среде. В аспектах изобретения способ включает стадию, в которой размещают камеру в сообщении по текучей среде с пористой средой по меньшей мере через один трубопровод, причем камера включает первую и вторую стеночные части, подвижные относительно друг друга. Стимуляция давлением включает стадию, в которой создают ударное давление в текучей среде для распространения в пористую среду через трубопровод, и где ударное давление генерируют процессом соударения между предметом, размещенным вне текучей среды, и первой стеночной частью, чтобы первая стеночная часть ударяла по текучей среде в камере.

037239 B1

037239 B1

Область техники, к которой относится изобретение

Настоящее изобретение относится к способу добычи углеводородной текучей среды из пористой среды.

Уровень техники

Операции добычи углеводородов в общем могут включать широкий круг процессов, предусматривающих применение и контроль операций регулирования течения флюидов для извлечения углеводорода из подземных пластов, в том числе, например, введение или нагнетание текучих сред в подземные пласты, таких как обрабатывающие текучие среды, уплотняющие текучие среды или текучие среды для гидроразрыва пласта, операции по заводнению, бурильные работы, операции по очистке трубопроводов и стволов скважин и операции по цементированию в стволах скважин.

Подземные пластовые резервуары представляют собой пористые среды, включающие сеть поровых объемов, соединенных с поровыми каналами, имеющими различные диаметры и длины. Проводились обстоятельные исследования динамических характеристик нагнетания текучих сред в пластовые резервуары для вытеснения текучих сред в пористой структуре породы в резервуаре, чтобы добиться улучшенного извлечения углеводородов.

Пористая структура породы представляет собой твердую матрицу пористой среды. Упругие волны могут распространяться в твердой матрице, но не в текучей среде, поскольку упругость представляет собой свойство твердых тел, а не текучих сред. Упругость твердых тел и вязкость текучих сред представляют собой свойства, которые определяют разницу между твердыми телами и текучими средами. Напряжения в упругих твердых телах пропорциональны деформации, тогда как напряжения в вязких текучих средах пропорциональны скорости изменения деформации.

Текучие среды в пластовом резервуаре будут (во время заводнения) испытывать капиллярное сопротивление, или давление, когда протекают через поровые каналы, вследствие поверхностного натяжения между текучими средами, и условий смачивания стенок поровых каналов. Капиллярное сопротивление обусловливает создание предпочтительных протоков текучих сред в пористой среде (прорывов текучей среды), что значительно ограничивает извлечение углеводородов. Таким образом, капиллярное сопротивление ограничивает подвижность текучих сред в пластовом резервуаре.

Как оказалось, извлечение углеводородов увеличивалось после сейсмических событий, таких как землетрясения. Вызванное этим интенсивное динамическое возбуждение пласта, как представляется, повышает подвижность флюидной фазы в пористой среде. Как утверждалось, повышенная подвижность во время землетрясений обусловливается упругими волнами (в твердой матрице), распространяющимися через пластовый резервуар. Были проведены исследования методами моделирования сейсмических явлений, основанными на возбуждении упругих волн в пластовом резервуаре с применением искусственных источников сейсмических волн. Как правило, искусственные источники сейсмических волн должны быть размещены как можно ближе к пластовому резервуару, чтобы их действие было эффективным, и тем самым обычно располагаются в забойной зоне буровой скважины или вблизи нее. Такие инструменты для скважинной сейсмической стимуляции были описаны, например, в патентных документах RU 2171345, SU 1710709 или WO 2008/054256, которые раскрывают различные системы, где упругие волны в твердых телах генерируются соударениями грузов, падающих на наковальни, закрепленные в забое буровой скважины, и тем самым на пластовом резервуаре. Недостатки этих систем состоят в опасности раздробления структуры породы, а также в сложностях контролирования удара и в ограниченной эффективности методов.

Также были разработаны и широко используются методы извлечения углеводородов, включающие динамические возбуждения, имитирующие сейсмические события, например, с использованием взрывчатых веществ и регулярных подрывов энергетических материалов в породе. Однако такие интенсивные возбуждения действием взрывчатых веществ, землетрясения и т.п. часто также считаются вызывающими нарушение структуры породы, которое может снижать извлечение углеводородов в течение длительного времени.

Другие способы добычи углеводородов включают напорно-импульсное воздействие чередованием периодов принудительного откачивания и/или нагнетания текучей среды в пласт. Применение импульсов давления описывали для повышения скоростей течения через пористую среду, но, однако, также сообщалось об увеличении опасности прорыва воды или образования языков из-за разности вязкостей в операциях нагнетания текучей среды.

Явление зависящего от времени давления, такое как резкое повышение давления, или гидравлический удар, главным образом описывалось и анализировалось в отношении его потенциально повреждающих или даже катастрофических воздействий, когда оно непреднамеренно возникает, например, в трубопроводных системах, или в отношении плотин или конструкций морских промыслов вследствие слеминга (гидродинамического удара морской воды) или перекатывания волн через платформы. Гидравлический удар часто может происходить, когда текучая среда в движении принудительно останавливается или внезапно изменяет направление течения, например, вследствие резкого перекрывания вентиля в трубопроводной системе. В трубопроводных системах гидравлический удар может приводить к проблемам от шума и вибрации до разрыва и смятия трубы. Во избежание гидравлического удара трубопровод-

ные системы наиболее часто оснащаются гидроаккумуляторами, байпасами и амортизаторами, или т.п.

Связанные с давлением явления еще одного типа (называемого здесь ударным давлением) проявляются в процессах соударения с использованием ударных динамических характеристик, которые создают возможность генерировать зависимое от времени ударное давление с большой амплитудой за очень короткий отрезок времени (продолжительность) по сравнению с временем контактирования при соударении.

В сравнении с продольной волной импульсы давления можно рассматривать как распространяющиеся через текучую среду подобно относительно резко выраженному фронту. Когда ударное давление сравнивают с импульсами давления, отмечают, что ударное давление имеет даже еще более резкий фронт и перемещается подобно фронту ударной волны. Поэтому ударное давление проявляет некоторые из тех же важных характеристик, как импульсы давления, но оно оказывает значительно более разрушительное действие ввиду того, что имеет резкий фронт с высокой амплитудой давления и короткое время нарастания вследствие способа его генерирования. Кроме того, импульсы давления и ударное давление, как описываемые в этом документе, следует отличать от упругих волн, поскольку эти упомянутые первыми явления, связанные с давлением, распространяются в текучих средах в отличие от упругих волн, которые распространяются в твердых материалах.

Сущность изобретения

Поэтому цель вариантов осуществления настоящего изобретения состоит в преодолении или, по меньшей мере, сокращении некоторых или всех из вышеописанных недостатков известных способов проведения операций по добыче углеводородов путем создания методик для повышения коэффициента нефтеотдачи при извлечении углеводородов.

Дополнительная цель вариантов осуществления изобретения заключается в создании способа проведения операций по добыче углеводородов, который может обеспечить повышенную подвижность текучих сред внутри пористой среды.

Дополнительная цель вариантов осуществления изобретения состоит в создании альтернативных способов и систем для генерирования ударного давления, например, применимых в пределах области операций по добыче углеводородов и применимых к текучим средам в подземных пластовых резервуарах или буровых скважинах.

Еще одной дополнительной целью вариантов осуществления изобретения является создание способа, который может быть относительно простым и недорогим для исполнения на существующих промыслах для добычи углеводородов и тем не менее эффективным.

Цель вариантов осуществления изобретения состоит в создании естественных систем для генерирования ударных давлений в текучей среде с повышенной эффективностью, и при снижении риска кавитационных явлений внутри системы.

В соответствии с изобретением это достигается с помощью способа добычи углеводородной текучей среды из пористой среды, в котором нагнетают текучую среду в пористую среду, включающего стадии, в которых определяют медианный диаметр пор в пористой среде и определяют время Рэлея на основе плотности текучей среды и углеводородной текучей среды, медианного диаметра пор пористой среды и поверхностного натяжения между текучей средой и углеводородной текучей средой. Способ дополнительно включает стадию, в которой производят стимуляцию давлением в текучей среде, причем стимуляцию давлением создают с помощью процесса соударения при времени нарастания контактирования при соударении, которое составляет величину в диапазоне 1-100-кратного временного параметра Рэлея, такую как в диапазоне 10-80-кратного временного параметра Рэлея или в диапазоне 1-10-кратного временного параметра Рэлея, такую как в диапазоне 1-3-кратного временного параметра Рэлея.

Согласно одному варианту исполнения стимуляцию давлением создают в процессе соударения со временем нарастания давления, которое находится в диапазоне 1-100-кратного временного параметра Рэлея, такое как в диапазоне 1-3-кратного временного параметра Рэлея. В одном варианте исполнения время нарастания давления может составлять по меньшей мере 1-10-кратный временной параметр Рэлея.

В еще одном аспекте изобретения это получают способом добычи углеводородной текучей среды из пористой среды, в котором нагнетают текучую среду в пористую среду, который включает стадии, в которых определяют медианный диаметр a пор в пористой среде и проводят стимуляцию давлением в текучей среде, причем стимуляцию давлением создают с помощью процесса соударения, генерирующего ударное давление с амплитудой I давления и временем Δt нарастания давления, где амплитуда давления является большей, чем отношение $\gamma c \Delta t / a^2$, где γ представляет поверхностное натяжение между текучей средой и углеводородной текучей средой, и с представляет скорость звука в пористой среде. Под скоростью звука в пористой среде следует понимать скорость звука в текучей среде, присутствующей в пористой среде, т.е. в нагнетаемой текучей среде и/или углеводородной текучей среде.

В результате процесса соударения энергия, а также количество движения от соударяющихся предметов в процессе соударения преобразуются в ударное давление в текучей среде. Ударное давление перемещается и распространяется со скоростью звука через текучую среду и пористую среду.

Генерирование ударного давления, создаваемого процессом соударения, может быть преимущест-

венным вследствие получаемых при этом очень крутых или резких фронтов давления с высокой амплитудой, предельного короткого времени нарастания по сравнению, например, с импульсами давления, получаемыми с помощью традиционной технологии напорно-импульсного воздействия. Кроме того, ударное давление, созданное процессом соударения, можно рассматривать как включающее повышенный высокочастотный компонент, сравнительно, например, с единичной частотой или одиночной синусоидальной волной давления.

Это может быть преимущественным в различных операциях добычи углеводородов, например, таких как при заводнении, нагнетании обрабатывающей текучей среды или в процессах уплотнения, так как высокочастотный компонент можно рассматривать как повышающий подвижность текучей среды внутри пористой среды, где материалы с различными свойствами материалов и капельки с различными размерами могут тем или иным путем ограничивать или снижать подвижность текучих сред. Кроме того, это может быть преимущественным в предотвращении или сокращении опасности любой тенденции к закупориванию и в поддержании пластового резервуара в превосходных условиях течения. Подобным образом, повышенная подвижность может быть преимущественной как в отношении операций нагнетания уплотняющих текучих сред, так и при последующей промывке скважины в операциях уплотнения.

В сравнении с другими общеупотребительными методами напорно-импульсного воздействия способ согласно настоящему изобретению является преимущественным в том отношении, что ударное давление здесь может быть генерировано в непрерывном потоке текучей среды без существенного влияния на скорость течения. Кроме того, ударное давление, генерированное процессом соударения, может быть создано очень простым, но тем не менее эффективным путем и без какого-нибудь перекрывания или открывания вентилей и контрольного оборудования, как это делается согласно прототипу.

В отношении операций заводнения были проведены эксперименты в лабораторном масштабе, которые показали повышение коэффициента нефтеотдачи при извлечении углеводородов на 5-15% при применении ударного давления, создаваемого процессом соударения, по сравнению с течением под действием постоянного статического давления. Повышенный коэффициент нефтеотдачи был получен при неизменной скорости течения.

В общем, признак импульсов давления, который делает их пригодными для вариантов применения в операциях по извлечению углеводородов, состоит в том, что они распространяются подобно крутому фронту через текучую среду, как было упомянуто выше. Ударное давление имеет даже более крутой фронт или даже более короткое время нарастания давления, поэтому ударное давление проявляет такие же важные характеристики, как импульсы давления, но в значительно более высокой степени.

В отношении добычи углеводородов из пористых сред представляется, что высокое давление в сочетании с очень коротким временем нарастания, которое может быть получено способами согласно изобретению (и в сравнении с тем, что получается с использованием других методов стимуляции давлением), создает достаточную разность давлений на протяжении длины порового канала, которая может преодолевать капиллярное сопротивление. Разность давлений поддерживается в течение достаточно длительного времени, по меньшей мере в 1-10 раз более длительного, чем временной параметр Рэлея, такого как в диапазоне 1-100-кратного временного параметра Рэлея. Вместе с тем относительно короткая продолжительность обеспечивает то, что усредненное по времени ударное давление не вносит существенного вклада в уравнение Дарси для пористой среды, тем самым сокращая риск раннего прорыва и образования языков в результате разности вязкостей. Достаточно большая амплитуда давления, которая может преодолевать капиллярное сопротивление, может быть получена амплитудой ударного давления, которая превышает отношение $\gamma c \Delta t/a^2$, где γ представляет поверхностное натяжение между текучей средой и углеводородной текучей средой, с представляет скорость звука в пористой среде, и Δt представляет время нарастания ударного давления. Следует отметить, что малое время Δt нарастания подразумевает, что сокращается амплитуда, необходимая для преодоления капиллярного сопротивления. Однако время нарастания должно составлять по меньшей мере 1-10-кратный временной параметр Рэлея.

В этом контексте применение ударных динамических характеристик (процесса соударения), как предлагается изобретением, обеспечивает простой и эффективный способ поддержания достаточной разности давлений в течение периода времени, составляющего по меньшей мере 1-10-кратный временной параметр Рэлея. Кроме того, применение процесса соударения оказалось благоприятным в создании относительно короткого времени нарастания того же порядка или 10-100-кратного временного параметра Рэлея. Время нарастания контактирования в ходе процесса соударения может быть, как показано позже, оценено, например, с привлечением теории соударения Герца. Короткое время нарастания контактирования порядка 1-100-кратного временного параметра Рэлея оказалось благоприятным для получения повышенного коэффициента нефтеотдачи при добыче углеводородов из пористой среды. Как правило, время нарастания ударного давления (время, за которое давление повышается от нулевой до максимальной амплитуды) сравнимо со временем нарастания контактирования в процессе соударения и составляет величину порядка 1 мс (0,001 с) или менее. Короткое время нарастания делает ударное давление уникальным, когда его используют при извлечении углеводородных текучих сред.

Согласно одному варианту осуществления изобретения время нарастания контактирования при со-

ударении просто определяется как процентная доля времени контактирования при соударении в процессе соударения, такая как в диапазоне 10-40%. Тем самым может быть простыми средствами получена рациональная оценка для времени нарастания контактирования относительно всего времени контактирования в процессе соударения.

Время контактирования и время нарастания контактирования могут быть оценены с привлечением теории соударения Герца, как подробнее разъясняется позже. Дополнительно или альтернативно время контактирования и/или время нарастания контактирования могут быть измерены экспериментальными методами измерений, например, такими как с помощью визуализации по истекшему времени или рапидной съемки.

В одном варианте исполнения время нарастания контактирования при соударении определяют на основе массы, плотности, модуля упругости и коэффициента Пуассона соударяющихся предметов в процессе соударения, их относительных скоростей и модуля объемной упругости текучей среды, например, из теории соударения Герца.

Медианный диаметр пор пористой среды может быть определен на основе распределения пор для среды. Распределение пор может быть определено по образцам пористой среды, например, визуальным обследованием с помощью микроскопа, анализом изображений, методами проточной порометрии, адсорбции газа или ртутной порометрии.

Вкратце, ртутная порометрия основывается на законе капиллярной депрессии (уравнение Уошборна), регламентирующего проникновение текучей среды в мелкие поры. Более конкретно, уравнение Уошборна соотносит приложенное давление с диаметром поры. Когда во время анализа повышают давление, рассчитывают диаметр пор и измеряют соответствующий объем ртути, необходимый для заполнения этих пор. Эти измерения выполняют в пределах диапазона давлений, получая распределение диаметра пор, и тем самым может быть получен медианный диаметр пор. Поскольку имеются в 5-10 раз больше поровых каналов, чем поровых объемов, то медианный диаметр пор определяет капиллярное сопротивление в пористой среде.

Созданием стимуляции давлением в текучей среде и с помощью процесса соударения, генерирующего ударное давление с амплитудой давления I, удовлетворяющей критерию $I>\gamma c\Delta t/a^2$ (где Δt представляет время нарастания ударного давления, γ представляет поверхностное натяжение между текучей средой и углеводородной текучей средой и с представляет скорость звука в пористой среде), получается достаточно большая амплитуда давления для ударного давления в течение достаточного периода (времени нарастания давления). Это представляется благоприятным для достижения разности давлений, преодолевающей капиллярное сопротивление в пористой среде. Как представляется, это ведет к образованию капиллярных языков в пористой среде, и тем самым значительно повышает коэффициенты нефтеотдачи, что также подтверждается экспериментами.

В одном варианте исполнения стимуляция давлением включает генерирование ударного давления с амплитудой давления в диапазоне величин, в 1-5 раз превышающих отношение $\gamma c\Delta t/a^2$, такой как в 1,5-3 раза больших.

В одном варианте осуществления изобретения способ дополнительно включает стадию, в которой определяют капиллярное давление на основе диаметров поровых каналов, которые создают основное капиллярное сопротивление в пористой среде, и поверхностное натяжение между текучей средой и углеводородной текучей средой, и в котором стимулирование давлением включает генерирование ударного давления с амплитудой давления и временем нарастания, которые создают разность давлений порядка величин, превышающих капиллярное давление в 1-5 раз по длине, равной диаметру порового канала пористой среды.

Диаметры поровых каналов, главным образом обусловливающих капиллярное сопротивление в пористой среде, могут быть оценены как медианный диаметр пор. Использование медианного диаметра пор было бы хорошей оценкой диаметра поровых каналов, который вносит основной вклад в капиллярное сопротивление пористой среды. В этом варианте исполнения это тогда соответствует определению капиллярного давления на основе медианного диаметра пор пористой среды и генерированию ударного давления с амплитудой давления и временем нарастания, соответствующими разности давлений порядка 1-5-кратного капиллярного давления по длине, равной медианному диаметру пор пористой среды.

Таким образом, получается благоприятная стимуляция давлением для улучшения извлечения нефти, где получают ударное давление, которое создает достаточную разность давлений по длине порового канала в пористой среде, которая может преодолевать капиллярное сопротивление. Кроме того, из данного времени нарастания контактирования, близкого к величине или в диапазоне величин 1-100-кратного временного параметра Рэлея, получается, что разность давлений может поддерживаться в течение достаточно длительного времени. Более того, короткая продолжительность ударного давления обеспечивает то, что усредненное по времени ударное давление не вносит существенного вклада в отношение Дарси для пористой среды, тем самым сокращая риск раннего прорыва и образования языков в результате разности вязкостей. Амплитуда ударного давления, необходимая для преодоления капиллярного сопротивления, пропорциональна времени нарастания давления, тем самым время нарастания должно быть на-

столько коротким, насколько возможно, но составлять по меньшей мере 1-10-кратный временной параметр Рэлея.

Применение процесса соударения является простым, но тем не менее эффективным способом выполнения стимуляции давлением с желательными указанной короткой продолжительностью и указанной достаточной разностью давлений.

В одном варианте осуществления изобретения процесс соударения включает соударение между падающим предметом и плунжером, где предмет имеет массу в диапазоне 10-10000 кг, такую как в диапазоне 100-1500 кг, такую как в диапазоне 500-1200 кг, и предмету дают падать на плунжер с высоты в диапазоне 0,02-2,0 м, такой как в диапазоне 0,05-1,0 м, такой как в диапазоне 0,1-0,5 м.

Один вариант осуществления изобретения относится к способу извлечения углеводородных текучих сред из пористой среды, в котором нагнетают текучую среду в пористую среду, включающему стадии, в которых оценивают плотность текучих сред в пористой среде, оценивают диаметр поровых каналов, который вносит основной вклад в капиллярное сопротивление пористой среды, и оценивают поверхностное натяжение между текучими средами в пористой среде, где текучие среды в пористой среде включают как углеводородные текучие среды, так и прочие текучие среды. Кроме того, временной параметр Рэлея определяют на основе оценки плотности, диаметра и поверхностного натяжения и проводят стимуляцию давлением, причем стимуляцию давлением выполняют с помощью процесса соударения со временем контактирования при соударении, которое дает время нарастания, которое составляет величину в диапазоне 1-10-кратного временного параметра Рэлея, такое как в диапазоне 1-3-кратного временного параметра Рэлея.

В одном варианте исполнения способ дополнительно включает стадии, в которых оценивают диаметр поровых каналов, который вносит основной вклад в капиллярное сопротивление пористой среды, и оценивают поверхностное натяжение между текучими средами в пористой среде, где текучие среды в пористой среде включают как углеводородные текучие среды, так и другие текучие среды, и определяют капиллярное давление на основе оценки диаметра и поверхностного натяжения. Далее проводят стимуляцию давлением в текучей среде, причем стимуляцию давлением выполняют с помощью процесса соударения, который дает амплитуду и время нарастания, которые создают разность давлений по длине указанного порового канала, и где амплитуда и время нарастания являются такими, что указанная разность давлений составляет величину порядка 1-5-кратного капиллярного давления.

Согласно одному варианту осуществления изобретения способ дополнительно включает стадии, в которых размещают, по меньшей мере частично, заполненную текучей средой камеру в сообщении по текучей среде с пористой средой по меньшей мере через один трубопровод, причем камера включает первую и вторую стеночные части, подвижные относительно друг друга, размещают предмет вне текучей среды и создают ударное давление в текучей среде для распространения в пористую среду через трубопровод, причем ударное давление генерируют процессом соударения, включающим соударение между указанным предметом и первой стеночной частью, в результате чего первая стеночная часть наносит удар по текучей среде внутри камеры. По сравнению с другими традиционными способами напорно-импульсного воздействия способ согласно настоящему изобретению является преимущественным в том, что ударное давление здесь может быть генерировано в непрерывном потоке текучей среды без значительного влияния на скорость течения. Кроме того, ударное давление, генерированное процессом соударения, может быть создано очень простым, но тем не менее эффективным путем и без какого-то перекрывания или открывания вентилей и контрольного оборудования, как это делается согласно прототипу.

Кроме того, предлагаемым способом может быть получено то, что ударное давление может быть инициировано в текучей среде без повышения или только с малым увеличением скорости течения текучей среды, так как первая стеночная часть не перемещается и не нажимает на текучую среду, как в традиционном напорно-импульсном воздействии. Скорее ударное воздействие от движущегося предмета на первую стеночную часть во время соударения можно рассматривать как вызывающее лишь минимальное или ничтожное смещение стеночной части, главным образом соответствующее сжатию текучей среды в зоне удара. Поэтому желательную скорость течения текучей среды, например, в операции извлечения углеводорода можно регулировать более точно с помощью, например, нагнетательных устройств, применяемых в операции, и можно в качестве одного примера поддерживать равномерной или почти равномерной на желательном уровне течения, независимо от создания ударного давления. Способ согласно вышеизложенному тем самым может быть преимущественным, например, в операциях нагнетания текучих сред и заводнения, где может быть желательной умеренная скорость течения текучей среды с минимальными флуктуациями указанной скорости течения, чтобы снизить опасность раннего прорыва текучей среды и образования языков из-за разности вязкостей в пласте.

Кроме того, один вариант осуществления изобретения предусматривает, что камера включает зону, в которой естественным путем собираются газовые включения под действием гравитационных сил, и трубопровод размещают в указанной зоне или рядом с ней, и/или камеру размещают таким образом, чтобы первая стеночная часть, ударяющая по текучей среде, была расположена вне указанной зоны.

В системе текучей среды, включающей транспортирование текучей среды, текучая среда в некоторый момент почти неизбежно содержит включения газа, например, в форме воздуха, захваченного в сис-

тему с самого начала. Кроме того, в текучей среде могут создаваться газовые пузырьки вследствие турбулентного течения или вследствие процесса соударения первой стеночной части, ударяющей по текучей среде. Любые такие газовые включения, конечно, под действием силы тяжести поднимаются и собираются в одной или более зонах камеры, где газовые включения уже не могут больше подниматься. Наиболее часто это происходит в самой верхней части камеры. Поскольку способ предусматривает размещение камеры таким образом, чтобы избежать накопления газовых включений, где первая стеночная часть ударяет по текучей среде, получается, что удар выполняется по текучей среде и не по газовым включениям или только минимально по ним. Таким образом, сокращается смещение первой стеночной части, поскольку сжимаемость текучей среды является значительно более низкой, чем у газовых включений.

Поэтому сокращение или предотвращение накопления газовых включений вблизи области ударного воздействия ведет к ударному давлению с более высокой амплитудой, более коротким временем нарастания и более коротким временем контактирования благодаря лучшей передаче энергии ударяющего предмета по текучей среде.

Кроме того, в результате сокращения или предотвращения накопления газовых включений вблизи области ударного воздействия сокращается опасность кавитационных явлений в текучей среде, что часто ведет к износу и повреждению системы текучей среды. Это достигается тем, что энергия удара главным образом преобразуется в ударное давление в текучей среде, но не передается газовым включениям.

Поскольку предмет для столкновения с первой стеночной частью размещают вне текучей среды, может быть достигнуто то, что большая часть количества движения, если не весь импульс силы, предмета преобразуется в ударное давление в текучей среде. В противном случае, если бы процесс соударения был проведен в текучей среде на глубине, некоторая часть количества движения предмета терялась бы вследствие смещения текучей среды перед соударением.

Движущийся предмет может сталкиваться, или соударяться, с первой стеночной частью непосредственно или опосредованно, через другие соударения. Камера и стеночные части могут иметь разнообразные формы. Камера может включать цилиндр с плунжером, с предметом, который соударяется с плунжером или с цилиндром. Камера может включать две цилиндрических части, вставленные одна в другую. Первая стеночная часть, например, в форме плунжера может включать головку, расположенную поверх или полностью погруженную в текучую среду внутри камеры. Кроме того, первая стеночная часть может быть размещена в направляющей относительно окружающей части камеры или может поддерживаться незакрепленной на своем месте. Камера может быть соединена с одним или более трубопроводами, размещенными в сообщении по текучей среде между текучей средой в камере и в пластовом резервуаре, где текучая среда может использоваться, например, в операциях по извлечению углеводородов, таком как подземный пласт или ствол скважины. Дополнительно камера может быть размещена так, чтобы текучая среда транспортировалась через камеру.

Процесс соударения может быть простым путем инициирован тем, что выполняют падение одного или более предметов на первую стеночную часть с данной высоты. Тогда величина созданного ударного давления может определяться массой падающего предмета, высотой падения и площадью поперечного сечения тела в контакте с текучей средой. Таким образом, амплитуда созданного ударного давления и время, за которое они создаются, можно без труда контролировать. Подобным образом, амплитуда давления может быть легко скорректирована, изменена или задана регулированием, например, массы предмета в процессе соударения, высоты падения, относительной скорости соударяющихся предметов или площади поперечного сечения (например, диаметра) первой стеночной части в контакте с текучей средой. Эти возможности настройки могут оказаться особенно благоприятными при нагнетании текучей среды и в заводнении текучей средой, поскольку разность между нормальным пластовым давлением и давлением гидравлического разрыва пласта часто может быть незначительной.

Поскольку процесс соударения может быть выполнен без необходимости в любом источнике прямого пневматического силового привода, предлагаемый способ может быть выполнен с помощью менее габаритного и более компактного оборудования. Кроме того, мощностные требования предлагаемого способа являются низкими по сравнению, например, с традиционной технологией импульсов давления, поскольку большая часть энергии может быть преобразована в ударное давление в текучей среде в результате процесса соударения или удара.

Предлагаемый способ приложения ударного давления может преимущественно эксплуатироваться на месте, где он требуется, или вблизи него, без каких-нибудь специальных требований в отношении охлаждения, чистоты окружающей среды, стабильности или тому подобных специальных условий, что может сделать предлагаемый способ преимущественным для применения на промысле с суровым условиями. Например, в операциях по добыче углеводородов способ может преимущественно действовать с платформы или с места, близкого к поверхности. В отличие от инструментов сейсмической стимуляции, действующих на твердой структуре, и где необходимо выполнять соударение между падающим грузом и наковальней на твердой породе, которую нужно стимулировать, т.е. непосредственно в забое ствола скважины, система для исполнения способа согласно вариантам осуществления изобретения не ограничивается каким-то специфическим местоположением и не нуждается в необходимости размещения на глубине в забое ствола скважины или размещения ниже морского дна. Размещением системы и примене-

нием предлагаемого способа вблизи грунта или, например, на грунте или на платформе или т.п.можно с выгодой использовать менее дорогостоящее оборудование и обеспечивать более простое и менее дорогостоящее техническое обслуживание, в особенности, когда речь идет о работах на морских промыслах.

Кроме того, поскольку ударные давления, как представляется, способны передаваться на длинные расстояния и с минимальными потерями, предлагаемый способ подобным образом может при желании исполняться на отдалении от пластового резервуара, где должно прилагаться ударное давление.

Кроме того, поскольку способ согласно изобретению не проводят внутри ствола скважины или в его глубине или вблизи подземного пласта, ударное давление, возможно, может быть создано в многочисленных буровых скважинах или местах нагнетания текучей среды одновременно.

Кроме того, предлагаемый способ генерирования ударного давления может быть преимущественно выполнен на уже существующих системах текучих сред только с минимальными нужными настройками или без таковых, простым подключением оборудования для генерирования ударного давления.

В одном варианте исполнения способа, где газовые включения выводятся из камеры путем размещения трубопровода в зоне или около зоны, где газовые включения собираются естественным образом, достигается то, что газовые включения будут эффективно и быстро полностью или частично удаляться из камеры текучей средой, непрерывно или периодически в отношении процесса соударения. Любые газовые включения могут продолжать собираться в зоне, но их накопление предотвращается с помощью описываемого размещения трубопровода простым, но тем не менее эффективным путем.

В варианте исполнения способа, где камеру размещают таким образом, что первая стеночная часть, ударяющая по текучей среде, расположена вне этой зоны, достигается то, что удар выполняется главным образом по текучей среде и не по присутствующим в камере газовым включениям или в незначительной степени по ним. Таким образом, получатся способ, нечувствительный к присутствию газовых включений или созданию газовых включений в текучей среде, и система текучей среды не нуждается в тщательном вентилировании перед инициированием любого процесса создания ударного давления.

Согласно одному варианту исполнения процесс соударения предусматривает падение предмета на первую стеночную часть под действием силы тяжести. Как было упомянуто ранее, это тем самым может быть достигнуто в процессе соударения, обеспечивающего создание ударных давлений значительной величины простыми средствами. Созданные амплитуды давления могут быть определены и отрегулированы как функция веса падающего предмета, скорости предмета при соударении, его массы, массы первой стеночной части и ее площади поперечного сечения в контакте с текучей средой. Преимущественно могут быть получены амплитуды давления в диапазоне 50-600 бар (5-60 МПа), такие как в диапазоне 100-300 бар (10-30 МПа), такие как в диапазоне 150-200 бар (15-20 МПа). Вышеупомянутые параметры влияют на время нарастания ударного давления, которое преимущественно может быть в диапазоне 0,1-100 мс в точке измерения, такое как в диапазоне 0,5-10 мс, такое как около нескольких миллисекунд, например приблизительно 0,01-5,0 мс.

Согласно одному варианту исполнения предмет сталкивается с первой стеночной частью в воздушном окружении.

В одном дополнительном варианте осуществления изобретения способ согласно любому из вышеуказанных случаев дополнительно включает стадию, в которой генерируют несколько процессов соударения с временными интервалами. Это может действовать для усиления эффекта ударного давления, создаваемого в текучей среде. Ударное давление может создаваться с регулярными интервалами или с нерегулярными интервалами. В качестве одного примера ударное давление может быть индуцировано более часто и с более короткими интервалами времени на более ранней стадии операции по добыче углеводородов и с более длительными интервалами позднее. Интервалы времени между циклами ударного давления могут, например, регулироваться и корректироваться в зависимости от результатов измерений (таких как измерения давления), выполняемых в то же время на подземном пласте.

Согласно вариантам осуществления изобретения процессы соударения генерируются с интервалами времени в диапазоне 2-20 с, такими как в диапазоне 4-10 с, такими как приблизительно 5 с. Оптимальные интервалы времени могут зависеть от таких факторов, как тип пласта, пористость пласта, опасность разрыва пласта и т.д. Предпочтительные интервалы времени могут зависеть от таких факторов, как амплитуды прилагаемого давления и время нарастания.

В одном варианте исполнения способ включает стадию, в которой генерируют первую последовательность процессов соударения с первой настройкой амплитуды давления, времени нарастания и времени между соударениями, с последующей второй последовательностью процессов соударения с иной настройкой амплитуды давления, времени нарастания и интервалом времени между соударениями. Например, этим путем могут выдаваться серии ударных давлений. Это может быть полезным для усиления действия ударных давлений. Как было упомянуто ранее, амплитуда и интервал времени индуцированных ударных давлений могут быть относительно просто модифицированы и отрегулированы, например, корректированием веса движущегося предмета или настройкой высоты падения.

В одном варианте осуществления изобретения настройку амплитуды давления и время нарастания варьируют путем изменения массы движущегося предмета и/или изменением скорости движущегося предмета относительно первой стеночной части перед соударением. Параметры ударных давлений, такие

как амплитуды давления или время нарастания, тем самым могут быть изменены сообразно необходимости простыми, но все же эффективными средствами и контролируемым путем.

Краткое описание чертежей

Далее различные варианты осуществления изобретения будут описаны со ссылкой на чертежи, на которых

фиг. 1A-D иллюстрируют принципы физики удара, применимые для понимания ударного давления,

фиг. 2-3 - варианты исполнения устройств для генерирования ударных давлений в текучей среде, находящейся в сообщении по текучей среде с подземным пластовым резервуаром,

фиг. 4A - типичный профиль ударного давления, полученный в ходе экспериментов на кернах песчаника Berea,

фиг. 4B - одиночный импульс ударного давления в более подробном изображении, полученного и измеренного в экспериментах по заводнению на кернах песчаника Berea,

фиг. 5-6 - общий обзорный вид конфигурации, использованной в экспериментальном испытании на кернах песчаника Berea с использованием ударного давления,

фиг. 7 - обобщение некоторых результатов, полученных в экспериментах по заводнению с ударным давлением и без него,

фиг. 8-14 - различные варианты исполнения устройства для генерирования ударного давления согласно изобретению,

фиг. 15-16 - экспериментальную конструкцию для генерирования ударного давления согласно вариантам осуществления изобретения,

фиг. 17 и 18 - экспериментальные результаты извлечения масляной текучей среды из двумерной (2D) пористой среды с генерированием ударного давления и без него согласно изобретению соответственно,

фиг. 19, 20 - результат из фиг. 18 с большими увеличениями,

фиг. 21 - две характеристических конфигурации пор в экспериментальной пористой 2D-среде, как видимые сверху и сбоку,

фиг. 22, 23 - схемы распределения давления как функцию длины D- и C-режимов соответственно,

фиг. 24 - схему проникающей в пласт текучей среды, проходящей из поры через поровый канал,

фиг. 25, 26 - результаты численных моделирований z-положения как функции двух различных отношений вязкостных сил к капиллярным силам и для оливкового масла, и

фиг. 27, 28 - результаты численных моделирований, подобных показанным в фиг. 25, 26, но для параметров нефти из нефтяного месторождения Gullfaks.

Подробное описание чертежей и вариантов осуществления изобретения

Ударные давления подобны распространяющимся гидравлическим ударам в текучей среде и генерируются процессом соударения, либо твердым предметом, в движении, соударяющимся с текучей средой, либо протекающей текучей средой, сталкивающейся с твердым телом. Последняя ситуация описывается в рамках явления гидравлического удара, где количество движения протекающей текучей среды преобразуется в ударные давления в текучей среде.

Физический принцип процесса соударения между твердым телом и текучей средой более подробно описан далее, сначала с рассмотрением столкновений между твердыми предметами, которые анализируются на модели соударения идеализированных бильярдных шаров.

Модель соударения бильярдных шаров обрисована в фиг. 1A, иллюстрирующей различные этапы во время процесса соударения между двумя бильярдными шарами 1 и 2. Показанные на этой фигуре этапы представляют собой сверху вниз; 1) этап, на котором шар 1 движется со скоростью U в сторону неподвижного шара 2, 2) момент первого контакта, 3) момент максимального сжатия (преувеличено), 4) момент последнего контакта и 5) этап, на котором шар 2 движется со скоростью U, и шар 1 неподвижен. Этапы 2-4 составляют часть стадии удара (или просто соударение). Соударение начинается во время первого контакта (этап 2) и завершается в момент последнего контакта (этап 4), время контактирования представляет собой продолжительность от первого до последнего контакта.

Модель соударения бильярдных шаров моделирует процесс соударения как процесс идеально упругого взаимодействия без потери кинетической энергии во время цикла сжатия (нагрузки) и восстановления исходного состояния (снятия нагрузки). Модель соударения бильярдных шаров предполагает отсутствие проникновения и обмена частями материала между шарами во время процесса соударения. Относительная скорость U шара 1 представляет скорость соударения, и после момента первого контакта (этап 2) взаимопроникновение двух шаров не было бы обусловлено контактным усилием, возникающим в области контакта между двумя шарами. Продолжительность цикла сжатия (от этапа 2 до этапа 3) представляет собой время нарастания контактирования, и продолжительность восстановления исходного состояния (от этапа 3 до этапа 4) представляет собой время ослабления контактирования. Таким образом, время контактирования (от этапа 2 до этапа 4) представляет собой сумму времени нарастания контактирования и времени ослабления контактирования.

Контактные усилия возрастают по мере увеличения площади контакта и сжатия. В некоторый момент во время соударения работа, выполняемая контактными усилиями, достаточна для доведения ско-

рости сведения двух шаров до нуля. Это представляет собой момент максимального сжатия (этап 3). Смещение (величину сжатия) шара 1 во время цикла сжатия можно оценить с использованием принципа сохранения энергии $MU^2=2F\Delta s$, и принципа сохранения количества движения $F\Delta t=MU$, где Δs представляет смещение, которое необходимо для того, чтобы работа $F\Delta s$ была равна кинетической энергии. Время контакта представляет собой Δt, и тем самым смещение задается как $\Delta s=U\Delta t/2$.

Оценка времени контактирования может быть получена применением теоретических принципов из теории соударений Герца, рассматривающей соударение идеально твердой сферы и идеально твердой планарной поверхности. Закон Герца может быть выражен как

$$\Delta t = 2.86 \left(\frac{M^2}{RE^{*2}U}\right)^{1/5},$$

где E* записывается как

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\sigma_1^2}{E_1} + \frac{1-\sigma_2^2}{E_2},$$

E представляет модуль упругости, и σ представляет коэффициент Пуассона для сферы (1) и планарной поверхности (2). Ландау и Лифшиц модифицировали закон Герца для получения уравнения

$$\Delta t = 3.29 \left(\frac{(1-\sigma^2)^2 M^2}{RE^2 U}\right)^{1/5}$$

для двух идентичных шаров с массой M и радиусом R, где теперь E представляет модуль упругости, и σ представляет коэффициент Пуассона для двух шаров (см. работу Landau и Lifschitz, Theory of elasticity ("Теория упругости"), Theoretical Physics, т. 7, 3-е изд., 1999, изд-во Butterworth-Heinemann, Оксфорд).

Бильярдные шары, изготовленные из фенолформальдегидной смолы, имеют модуль упругости около 5,84 ГПа и коэффициент Пуассона около 0,34. Два идентичных бильярдных шара с R=2,86 см и M=170 г, сталкивающиеся со скоростью U=1 м/с, имеют время контактирования порядка 0,13 мс, и тем самым Δs составляло бы величину порядка 0,065 мм. Контактное усилие может быть оценено применением уравнения $F=MU/\Delta t$ и вышеуказанных значений, с получением тем самым контактного усилия порядка 1,3 кН, равного весу предмета с массой около 130 кг. Это представляет собой огромную величину сравнительно с массой двух бильярдных шаров (170 г). Эти наблюдения формируют фундаментальную гипотезу теории соударения твердых тел. Несмотря на большое контактное усилие (1,3 кН), имеет место очень маленькое смещение (0,065 мм), происходящее во время очень короткого периода контактирования (0,13 мс).

Фиг. 1B изображает процесс соударения, предусматривающий цепочку из пяти бильярдных шаров, и фигура показывает следующие этапы сверху вниз: 1) этап, на котором шар 1 движется со скоростью U в сторону шаров 2-5, все из которых неподвижны, 2) этап соударения и 3) этап, на котором шар 5 движется со скоростью U и шары 1-4 неподвижны. Цикл сжатия между шарами 1 и 2 начинается в момент первого контакта между шарами 1 и 2, и указанный цикл сжатия заканчивается в момент максимального сжатия между шарами 1 и 2. Цикл восстановления исходного состояния начинается в указанный момент максимального сжатия, но еще один цикл сжатия между шарами 2 и 3 начинается в то же время, как указанный цикл восстановления исходного состояния. Таким образом, цикл восстановления исходного состояния между шарами 1 и 2 развивается параллельно с циклом сжатия между шарами 2 и 3.

Эти симметричные восстановление исходного состояния и сжатие распространяются вдоль цепи бильярдных шаров 1-5, вплоть до цикла восстановления исходного состояния между шарами 4 и 5. Последний цикл восстановления исходного состояния заканчивается на шаре 5, движущемся со скоростью U, и тем самым распространение симметричных восстановления исходного состояния и сжатия по цепи шаров передает количество движения MU от шара 1 к шару 5. Симметричные восстановление исходного состояния и сжатие обрываются на шаре 5, и тем самым указанное распространение генерирует движение шара 5. Следует отметить, что общее время контактирования для системы, иллюстрированной в фиг. 1B, составляет не 4 Δt, где Δt представляет время контактирования для системы, описанной в отношении фиг. 1A, но, скорее, равно 3,5 Δt, как раскрыто, например, в работе Eur. J. Phys., т. 9, стр. 323 (1988). Это демонстрирует, что циклы сжатия и восстановления исходного состояния перекрываются во времени, как было разъяснено выше, и что время контактирования для цепи из 3, 4 и 5 бильярдных шаров составляет величины 1,5, 2,5 и 3,5 Δt соответственно.

Фиг. 1C приводит схему процесса соударения, который подобен системе, описанной в отношении фиг. 1B, только здесь предусмотрено соударение между твердыми телами и текучей средой. Шар 1 здесь сталкивается с плунжером 2, ударяющим по текучей среде, которая, в свою очередь, ударяет по плунжеру 4, где по меньшей мере некоторая часть количества движения, переносимого ударным давлением, преобразуется в перемещение шара 5. Плунжеры 2 и 4 могут перемещаться внутри двух заполненных текучей средой цилиндров, которые находятся в сообщении по текучей среде через трубопровод 3. Цикл сжатия между шаром 1 и плунжером 2 начинается в момент первого контакта. Цикл сжатия между

плунжером 2 и текучей средой внутри первого гидравлического цилиндра также происходит во время соударения, но он начинается перед моментом максимального сжатия между указанным шаром 1 и указанным плунжером 2 вследствие более низкой сжимаемости текучей среды по сравнению с твердым телом.

Распространение симметричных цикла восстановления исходного состояния и сжатия по цепи бильярдных шаров, описанное в отношении фиг. 1B, подобным образом имеет место и здесь в системе, иллюстрированной в фиг. 1C, с дополнительным симметричным циклом восстановления исходного состояния и сжатия в текучей среде. Распространение в текучей среде передается как ударное давление, которое инициирует цикл сжатия, за которым следует цикл восстановления исходного состояния в текучей среде, когда оно перемещается через текучую среду.

Отрезок времени, или продолжительность, ударного давления, измеренного в некоторой точке в трубопроводе 3, может быть оценено с привлечением закона Герца

$$\Delta t = 2.86 \left(\frac{M^2}{RE^{*2}U} \right)^{1/5}$$

для времени контактирования. Важное значение для продолжительности ударного давления может быть получено применением выражения для приведенного выше E*, с использованием коэффициента Пуассона 0,5 для текучей среды и модуля объемной упругости текучей среды как модуля упругости. Однако следует отметить, что продолжительность должна быть порядка 3,5 Δt, поскольку весь процесс соударения в целом включает 5 предметов (два бильярдных шара, два плунжера и одну текучую среду).

Общий модуль упругости E*, как записанный выше, становится равным 0,37 ГПа при применении данных для воды с модулем объемной упругости 0,22 ГПа. Это демонстрирует, что значение общего модуля упругости E* определяет материал с наименьшим модулем упругости. В качестве одного примера бильярдный шар 1 с R=2,86 см и M=170 г, сталкивающийся при скорости соударения U=1 м/с с плунжером 2, дает время контактирования порядка 0,37 мс. Поэтому продолжительность ударного давления в трубопроводе 3 может быть оценена как величина порядка 1,3 мс (0,37×3,5).

Событие столкновения шара 1 с плунжером 2 и резкое перемещение шара 5 разделены во времени, и указанное разделение может в значительной мере зависеть от длины трубопровода 3. Физика соударения в фиг. 1C не описана во всех ее деталях. Однако важными моментами являются такие, что ударные давления генерируются процессом соударения, включающим движущийся твердый предмет (шар 1), и что ударное давление переносит (или содержит) количество движения, которое может быть преобразовано в перемещение (и количество движения) твердого предмета (шара 5).

Фиг. 1D обрисовывает процесс соударения, аналогичный системе, описанной в отношении фиг. 1C, которая иллюстрирует этапы генерирования ударного давления в текучей среде. Шар 1 движется со скоростью U в сторону плунжера 2 в гидравлическом цилиндре (наверху) и соударяется с плунжером 2, подвижно размещенным внутри заполненного текучей средой цилиндра (внизу). Гидравлический цилиндр находится в сообщении по текучей среде через трубопровод 3 с подземным пластовым резервуаром 6 таким образом, что соударение генерирует ударное давление, которое распространяется в подземный пластовый резервуар. Ударное давление может инициировать перемещения в подземном пластовом резервуаре и тем самым может приводить текучие среды в движение в подземном пластовом резервуаре, которые обычно являются неподвижными, например, вследствие действия разнообразных сил, таких как капиллярные силы.

Фиг. 2 показывает возможный вариант исполнения устройства 200 для генерирования ударных давлений в текучей среде, которую здесь нагнетают в подземный пластовый резервуар. Здесь устройство включает плунжер 202, размещенный в гидравлическом цилиндре 201 с отверстием 104 и в сообщении по текучей среде через трубопровод 110 с резервуаром 232 и подземным пластовым резервуаром 332, например, путем соединения трубопровода 220 с устьем ствола буровой скважины. Цилиндр с плунжером образует две стеночные части, подвижные относительно друг друга в заполненной текучей средой камере. Альтернативно или дополнительно устройство может быть соединено с любым резервуаром другого типа, не обязательно расположенным ниже уровня грунта. В этом варианте исполнения вентили 121, 122 размещены в трубопроводах таким образом, что текучая среда может быть смещена только по направлению от резервуара 232 в сторону подземного пластового резервуара 332, где она может быть, например, использована для вытеснения углеводородов и/или других текучих сред. В других вариантах исполнения в трубопроводах не размещены никакие вентили, или же размещены только в некоторых трубопроводах. Один или более вентилей могут быть использованы, чтобы снизить способность ударного давления распространяться по любому нежелательному направлению, такому как в сторону резервуара 232. Вентиль мог бы представлять собой обратный клапан, который закрывается, когда появляется разность давлений между впускным и выпускным патрубками обратного клапана. Вентиль также может быть обычным клапаном вместе с некоторым устройством для перекрывания клапана во время процесса соударения.

Ударные давления генерируются устройством, когда предмет 208 соударяется вне текучей среды с плунжером 202, ударяющим по текучей среде в гидравлическом цилиндре. Ударные давления распро-

страняются со скоростью звука в подземный пластовый резервуар 332 вдоль текучей среды из резервуара 232. Различные варианты исполнения устройства 200 описаны более подробно позже в отношении фиг. 3, 5 и 8-14.

Течение из одного резервуара в подземный пластовый резервуар может быть простым путем создано в результате разности гидростатического давления между резервуарами или, альтернативно или дополнительно, может быть генерировано путем нагнетания. Устройство для генерирования ударного давления подобным образом может быть использовано для генерирования ударного давления в неподвижной текучей среде.

Гидростатический напор между резервуаром 232 и гидравлическим цилиндром 201 или, альтернативно или дополнительно, нагнетательным устройством действует для выталкивания плунжера 202 в сторону крайнего положения между каждым ударом предмета. При необходимости могут быть предусмотрены другие средства для перемещения плунжера 202 обратно в его исходное положение после соударения. Крайнее положение плунжера в изображенном варианте исполнения представляет собой его самое верхнее положение. В систему могут быть включены устройства для предотвращения выхода плунжера 202 наружу из гидравлического цилиндра. Одна торцевая сторона плунжера 202 находится в контакте с текучей средой. Плунжер 202 может быть размещен в цилиндре 201 с уплотнением для ограничения утечки текучей среды между гидравлическим цилиндром 201 и плунжером 202.

Поскольку плунжер контактирует с текучей средой, удар предмета по плунжеру вызывает смещение плунжера 202 в цилиндре, которое пропорционально времени контактирования во время удара между предметом 208 и плунжером 202, и скорости соударения предмета 208, как было разъяснено выше в отношении фиг. 1A. Поэтому смещение плунжера является очень малым, едва заметным и незначительным, если сравнивать с тем, как плунжер должен был бы принудительно перемещаться вверх и вниз, чтобы создавать импульсы давления с измеримыми амплитудами пульсации текучей среды. Кроме того, в устройстве применен совершенно иной принцип сравнительно, например, с инструментами для сейсмической стимуляции, где, как правило, груз соударяется с наковальней некоторого типа, расположенной непосредственно на твердой матрице. В этом случае удар тем самым передается твердому материалу, тогда как здесь подвергнутый удару плунжер ударяет по текучей среде, генерируя ударные давления в текучей среде. Смещение плунжера, вызванное ударом предмета, скорее обусловлено сжатием текучей среды непосредственно под плунжером и происходит не вследствие любого вынужденного перемещения текучей среды.

Гидростатический напор значительной величины между резервуаром 232 и гидравлическим цилиндром 201, а также большое гидравлическое сопротивление в трубопроводах, ведущих к цилиндру и от него, также могут влиять на время контактирования, которое должно быть сокращено. Такое гидравлическое сопротивление могло бы быть вызвано многообразными особенностями трубопроводов, такими как сегменты с малым поперечным сечением в трубопроводах, длина трубопроводов, гидравлическое сопротивление вследствие трения на стенках трубопроводов и изгибы вдоль трубопроводов.

Однако наиболее важным обоснованием для малого времени контактирования является инерция текучей среды, предотвращающая любое значительное изменение движения текучей среды (или перемещение плунжера 202) во время соударения. Поэтому соударение главным образом создает цикл сжатия в текучей среде, которое передается как ударное давление от гидравлического цилиндра 201, как также разъяснялось в отношении фиг. 1C.

Ударное давление распространяется в текучей среде со скоростью звука, двигаясь (если что-то не препятствует этому) в сторону обоих резервуаров 332 и 232, причем само по себе не создает никакого результирующего транспортирования текучей среды между резервуарами 232 и 332. Поэтому фиг. 2 иллюстрирует возможный вариант исполнения устройства 200 для генерирования ударного давления, где устройство само по себе не вызывает никакого результирующего транспортирования текучей среды.

Короткое время контактирования имеет результатом большие положительные амплитуды давления и очень короткие времена нарастания ударного давления. Сокращение или минимизация времени контактирования (и тем самым смещения плунжера) является желательным для повышения эффективности системы генерирования ударного давления в отношении достигаемых амплитуд давления, времени нарастания и продолжительности.

Высокие амплитуды и короткое время нарастания ударного давления представляются благоприятными в операциях по добыче углеводородов, повышая скорость проникновения в подземный пластовый резервуар 332 и подавляя любую тенденцию к закупориванию и поддерживая подземный пластовый резервуар в превосходных условиях течения. Эти превосходные условия течения увеличивают скорость и область, при которых нагнетаемая текучая среда из резервуара 232 может быть размещена в подземном пластовом резервуаре 332. Операции по извлечению углеводородов часто предусматривают вытеснение углеводородов в подземном пластовом резервуаре еще одной текучей средой, которая в фиг. 2 поступает из резервуара 232, и это замещение текучих сред усиливается ударным давлением, распространяющимся в подземный пластовый резервуар.

Ударные давления с отрицательной амплитудой давления могут быть генерированы, когда ударные давления распространяются в текучей среде и испытывают отражение в системе. Такая отрицательная

амплитуда могла бы приводить к нежелательным кавитационным явлениям в системе, что может быть предотвращено достаточным притоком текучей среды из резервуара.

Фиг. 3 изображает еще один вариант исполнения устройства 200 для генерирования ударного давления. Здесь устройство дополнительно присоединено к устройству 340 для транспортирования текучей среды (такому как насос) и аккумулятору 350, который введен в трубопровод 212 между вентилем 224 и резервуаром 232. Подобно предыдущей фиг. 2, устройство находится в сообщении по текучей среде с подземным пластовым резервуаром 332 по трубопроводу 211, соединенному с устьем 311 ствола скважины 312.

Текучая среда в резервуаре 232 протекает через трубопровод 212, устройство 340 для транспортирования текучей среды, вентиль 224, гидравлический цилиндр 201, трубопровод 211, устье 311 ствола скважины, ствол 312 скважины и поступает в подземный пластовый резервуар 332. Устройство 340 для транспортирования текучей среды содействует транспортированию текучей среды из резервуара 232 в подземный пластовый резервуар 332. Текучая среда из резервуара 232 размещается в подземном пластовом резервуаре 332, или же текучая среда из резервуара 232 вытесняет другие текучие среды в подземном пластовом резервуаре 332. Соударение предмета 208 с плунжером 202 генерирует ударное давление, которое распространяется в подземный пластовый резервуар 332.

Аккумулятор 350 действует для гашения любого ударного давления, перемещающегося от гидравлического цилиндра 201 через вентиль 224 и в сторону устройства 340 для транспортирования текучей среды, и тем самым предотвращает вредное воздействие ударного давления со значительной амплитудой на работу устройства 340 для транспортирования текучей среды. Аккумулятор 350 также может вмещать в себе любой небольшой объем текучей среды, которая может накопиться в трубопроводной системе во время процесса соударения вследствие режима непрерывной подачи текучей среды от устройства 340 для транспортирования текучей среды.

Фиг. 4A и 4B показывают один пример изменения давления во времени, полученного генерированием ударных давлений на устройстве, как изображенного на фиг. 5, и из экспериментальной конструкции, как схематически показанной на фиг. 6.

Фиг. 4A показывает давление p 400 в текучей среде, как измеренное в фиксированном положении, и как функцию времени t 401, для продолжительности времени, где были генерированы 3 ударных давления 402. Одиночный импульс ударного давления показан более подробно на фиг. 4B, также иллюстрирующей типичный профиль ударного давления 402 во время продолжительности или на отрезке 404 времени, прошедшего от момента, когда ударное давление генерировано, до максимального давления, и со временем 405 нарастания от момента, когда ударное давление обнаруживается, до достижения его максимума (амплитуда, 403). В общем, ударные давления дают очень высокие и резко выраженные профили амплитуд давления по сравнению с давлениями, которые могут быть получены традиционными способами напорно-импульсного воздействия. То есть ударные давления, как правило, создают значительно более высокие амплитуды давления со значительно более коротким временем нарастания и значительно более короткой продолжительностью ударного давления.

Экспериментально полученные графики давления на фиг. 4A и 4B были зарегистрированы с помощью конструкции, как изображенной на фиг. 5, использованной для генерирования ударных давлений в экспериментах по заводнению кернов песчаника Berea.

Здесь ударные давления генерируют процессом соударения между предметом 208 и плунжером 202, ударяющим по текучей среде в цилиндре 201. В одной экспериментальной конструкции устройство 540 для нагнетания текучей среды было присоединено к трубопроводам 212 и 513. Резервуар 531 содержал соленую воду, используемую в экспериментах по заводнению керна. Пробку из керна песчаника Berea помещают в контейнер 532, который соединен с трубопроводами 211 и 512. Обратный клапан 522 присоединен к двум трубопроводам 512 и 514, и труба 533, размещенная, по существу, вертикально, используется для измерения объема нефти, извлеченной во время экспериментов по заводнению керна. Труба 533 соединена трубопроводом 515 с резервуаром 534, где собирается соленая вода.

В ходе экспериментов соленую воду нагнетают из резервуара 531 через материал керна, помещенного в контейнер 532. В этих экспериментах были использованы керны песчаника Berea с различными проницаемостями около 100-500 мД, которые перед экспериментами были насыщены нефтью согласно стандартным процедурам. Нефть, извлеченная при заводнении соленой водой, будет накапливаться на верху трубы 533 во время экспериментов, и объем соленой воды, собранной в резервуаре 524, тогда равен объему, пропущенному из резервуара 531 нагнетательным устройством 540. Более конкретные процедуры, примененные в этих экспериментах, следуют стандартному методу для экспериментов по заводнению на кернах песчаника Berea.

Трубопровод 212 является гибким, чтобы вмещать в себя любой малый объем текучей среды, которая может быть аккумулирована в трубопроводе во время процесса соударения между плунжером 202 и предметом 208 вследствие непрерывного транспортирования текучей среды нагнетательным устройством 540.

Плунжер 502 размещают в цилиндре 201 в направляющей и пространство в цилиндре ниже плунжера заполняют текучей средой. В экспериментах используют гидравлический цилиндр для воды объе-

мом около 20 мл. Общий объем соленой воды, протекающей через контейнер 532, представлялся близко соответствующим фиксированной величине расхода потока от нагнетательного устройства. Таким образом, в этих экспериментах устройство, включающее гидравлический цилиндр 201, плунжер 202 и предмет 208, вносит лишь незначительный вклад в транспортирование соленой воды. Соударение предмета с плунжером происходит в течение очень короткого интервала времени, и текучая среда не способна отреагировать на высокую ударную нагрузку каким-то смещением, которое приводило бы к усилению течения и тем самым изменению фиксированной величины расхода потока. Скорее, текучая среда испытывает удар плунжера, и количество движения плунжера преобразуется в ударное давление.

Ударное давление в ходе выполнения экспериментов было генерировано предметом 208 с весом 5 кг, поднятым на высоту 17 см и отпущенным падать на цилиндр, тем самым сталкиваясь с неподвижным плунжером 202. Использованный гидравлический цилиндр 201 имел объем около 20 мл и внутренний диаметр 25 мм, соответствующий диаметру плунжера 202.

Фиг. 6 представляет схему, показывающую устройство, использованное для выполнения процесса соударения и перемещения предмета, применяемого в процессе соударения в экспериментах на кернах песчаника Berea, и экспериментальную конструкцию, как использованную в эксперименте по заводнению керна на керне песчаника Berea, как было описано ранее.

Ударные давления здесь генерируют ударной нагрузкой на плунжер 202 в заполненном текучей средой гидравлическом цилиндре 202. Масса 801 предусмотрена на размещенном вертикально стержне 802, который с помощью двигателя 803 приподнимается на определенную высоту, с которой он может падать вниз на плунжер 202 и ударять по нему. Сила удара тем самым определяется весом падающей массы и высотой падения. На стержень может быть помещена увеличенная масса, и корректируется ударная нагрузка. Гидравлический цилиндр 201 соединен через трубопровод 212 с насосом 540 для текучей среды, который нагнетает соленую воду из резервуара 804 (не показан) через цилиндр и через первоначально насыщенный нефтью керн песчаника Berea, помещенный в контейнер 532. Давление непрерывно измеряли в различных положениях. Обратный клапан 121 (не показан) между насосом и цилиндром обеспечивает однонаправленное течение. Будучи пропущенной через керн песчаника Berea текучая среда (вначале текучая среда представляет собой только нефть, и после этого вода, которая прорывается через него, представляет собой почти только соленую воду) нагнетается в трубу для сбора извлеченной нефти и в резервуар для соленой воды, как изображено на фиг. 5.

Эксперименты были проведены с ударными давлениями, генерированными с интервалом около 6 с (10 соударений в минуту) на протяжении периода времени многих часов.

Перемещение плунжера 202, вызванное соударением, было весьма незначительным по сравнению с диаметром плунжера 202 и объемом гидравлического цилиндра 201, приводят только к сжатию общего объема текучей среды и не влияя на фиксированную величину расхода потока. Этот вывод также можно сделать из следующего. Объем гидравлического цилиндра 201 составляет около 20 мл, и объем текучей среды в керне песчаника Berea в контейнере составляет около 20-40 мл (были использованы керны с различными размерами пор). Поэтому совокупный объем, который может быть подвергнут сжатию предметом 208, соударяющимся с плунжером 202, составляет около 50-100 мл (в том числе некоторый объем трубопроводов). Сжатие такого объема примерно на 0,5% (которое потребовало бы давления около 110 бар (11 МПа), поскольку модуль объемной упругости воды составляет около 22000 бар (2200 МПа)) представляет сокращение объема примерно на 0,25-0,50 мл, соответствующее перемещению плунжера 202 вниз приблизительно на 1 мм или менее. Таким образом, плунжер 502 смещается примерно на 1 мм в течение интервала времени около 5 мс, на протяжении времени, за которое ударное давление могло бы распространиться преимущественно на 5-10 м. Это перемещение является весьма незначительным сравнительно с диаметром плунжера 202 и объемом гидравлического цилиндра 201.

Как было упомянуто выше, фиг. 4A показывает давление в текучей среде, измеренное на входе в контейнер 532, как функцию времени для одного из выполненных экспериментов. Ударное давление было генерировано предметом 208 с массой 5 кг, падающим на плунжер с высоты 0,17 м. Соударения (и тем самым ударное давление) были генерированы с интервалами времени приблизительно 6 с. Ударные давления были генерированы с амплитудами давления, измеренными в диапазоне 70-180 бар (7-18 МПа) или даже выше, поскольку манометры, использованные в экспериментах, могли измерять только до 180 бар (18 МПа). В сравнении понадобился бы предмет с массой около 50 кг, чтобы протолкнуть или прижать (не ударять) вниз плунжер для создания статического давления только около 10 бар (1 МПа). Вариации измеренных ударных давлений можно объяснить изменением условий во время проведения эксперимента, так как состояние текучей среды (турбулентность и т.д.) и условия в песчанике Berea варьируют от соударения к соударению.

Одиночный импульс ударного давления показан гораздо подробнее на фиг. 4b, которая также иллюстрирует типичный профиль ударного давления, полученного и измеренного в лабораторных экспериментах по заводнению керна песчаника Berea. Следует отметить, что амплитуда 403 составляет около 170 бар (17 МПа) (около 2500 psi), и что ширина 404 каждого из ударных давлений в этих экспериментах составляет приблизительно или около 5 мс, тем самым давая очень крутой фронт давления и очень короткое время нарастания и время падения. В сравнении амплитуды давления, полученные традиционным

напорно-импульсным воздействием пульсирующей текучей средой, имеют значения ширины в несколько секунд и амплитуды часто менее 10 бар (1 МПа).

Фиг. 7 представляет обобщение некоторых результатов, полученных в экспериментах по заводнению на кернах песчаника Berea, описанных ранее. Сравнительные эксперименты были проведены без ударного давления (отмечены как «А») и с ударным давлением (отмечены как «В») и перечислены ниже в таблице на фиг. 7 рядом друг с другом и для различных скоростей заводнения.

Эксперименты, выполненные без ударного давления (отмечены как «А»), были проведены на потоке текучей среды под действием статического давления, где нагнетательное устройство 540 было присоединено непосредственно к цилиндру 532 с керном. Другими словами, устройство 200 для генерирования ударного давления из гидравлического цилиндра 201, включающего плунжер 202 и предмет 208, было отключено или шунтировано. В обеих сериях экспериментов была использована одна и та же нефть типа Decan.

Средняя (в пределах поперечного сечения пробки из керна) скорость заводнения (в мкм/с) задается величиной расхода потока, создаваемого нагнетательным устройством. Во всех экспериментах устройство для генерирования ударного давления практически не влияло на общую величину расхода потока и тем самым на скорость заводнения, которая является желательной, поскольку высокая скорость заводнения могла бы приводить в более неравномерному проникновению нагнетаемой воды, и тем самым вела к раннему прорыву воды и образованию языков из-за разности вязкостей. В эксперименте 3В конструкция дополнительно включала аккумулятор, размещенный между гидравлическим цилиндром 501 и устройством 540 для нагнетания текучей среды. Избыточное давление в этом аккумуляторе обусловливало дополнительный эффект нагнетания, вызывающий высокую скорость заводнения 30-40 мкм/с, как сообщается в таблице. В идеальном случае, это избыточное давление должно было быть устранено. Результат 3В, включенный в фиг. 7, можно рассматривать как демонстрирующий, что улучшенное извлечение нефти может быть получено даже в случае высокой скорости заводнения. Как правило, большие величины расхода потока приводят к образованию языков из-за разности вязкостей и тем самым снижают нефтеотдачу. Поэтому этот экспериментальный результат показывает, что ударное давление предотвращает развитие образования языков из-за разности вязкостей, что объясняется ударным давлением, имеющим время нарастания и амплитуду, обеспечивающие разность давлений, преодолевающую капиллярное сопротивление в керне песчаника Berea.

Как видно из экспериментальных данных, применение ударного давления для заводнения приводит к значительному повышению нефтеотдачи в диапазоне приблизительно 5,3-13,6% (эксперименты 2 и 4 соответственно), четко демонстрируя потенциал предлагаемого способа извлечения углеводородов согласно настоящему изобретению.

Оценка времени контактирования между предметом и плунжером и тем самым времени контактирования при соударении может быть получена согласно той же серии вычислений, как обрисовано выше в отношении фиг. 1С, только здесь для теоретического процесса соударения между стальным шаром весом 5 кг (с R=5,25 см и коэффициентом Пуассона около 0,28) и водой. Общий модуль упругости, как описанный выше, становится равным 0,39 ГПа при применении модуля объемной упругости 0,22 ГПа для воды и модуля упругости 215 ГПа для стали. Время контактирования порядка 3,17 мс и продолжительность около 4,8 мс получены при применении теории соударения Герца. Это можно сравнить с измеренной продолжительностью ударного давления около 5 мс в экспериментах, как измеренной из экспериментально выведенных графиков зависимости давления от времени.

Экспериментально измеренная продолжительность ударного давления тем самым хорошо согласуется с оценочным значением для времени контактирования и продолжительности, определенных по теории соударения Герца. Теория соударения Герца приложима только к твердым телам, имеющим упругость, вышеуказанное применение модуля объемной упругости вместо модуля упругости будет давать только оценку времени контактирования для процесса соударения между твердым телом (с упругостью) и текучей средой (без упругости), однако с приемлемым приближением.

Подземный пластовый резервуар представляет собой пористую среду, которая включает сеть поровых объемов, соединенных поровыми каналами с различными диаметрами (a) и длинами (l). Пластовый резервуар мог бы содержать нефть и воду, и пластовый резервуар мог бы быть гидрофильным, смачиваемым нефтью, или имеющим смешанную смачиваемость. В гидрофильном пластовом резервуаре стенки поровых объемов и каналов по большей части покрыты водой. Динамические характеристики одной текучей среды, нагнетаемой в пластовые резервуары и тем самым вытесняющей текучие среды внутри пластового резервуара, были обстоятельно исследованы, чтобы получить повышенную нефтеотдачу. Нагнетаемая текучая среда представляет собой проникающую в пласт текучую среду, и текучие среды в пластовом резервуаре представляют собой несмешивающиеся вытесняемые текучие среды. Текучие среды в пластовом резервуаре могут испытывать (во время заводнения) капиллярное сопротивление или давление, когда протекают через поровые каналы. Это обусловливается поверхностным натяжением между текучими средами и условиями смачивания стенок поровых каналов.

Можно предположить, что капиллярное сопротивление (или капиллярное давление) порядка $Pc=\gamma/a$ должно быть преодолено, когда воду нагнетают в смачиваемые нефтью поровые каналы, заполненные

нефтью, или когда нефть выдавливается в смачиваемые водой поровые каналы, заполненные водой. Поверхностное натяжение γ между водой и нефтью составляет величину порядка 0,01 Н/м, и тем самым значение Pc равно 10-1000 Па для a=1-0,01·10^{-3} м.

Вода или нефть будет перемещаться через поровый канал в течение времени, которое составляет величину порядка временного параметра Рэлея

$$\tau_R = \sqrt{\rho a^3 / \gamma}\ ,$$

когда перепад давлений по длине (1) порового канала является достаточно высоким для преодоления капиллярного сопротивления. При допущении, что плотность составляет величину порядка 1000 кг/$м^3$, получается, что τ_R=0,01-10·10^{-3} с для a=1-0,01·10^{-3} м.

Перепад давлений по длине поровых каналов должен быть порядка Pc, и тем самым необходимо оценивать разность давлений, которую ударное давление могло бы создавать по длине поры порядка l=1-0,01·10^{-3} м. Ударное давление со временем нарастания (Δt) около 1 мс (время, за которое давление возрастает от нулевой до максимальной амплитуды) и максимальной амплитудой (I) около 150 бар (15 МПа) создавало бы разность давлений 150 бар (15 МПа) в пределах длины 1,5 м (вследствие того, что давление перемещается со скоростью звука (c) в текучей среде 1500 м/с). Таким образом, ударное давление может поддерживать разность давлений (ΔP) порядка 100-10000 Па (для a=1-0,01·10^{-3} м) в пределах длины порового канала в течение периода времени около 1 мс. Разность давлений (ΔP) может быть выражена как ΔP=Ia/(cΔt), и во многих случаях ΔP является достаточной для преодоления капиллярного сопротивления. Более того, продолжительность давления ΔP, равная Δt, часто является достаточной, когда сравнивается с временным параметром Рэлея τ_R. Критерий для преодоления капиллярного сопротивления также может быть выражен как Ia/(cΔt)>Pc или

$$I > \frac{\gamma c \Delta t}{a^2}$$

Пористая среда во многих пластовых резервуарах, представляющих интерес в плане операций по добыче углеводородов, имеет распределение пор по диаметрам с пиковым значением в диапазоне 0,1-0,01·10^{-3} м. Применение медианного диаметра пор было бы хорошей оценкой диаметра поровых каналов, который вносит основной вклад в капиллярное сопротивление пористой среды.

В сравнении импульс давления (с амплитудой 150 бар (15 МПа), которая является очень высокой, если даже не нереалистично высокой для многих традиционных технологий напорно-импульсного воздействия), который можно рассматривать как обычно имеющий время нарастания, возможно, около 1 с, может поддерживать разность давлений только около 0,1-1 Па по длине порового канала в течение периода времени одной секунды. Во многих случаях это является недостаточным, чтобы преодолеть капиллярное сопротивление, и продолжительность около одной секунды является излишне длительной по сравнению с временным параметром Рэлея τ_R.

Скорость, с которой текучая среда нагнетается во время заводнения, определяется, если проникающая в пласт текучая среда вызывает образование капиллярных или вязкостных языков в пластовом резервуаре. Скорость U может быть рассчитана по формуле Дарси U=кΔp/(μL), где к представляет проницаемость, μ представляет вязкость (порядка 30 мПа·с для нефти, где мПа·с=10^{-3} Паскаль × секунду), и Δp представляет разность давлений на дистанции L. Образование капиллярных языков обычно будет получаться при скорости течения U=10^{-6} м/с, когда проницаемость составляет величину порядка 100·10^{-3} D (Дарси=9,869·10^{-13} $м^2$). Образование вязкостных языков приводило бы к снижению нефтеотдачи, и поэтому важно, чтобы значение Δp не становилось слишком высоким. С применением вышеуказанных значений можно оценить, что Δp составляет величину порядка 3 бар (0,3 МПа) на дистанции L=1 м.

В случае применения ударного давления во время заводнения Δp в вышеуказанном уравнении Дарси следует заменить на Δp+(P_1).

Число (P_1) представляет собой усредненное по времени ударное давление P_1, и тем самым является преимущественным, чтобы усредненное по времени ударное давление было незначительным. Ударное давление с продолжительностью порядка 1 мс и максимальной амплитудой около 150 бар (15 МПа) давало бы усредненное по времени значение порядка 0,015 бар (0,0015 МПа), если один импульс ударного давления генерируется каждые 10 с. Импульс давления (с такой же амплитудой около 150 бар (15 МПа)) при продолжительности около 1 с имеет усредненное по времени значение 15 бар (1,5 МПа), если один импульс давления создается каждые 10 с. Таким образом, применение импульсов давления во время заводнения могло бы приводить к образованию языков из-за разности вязкостей, тогда как усредненное по времени ударное давление вносило бы лишь незначительный вклад в формулу Дарси.

Таким образом, применение стимуляций давлением, таким как ударное давление, во время заводнения является преимущественным, когда оно приводит к достижению повышенной нефтеотдачи. Это можно объяснить высоким давлением в сочетании с коротким временем нарастания (и продолжительностью) ударного давления, чем обеспечивается достаточная разность давлений на протяжении длины порового канала, которая может преодолеть капиллярное сопротивление. Кроме того, разность давлений может поддерживаться в течение достаточно длительного времени (близкого к временному параметру

Рэлея), создавая возможность прохода поверхности раздела текучих сред (вызывающих капиллярное сопротивление) через капиллярные каналы. Более того, короткое время нарастания ударного давления обеспечивает то, что усредненное по времени ударное давление не вносит существенного вклада в уравнение Дарси. Применение динамических характеристик соударения (процесса соударения) является простым и эффективным способом генерирования стимуляций давлением при коротком времени нарастания и для поддержания достаточной разности давлений в течение периода времени, близкого к величине в пределах 1-100-кратного временного параметра Рэлея, что можно объяснить коротким временем контактирования (по оценке с применением теории соударения Герца) и того же порядка, или в пределах 1-100-кратного временного параметра Рэлея.

Фиг. 8А и 8В изображают различные варианты исполнения устройств 200 для генерирования ударных давлений. Устройство 200 включает следующие компоненты: заполненную текучей средой камеру, которая может быть в форме цилиндра 201 с двумя отверстиями, плунжер 202, подвижно размещенный внутри камеры 201, первый 211 и второй 212 трубопроводы, которые соединены с отверстиями в гидравлическом цилиндре 201, и предмет 208, который может соударяться с плунжером 202, тем самым нанося удар по текучей среде, главным образом в части 801 камеры. Гидравлический цилиндр 201 может быть закреплен болтами на тяжелой платформе или на грунте. В этом варианте исполнения плунжер 202 размещают в цилиндре таким образом, что его нижний конец (в его самом верхнем положении) находится непосредственно у верхнего края отверстий в гидравлическом цилиндре 201 или близко к нему. Устройство 200 в фиг. 8В включает такие же компоненты, как система, описанная в отношении фиг. 8А, только теперь камера с размещенным внутри плунжером перевернута относительно грунта так, что предмет 208 сталкивается с камерой, ударяющей по текучей среде в ней. Малое вертикальное смещение гидравлического цилиндра 201 во время удара предмета 208 не приводит к ограничению течения воды. Чтобы приноравливаться к любому вертикальному смещению гидравлического цилиндра 201, сегменты трубопроводов 211 и 212 могут быть сделаны гибкими.

Как правило, текучая среда, протекающая через трубопровод 212 (через гидравлический цилиндр 201) и в сторону трубопровода 211, может содержать смесь текучих сред или других растворенных текучих сред. Во многих случаях система неизбежно будет содержать включения газа, например пузырьки воздуха, растворенного в водной текучей среде. Такие воздушные включения почти всегда присутствуют от начала систем текучих сред и могут перемещаться по системе с текучей средой, если их тщательно не удалять, например, удалением воздуха. Кроме того, воздушные пузырьки могут образовываться в воде вследствие турбулентного течения или вследствие удара предмета 208 по плунжеру 202.

Такие газовые включения, как правило, будут проявлять тенденцию к накоплению в самой верхней зоне в устройстве под действием гравитационных сил, так как газовые пузырьки будут подниматься вверх в текучей среде. В устройстве, схематически изображенном в фиг. 8А и В, эти мелкие газовые включения, такие как воздушные пузырьки, естественным путем собирались бы в зоне 800 в самой верхней части цилиндра, ниже плунжера 202. Здесь, если это не предотвращать, газовые включения могут накапливаться со временем, образуя скопление газовых включений, в конце концов с образованием больших газовых пузырей.

Вследствие более высокой сжимаемости газовых включений по сравнению с текучей средой газовые включения, присутствующие под плунжером 202, ударяющим по текучей среде в камере, увеличивали бы время контактирования и смещение плунжера 202 во время соударения. Чем больше количество газовых включений, которые присутствуют, тем большее смещение плунжера получается, и тем дольше время контактирования. Это является неблагоприятным, когда требуется генерирование ударных давлений с большой амплитудой и короткими временем нарастания и продолжительностью, когда важно поддерживать время контактирования настолько коротким, насколько возможно.

Поэтому любое скопление или накопление газовых включений в зоне 800 должно быть сокращено или предотвращено в части камеры, где текучая среда непосредственно подвергается удару 801. В вариантах исполнения согласно фиг. 8А и В это достигается размещением выпускного канала 211 из камеры рядом с зоной 800, где будут собираться газовые включения. Таким образом, газовые включения, такие как воздушные пузырьки, будут выталкиваться из гидравлического цилиндра 201 водой, протекающей из трубопровода 212 и в сторону трубопровода 211. В этих вариантах исполнения накопление газовых включений в камере дополнительно сокращается или даже предотвращается также размещением впускного патрубка вслед за местом или в тесной близости к месту, где текучая среда подвергается удару в процессе соударения, тем самым улучшая протекание в этой части 801 камеры.

Фиг. 9А и В показывают два варианта исполнения устройства 200 для генерирования ударного давления, где две стеночных части 901, 902 камеры, подвижные относительно друг друга, сформированы цилиндрами, вставленными один в другой. В системе предусмотрено уплотнение, чтобы ограничить утечку текучей среды между цилиндрами 901 и 902. Кроме того, в системе может быть предусмотрено устройство для предотвращения выхода цилиндра 901 из цилиндра 902 вследствие давления текучей среды, преодолевающего вес цилиндра 901 и любое трение в уплотнении.

В варианте исполнения согласно фиг. 9А, как впускной патрубок 212, так и выпускной патрубок 211 размещены в цилиндре 901, который подвергается удару предметом 208. Размещение впускного и

выпускного патрубков относительно зоны 800 газовых включений сокращает или предотвращает любое накопление 801 таких газовых включений, где текучая среда подвергается удару. В варианте исполнения согласно фиг. 9B, впускной патрубок 212 размещен в цилиндре 902, и выпускной патрубок 211 расположен в цилиндре 901, который подвергается удару предметом 208.

Фиг. 10A, B и C схематически показывают еще один вариант исполнения устройства для генерирования ударного давления согласно изобретению. Устройство 200 здесь включает плунжер 602, размещенный внутри цилиндра 601, где плунжер 602 разделяет цилиндр 601 на два отсека 1001, 1002. Плунжер 602 выступает наружу из гидравлического цилиндра 601 через отверстие 605 во втором отсеке 1002. Первый 211 и второй 212 трубопроводы соединены с двумя отверстиями в первом, заполненном текучей средой отсеке 1001. Предмет 208 размещен для соударения с плунжером 602, тем самым ударяющего по текучей среде в первом отсеке 1001, с образованием ударного давления, распространяющегося по трубопроводам 211 и 212, соответственно ранее раскрытым вариантам исполнения. Между плунжером 602 и стенками цилиндра в системе может быть предусмотрено уплотнение, чтобы ограничить утечку текучей среды между отсеками.

Кроме того, в систему может быть включено устройство для предотвращения перемещения плунжера 602 выше крайнего положения с преодолением давления текучей среды. Такое устройство может быть просто некоторой деталью плунжера 602 внутри цилиндра, которая не позволяет плунжеру выходить через отверстие 605.

Отверстие 604 позволяет текучей среде (например, воздуху) протекать или направляться во второй отсек 1002 и из него во время рабочего режима, чтобы корректировать или регулировать давление во втором отсеке 1002. Отверстие 604 в одном варианте исполнения может быть закрыто во время рабочего режима, тем самым подвергая текучую среду во втором отсеке сжатию и декомпрессии.

Таким образом, давление позади плунжера можно, например, контролировать так, чтобы полностью или частично выводить из равновесного состояния давление в текучей среде перед ударом предмета. Тогда это увеличивает количество энергии, которая будет преобразована в ударное давление.

Фиг. 10B показывает один вариант исполнения устройства, сравнимый с конструкцией на фиг. 10A, только здесь является иной ориентация системы, и предмет 208 соударяется с гидравлическим цилиндром.

Фиг. 10B показывает вариант исполнения устройства, сравнимый с конструкцией согласно фиг. 10A, только здесь плунжер 602 включает проточный канал 1003, чтобы текучая среда могла протекать между отсеками 1001, 1002, обеспечивая возможность размещения впускного патрубка 212 во втором отсеке 1002. В проточный канал вставлен однопроходный клапан 1004, позволяющий протекание только из второго отсека в первый отсек. Благодаря проточному каналу 1003 в плунжере давление в двух отсеках на обеих сторонах плунжера является одинаковым, и плунжер тем самым не перемещается под действием давления в текучей среде независимо от гидростатического давления в системе. Удар предмета 208 по плунжеру вызывает движение только вниз, и поэтому может быть применено другое устройство для перемещения плунжера в его исходное самое верхнее положение перед следующим ударом.

Фиг. 11-14 иллюстрируют различные варианты исполнения устройства для генерирования ударного давления согласно изобретению. В этих вариантах исполнения зона 800, где под действие гравитационных сил собираются любые газовые включения в текучей среде, была размещена в устройствах вне части 801 камеры, где текучая среда подвергается удару.

В фиг. 11 предмет соударяется с первой стеночной частью, расположенной на негоризонтальной стороне заполненной текучей средой камеры, тогда как любые газовые включения собираются в зоне 800 в самой верхней части камеры.

В фиг. 12 предусматривается падение всей камеры целиком вниз на предмет (такой как грунт). Тем самым текучая среда подвергается удару во время процесса соударения главным образом самой нижней части 801 камеры, тогда как любые газовые включения естественным образом собираются в зоне 800 в самой верхней части камеры.

В фиг. 13 плунжер включает проточный канал 1003. Кроме того, его нижняя поверхность, обращенная в сторону зоны 1301 удара по текучей среде, является вогнутой таким образом, что газовые включения в первом отсеке 1001 будут перемещаться вверх в проточный канал для накопления в зоне 800 во втором отсеке вне зоны 801 удара.

На фиг. 14 поверхность плунжера, обращенная в сторону зоны 1301 удара по текучей среде, скошена относительно горизонтали так, что газовые включения будут подниматься и перемещаться в зону 800 в стороне от места 801, где плунжер ударяет по текучей среде.

Инвазионная перколяция представляет собой сложное явление, наблюдаемое, когда одна текучая среда вытесняет еще одну текучую среду в пористой среде таким образом, как во время извлечения углеводородов из пористой среды в пластовом резервуаре нагнетанием текучей среды. Способ, описываемый в этом документе, основывается как на теоретических, так и на экспериментальных исследованиях инвазионной перколяции, и некоторые результаты будут представлены в нижеследующем описании.

Эксперименты по моделированию инвазионной перколяции были проведены на двумерной пористой среде, как иллюстрировано в фиг. 15-20. Двумерную (2D) пористую среду, показанную в фиг. 16-20,

изготовили из плотно упакованного монослоя случайно распределенных стеклянных бусинок 1600 с диаметром 1 мм и разместили между двух стеклянных пластин 1601. Стальные пластины 1602 и поперечины 1603 использовали для надежного удерживания стеклянных пластин на своем месте во время создания давления в 2D-системе. Четыре окна 1604 в стальных пластинах 1602 позволяют регистрировать картины структур, возникающих, когда проникающая текучая среда вытесняет несмешивающуюся текучую среду в плотно упакованном монослое стеклянных бусинок.

Ширина и длина 2D-системы составляли 250 мм и 1000 мм соответственно. Эффективная ширина W составляет около 230 мм вследствие уплотнений вдоль кромок. Оливковое масло с вязкостью около 0,084 Па·с используют в качестве вытесняемой текучей среды, и воду с вязкостью около 0,001 Па·с применяют в качестве проникающей текучей среды во время нагнетания текучей среды. Поверхностное натяжение γ между водой и оливковым маслом составляет около 0,0186 Н/м, и измеренная проницаемость k 2D-системы составляет около $2 \cdot 10^{-9}$ $м^2$. Сначала стеклянные бусинки размещают и плотно упаковывают между стеклянными пластинами, формируя пористую 2D-среду. Выполняют несколько процессов дренирования и поглощения для насыщения 2D-системы водой и оливковым маслом, первоначально размещенное исходное оливковое масло (OOIP) составляет около 80% общего объема текучей среды в 2D-системе. Затем в пористую среду нагнетали проникающую текучую среду (воду) через впускной канал 1607, расположенный по центру у одного конца 2D-системы с помощью насоса для текучей среды (не показан) и с контролируемой величиной расхода потока.

Эксперименты по инвазионной перколяции, результаты которых показаны в фиг. 17-20, были выполнены с генерированием и без генерирования ударного давления и во всех случаях с фиксированной величиной расхода потока 0,08 л/ч (80 мл/ч), задавая среднюю скорость U течения через поперечное сечение (1 мм×230 мм) около $9{,}7 \cdot 10^{-5}$ м/с или 35 см/ч. Капиллярное число Ca, определяемое как соотношение между давлением Дарси ($Pd=\mu rU/k$) и капиллярным давлением ($Pc=\gamma/r$), дает $Ca=\mu Ur^2/k\gamma$, которое в этих экспериментах по инвазионной перколяции составляет около 0,014. Радиус поровых каналов r иллюстрирован в фиг. 21 и оценивается составляющим около 0,25 мм.

Эксперименты по инвазии были повторены со стимуляцией давлением, приложенным к нагнетаемой текучей среде в форме ударных давлений. Ударное давление в описываемых экспериментах создают путем удара по плунжеру 804 в заполненном текучей средой гидравлическом цилиндре 805, как иллюстрировано на фиг. 15, и относящегося к тому же типу, как система, описанная в отношении фиг. 6. Массу 801 в 5 кг размещают на вертикальном стержне 802, который с помощью двигателя 803 поднимается до определенной высоты, с которой может падать вниз на плунжер 804. Генерирование ударного давления не оказывало влияния на величину расхода потока нагнетаемой текучей среды. Циклы ударного давления повторяли каждые 10 с. Проникающую текучую среду (воду) нагнетают через трубопроводы (не показаны) в гидравлический цилиндр 804 и затем в пористую 2D-систему через впускной канал 1607. Как проникающая, так и вытесняемая текучие среды оказываются в цилиндре 1606, из которого количество несмешивающейся текучей среды, вытесненной во время экспериментов по инвазионной перколяции, измеряют для получения коэффициента нефтеотдачи (% OOIP).

Во время всех экспериментов через окна в стальных пластинах 1604 проводили съемку цифровыми камерами изображений структур вытеснения, которые возникают во время инвазионной перколяции как при стимуляции давлением, так и без стимуляции.

Фиг. 17 и 18 показывают полученные структуры вытеснения, выведенные из экспериментов со стимуляцией (фиг. 17) и без стимуляции (фиг. 18) ударным давлением соответственно. Темным цветом 1701 показана проникающая текучая среда (вода) между стеклянными бусинками 1600, и светлым цветом 1702 показана вытесняемая текучая среда (оливковое масло). Фиг. 17B и 18B показывают те же результаты, только в контурном представлении, с вычерченной контурной линией 1703, показывающей фронт проникающей текучей среды. Эти изображения были сняты приблизительно через 1 ч после начала нагнетания текучей среды и являются показательными результатами для характеристических структур вытеснения, происходящего со стимуляцией ударным давлением и без стимуляции.

Как можно видеть из изображений на фиг. 17 и 18, стимуляция ударным давлением оказывает значительное воздействие на инвазионную перколяцию. Кроме того, коэффициент нефтеотдачи при стимуляции ударным давлением (фиг. 17) по измерениям составляет около 65% и тем самым является гораздо большим, чем полученный для стандартной нестимулированной инвазионной перколяции (фиг. 18), дающей извлечение только около 35%.

Фиг. 19 и 20 показывают площади структуры вытеснения, изображенные в фиг. 18, в увеличенных видах, т.е. для инвазионной перколяции без любой стимуляции ударным давлением.

В увеличенном изображении на фиг. 20 стеклянные бусинки 1600, формирующие пористую 2D-среду, ясно видны на фоне окрашенных текучих сред, заполняющих поры между бусинками.

Есть четыре различных масштаба во время инвазионной перколяции без любой стимуляции ударным давлением, определяемые как A-, C-, D- и W-рамки, показанные на фиг. 19-20.

Наиболее важным масштабом является масштаб, где наблюдается образование капиллярного языка, и это происходит внутри C-рамки, как обозначено на фиг. 19, и в увеличенном виде на фиг. 20. Длина

сторон C-рамки может быть определена из следующих соображений. Уравнение Дарси дает выражение для давления Дарси $Pd=\mu\lambda U/k$, где λ представляет длину C-рамки, μ представляет вязкость оливкового масла и k представляет проницаемость 2D-системы. В случае образования капиллярных языков давление Дарси составляет величину порядка капиллярного давления ($Pc=\gamma/r$), и тем самым можно допустить, что $\mu\lambda U/k \sim \gamma/r$.

Длина λ C-рамки тогда задается выражением $\lambda=r/Ca$, где Ca представляет капиллярное число (которое определяется как соотношение между давлением Дарси и капиллярным давлением в масштабе длины, равном радиусу r порового канала). Длина C-рамки ограничивается тем обстоятельством, что давление Дарси должно преодолевать капиллярное давление.

Фиг. 21 иллюстрирует две различные характеристические конфигурации порового объема 2100 пористой 2D-системы в экспериментах, как видимые сверху и сбоку соответственно. Квадратный поровый объем имеет 8 поровых каналов, и треугольный имеет 6 поровых каналов, входящих в каждый поровый объем. Как можно видеть в виде сверху в фиг. 21, диаметр d порового канала 2101 в поре 2100 можно оценить примерно равным радиусу стеклянных бусинок 0,5 мм, и тем самым $r=d/2=0,25$ мм. Дополнительным важным масштабом во время инвазионной перколяции является масштаб порового объема (A-рамка), который обозначен как A-рамка в фиг. 20. Диаметр стеклянных бусинок составляет 1 мм, и тем самым можно сделать вывод, что A=1,0 мм. Однако имеется некоторое расстояние между стеклянными бусинками и некоторые вариации диаметра стеклянных бусинок. Это делает величину «A» слегка большей, и длина «A» A-рамки оценивается около 1,1 мм.

Эксперимент по инвазионной перколяции, иллюстрированный на фиг. 18-20, имеет (как было определено выше) капиллярное число Ca около 0,014, и тем самым длина λ C-рамки составляет $\lambda \sim 18$ мм. Длина L D-рамки оценивается равной 81 мм (примерно в 4,5 раза больше λ), которая подразумевает, что $L \sim 0,35\ W$ [9] (где W представляет эффективную ширину экспериментальной 2D-системы). В порядке обобщения, четыре различных масштаба во время инвазионной перколяции были идентифицированы A-, C-, D- и W-рамками, и имеются около 268 (отношение 16,4) A-рамок внутри C-рамки, и имеются около 20 (отношение 4,5) C-рамок внутри D-рамки, и, наконец, имеются около 8 (отношение 2,9) D-рамок внутри одной W-рамки.

Структура вытеснения, которая появляется во время инвазионной перколяции, представляет собой фрактал [1]. Коэффициент нефтеотдачи во время инвазионной перколяции может быть оценен теоретически применением индексов фрактального измерения для образования капиллярных [2] и вязкостных [3] языков как 1,83 и 1,53 соответственно. Число A-рамок, введенных проникающей текучей средой (водой), тогда может быть определено числом C-рамок для проникновения как $16,4^{1,83}=167$, что составляет около 62% A-рамок внутри C-рамки, тогда как число C-рамок для проникновения составляет $4,5^{1,53}=10$, или 50% C-рамок в D-рамке. Совокупное число A-рамок в 2D-системе поэтому составляет $0,50\times0,62=0,31$, что можно рассматривать как хорошее согласование с измеренным коэффициентом нефтеотдачи около 35% для экспериментов с нагнетанием без стимуляции ударным давлением.

Фиг. 22 и 23 иллюстрируют распределение P 2200 давления по длине L 2300, соответствующей длине D-рамки, для D- и C-режимов соответственно. Давление Pd Дарси колеблется между двумя различными режимами (D и C). D-Режим (фиг. 22) представляет разность давлений Дарси (DPD) по длине L D-рамки, которое преодолевает вязкостные силы и поддерживает течение текучей среды через D-рамку. Это течение вязкой текучей среды проявляется в структурах вязкостных языков в D-рамке. Одна C-рамка (обозначенная тонкими вертикальными линиями) с длиной $\lambda \sim 18$ мм иллюстрирована в фиг. 22, и DPD (наклон 2201) на стороне выше по потоку, обеспечивающая течение проникающей текучей среды в C-рамку, является меньшей, чем DPD (наклон 2202) на стороне ниже по потоку, создающая течение вытесняемой текучей среды из C-рамки. Причина этого состоит в том, что имеется различие в вязкости проникающей текучей среды (воды) и вытесняемой текучей среды (оливкового масла); таким образом, более высокая DPD требуется для поддержания течения текучей среды вытесняемой текучей среды из C-рамки. Наклон 2203 представляет DPD, необходимую для вытеснения как проникающей, так и вытесняемой текучих сред внутри C-рамки. Так как доступная DPD предварительно задана для данной скорости U течения, и необходимо, чтобы DPD была больше, чем капиллярное давление в C-рамке, длина λ C-рамки ограничена.

Фиг. 23 иллюстрирует C-режим, где DPD (наклон 2301) поддерживает течение проникающей текучей среды в C-рамку (обозначенную тонкими вертикальными линиями), только теперь нет течения текучей среды из C-рамки, и DPD (наклон 2303) внутри C-рамки близка к капиллярному давлению Pc. Капиллярное давление (или сопротивление) предотвращает течение проникающей текучей среды из одной A-рамки в следующую A-рамку. DPD (наклон 2303) будет увеличиваться, поскольку проникающая текучая среда все еще протекает в C-рамку, пока капиллярное сопротивление преодолевается, и C-режим внезапно стягивается в D-режим. Эта флуктуация между D-режимом и C-режимом проявляется как колебания давления, и внезапный коллапс C-режима был назван в литературе [4] локализованными импульсами, лавинами или скачками Гейнса.

Продолжительность и динамические характеристики скачков Гейнса относятся к временному пара-

метру Рэлея и к динамическим характеристикам капиллярного течения. Фиг. 24 иллюстрирует ситуацию, где проникающая текучая среда 2401 (показанная черным цветом) проникает в поровый канал 2402, занятый вытесняемой текучей средой 2403, смачивающей поровый канал. Силы, которые должны быть преодолены, представляют собой вязкостные, капиллярные и гравитационные силы. При допущении, что поровый канал 2402 имеет круглое поперечное сечение 2403 с радиусом r и длиной b порового канала, 2404, получается уравнение капиллярной динамики

$$\frac{d}{dt}(mu) = \pi a^2 \Delta p - F - \pi a^2 \frac{\gamma}{r} - mG$$

,

где применим ньютоновский закон движения.

Сила вязкостного сопротивления

$$F = 8\pi\mu_i z\dot{z} + 8\pi\mu_d (b - z)\dot{z}$$

и сила инерции

$$\frac{d}{dt}(mu) = \pi r^2 \rho_d (\Delta\rho z\ddot{z} + b\ddot{z} + \Delta\rho\dot{z}^2),$$

могут быть выражены, как показано, где μ_d и μ_i представляют вязкость вытесняемой и проникающей текучей среды соответственно, $\Delta\rho = (\rho_i - \rho_d)/\rho_d$ с ρ_d и ρ_i как символами для плотности вытесняемой и проникающей текучей среды.

Уравнение капиллярной динамики описывает эволюцию положения z капиллярного мениска, как оно перемещается через поровый канал, и ž и $\dot{Z}$ представляют первую и вторую производные по времени положения z. Это уравнение не может быть решено аналитически, но численное уравнение

$$(\Delta\rho z + 1)\ddot{z} + \Delta\rho\dot{z}^2 = Cn - 8Oh\,[Mz\dot{z} + (1 - z)\dot{z}] - Boz - 1$$

может быть получено нормированием по времени с временным параметром Рэлея

$$\tau_R = \sqrt{p_d r^3 / \gamma}\ ,$$

и положения z с r, и при допущении, что длина b порового канала может быть оценена равной радиусу канала, b=r. Численное значение капиллярного числа $Cn=r\Delta p/\gamma$ представляет соотношение между разностью давлений и капиллярным давлением Pc. Безразмерные величины Oh и Bo представляет числа Онезорге, Бонда, и $M=\mu_i/\mu_d$. Число Онезорге [5] задается как

$$Oh = \frac{\mu_d}{\sqrt{\gamma\rho_d r}}$$

,

и число Бонда [6] определяется как

$$Bo = \frac{(\rho_i - \rho_d)gr^2}{\gamma}$$

Уравнение может быть решено численно для некоторых данных безразмерных величин с начальными условиями z=0 и $\dot{Z}$=0 при t=0. Однако следует отметить, что при этом начальном условии значение Cn должно быть больше, чем значение, обеспечивающее любое перемещение мениска. Численное значение капиллярного числа $Cn=r\Delta p/\gamma$ становится

$$\frac{r\Delta p}{\gamma} = \frac{r\mu\lambda U}{k\gamma} \sim \frac{r\mu rU}{k\gamma Ca} \sim 1$$

при допущении, что Δp представляет давление Дарси в C-рамке с длиной $\lambda=r/Ca$.

Численные моделирования показаны на фиг. 25 и 26 с положением z как функцией времени t, нормированного по временному параметру Рэлея, и для двух различных величин капиллярного числа Cn=2 и Cn=3 соответственно. Эти численные моделирования выполнены с оливковым маслом как вытесняемой текучей средой и водой как проникающей текучей средой, которые дают Oh=1,33, Bo=-0,005 и τ_R=0,92 мс. Гравитационная сила не является важной для перемещения через поровый канал и поэтому здесь игнорирована. Из численных результатов можно видеть, что время, требуемое для перемещения мениска (z-положения) через поровый канал (т.е. до достижения z=1), составляет величину, примерно 3-кратную (фиг. 25) и 6-кратную (фиг. 26) временного параметра Рэлея для Cn=2 и 3 соответственно.

Такие же численные моделирования выполнены на фиг. 27 и 28, только на основе физических параметров нефти типов, наблюдаемых в месторождении Gullfaks, расположенных в области Tampen в северной части Северного моря (Норвегия). Расчеты основывались на вязкости нефти 0,033 Па·с, поверхностном натяжении 0,013 Н/м и радиусе порового канала, оцененном составляющим около 0,025 мм [7-8], давая значения Oh=1,94 и τ_R=0,04 мс. Как можно видеть из фиг. 27 и 28, численные моделирования показывают продолжительность около 4-9-кратного временного параметра Рэлея.

Эти моделирования свидетельствуют в пользу того, что динамические процессы в A-рамке происходят в масштабе временного параметра Рэлея. Поэтому было бы благоприятным применение стимуляции ударным давлением во время инвазионной перколяции со временем нарастания давления порядка

величины временного параметра Рэлея. В этом случае разность давлений Δp, используемая в численном значении капиллярного числа, составляет Δp=Pi, где Pi представляет стимуляцию давлением в форме ударного давления. Применение этого Δp=Pi=2γ/r, или Δp=Pi=3γ/r, дает Cn=2 или 3, как применяемое в численных моделированиях, показывая, что давление Дарси тем самым не требуется для получения капиллярных языков, как наблюдается в результатах, например, в фиг. 17. Следовательно, C-рамка становится такой же большой, как W-рамка (как видно в фиг. 17), и описываемой стимуляцией ударным давлением, приводя к коэффициенту нефтеотдачи 0,62 (или 62%) вместо 0,50×0,62=0,31, когда давление Дарси необходимо для получения капиллярных языков. Поэтому коэффициент нефтеотдачи резко повышается при стимуляции ударным давлением этого типа, так как устраняется коэффициент 0,50. Полученный теоретический коэффициент нефтеотдачи на уровне 62% близок к экспериментально наблюдаемому коэффициенту нефтеотдачи в 65%.

Далее приведено обобщение вариантов исполнения согласно изобретению.

Вариант исполнения 1 описывает способ извлечения углеводородной текучей среды из пористой среды нагнетанием текучей среды в пористую среду, включающий стадии, в которых

определяют временной параметр Рэлея на основе плотности текучей среды и углеводородной текучей среды, медианного диаметра пор пористой среды и поверхностного натяжения между текучей средой и углеводородной текучей средой;

производят стимуляцию давлением в текучей среде, причем стимуляцию давлением создают с помощью процесса соударения при времени контактирования при соударении, которое составляет величину в диапазоне 1-10-кратного временного параметра Рэлея, такую как в диапазоне 1-3-кратного временного параметра Рэлея.

Вариант исполнения 2 описывает способ согласно варианту исполнения 1, в котором время контактирования при соударении определяется на основе массы, плотности, модуля упругости и коэффициента Пуассона соударяющихся предметов в процессе соударения, их относительных скоростей и модуля объемной упругости текучей среды и углеводородной текучей среды.

Вариант исполнения 3 описывает способ согласно любому из вариантов исполнения 1-2, дополнительно включающий стадию, в которой определяют капиллярное давление на основе медианного диаметра пор в пористой среде и поверхностного натяжения между текучей средой и углеводородной текучей средой, и причем стимуляция давлением включает стадию, в которой генерируют ударное давление с амплитудой давления и временем нарастания, соответствующими разности давлений в пределах медианного диаметра пор пористой среды, которая составляет величину порядка 1-5-кратного капиллярного давления.

Вариант исполнения 4 описывает способ согласно любому из вариантов исполнения 1-3, в котором процесс соударения включает соударение между падающим предметом и плунжером, где предмет имеет массу в диапазоне 10-2000 кг, такую как в диапазоне 100-1500 кг, такую как в диапазоне 500-1200 кг, и предмету дают падать на плунжер с высоты в диапазоне 0,02-2,0 м, такой как в диапазоне 0,05-1,0 м, такой как в диапазоне 0,1-0,5 м.

В то время как были описаны предпочтительные варианты осуществления изобретения, должно быть понятно, что изобретение этим не ограничивается, и могут быть сделаны модификации без выхода за пределы изобретения. Области изобретения определяются пунктами прилагаемой патентной формулы, и все устройства, которые попадают в пределы смысла пунктов патентной формулы, либо буквально, либо эквивалентно, предполагаются включенными в изобретение.

[1] Feder, J., Fractals, издательство Plenum Press, Нью-Йорк (1988)

[2] Lenormand, R., Zarcone, C, Capillary fingering: percolation and fractal dimension, Transp. Porous Media, том 4, стр. 599-612 (1989)

[3] Måløy, K.J., Feder, J., Jøssang, T., Viscous fingering fractals in porous media, Phys. Rev. Lett., том 55, стр. 2688-2691 (1985)

[4] Crandall, D., Ahmadi, G., Ferer, M., Smith, D.H., Distribution and occurrence of localized-bursts in two-phase flow through porous media, Physica A, том 388, стр. 574-584 (2009)

[5] McKinley, G. H., Renardy M., Wolfgang von Ohnesorge, Phys. Fluids, том 23, стр. 127101 (2011)

[6] Hager, W.H., Wilfrid Noel Bond and the Bond number, Journal Hyd. Res., том 50, стр. 3-9 (2012)

[7] «A Cataloge of crude oil and oil product properties», Environmental Protection Directorate, Оттава, Канада, 1990

[8] «The effects of rock characteristics on relative permeability», National Institute for Petroleum and Energy Research, Бартлсвилл, Оклахома, США, 1990

[9] Løvoll и др., Influence of viscous fingering on dynamic saturation-pressure curves in porous media, Transp. Porous Med., том 86, стр. 305-324 (2010).

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ извлечения углеводородной текучей среды из пористой среды нагнетанием текучей среды в пористую среду, включающий стадии, в которых

определяют медианный диаметр пор пористой среды;

определяют временной параметр Рэлея на основе плотности текучей среды и углеводородной текучей среды, медианного диаметра пор пористой среды и поверхностного натяжения между текучей средой и углеводородной текучей средой;

размещают, по меньшей мере частично, заполненную текучей средой камеру в сообщении по потоку с пористой средой по меньшей мере через один трубопровод, причем камера включает первую и вторую стеночные части, подвижные относительно друг друга;

размещают твердое тело вне текучей среды;

производят стимуляцию давлением в текучей среде вследствие распространения ударного воздействия в пористую среду через трубопровод, создаваемого с помощью процесса соударения указанного твердого тела с первой стеночной частью так, что первая стеночная часть наносит удар по текучей среде внутри камеры, при этом процесс соударения имеет длительность, которая имеет значение в диапазоне 1-100-кратного временного параметра Рэлея.

2. Способ извлечения углеводородной текучей среды из пористой среды нагнетанием текучей среды в пористую среду, включающий стадии, в которых

определяют медианный диаметр a пор пористой среды;

размещают, по меньшей мере частично, заполненную текучей средой камеру в сообщении по потоку с пористой средой по меньшей мере через один трубопровод, причем камера включает первую и вторую стеночные части, подвижные относительно друг друга;

размещают твердое тело вне текучей среды;

производят стимуляцию давлением в текучей среде вследствие распространения ударного воздействия в пористую среду через трубопровод, создаваемого с помощью процесса соударения указанного твердого тела с первой стеночной частью так, что первая стеночная часть наносит удар по текучей среде

внутри камеры, при этом процесс соударения генерирует ударное воздействие с амплитудой I давления и временем Δt нарастания давления, где амплитуда давления является большей, чем отношение $\gamma c\Delta t/a^2$, где γ представляет поверхностное натяжение между текучей средой и углеводородной текучей средой, и с представляет скорость звука в пористой среде.

3. Способ извлечения углеводородной текучей среды из пористой среды нагнетанием текучей среды в пористую среду, включающий стадии, в которых

определяют медианный диаметр а пор пористой среды;

определяют временной параметр Рэлея на основе плотности текучей среды и углеводородной текучей среды, медианного диаметра а пор пористой среды и поверхностного натяжения между текучей средой и углеводородной текучей средой;

размещают, по меньшей мере частично, заполненную текучей средой камеру в сообщении по потоку с пористой средой по меньшей мере через один трубопровод, причем камера включает первую и вторую стеночные части, подвижные относительно друг друга;

размещают твердое тело вне текучей среды;

производят стимуляцию давлением в текучей среде вследствие распространения ударного воздействия в пористую среду через трубопровод, создаваемого с помощью процесса соударения указанного твердого тела с первой стеночной частью так, что первая стеночная часть наносит удар по текучей среде внутри камеры, причем процесс соударения имеет длительность, которая имеет значение в диапазоне 1-100-кратного временного параметра Рэлея, и при этом процесс соударения генерирует ударное воздействие с амплитудой I давления и временем Δt нарастания давления, где амплитуда давления является большей, чем отношение $\gamma c\Delta t/a^2$, где γ представляет поверхностное натяжение между текучей средой и углеводородной текучей средой, и с представляет скорость звука в пористой среде.

4. Способ по любому из предшествующих пунктов, в котором стимуляция давлением включает стадию, в которой генерируют ударное воздействие с амплитудой давления в диапазоне величины, в 1-5 раз большей, чем $\gamma c\Delta t/a^2$.

5. Способ по любому из предшествующих пунктов, в котором длительность процесса соударения определяется на основе массы, плотности, модуля упругости и коэффициента Пуассона соударяющихся тел в процессе соударения, их относительных скоростей и модуля объемной упругости текучей среды.

6. Способ по любому из предшествующих пунктов, дополнительно включающий стадию, в которой определяют капиллярное давление на основе медианного диаметра пор пористой среды и поверхностного натяжения между текучей средой и углеводородной текучей средой, причем стимуляция давлением включает стадию, в которой генерируют ударное воздействие с амплитудой давления и длительностью, соответствующими разности давлений порядка 1-5-кратного капиллярного давления по длине, равной медианному диаметру пор пористой среды.

7. Способ по любому из предшествующих пунктов, дополнительно включающий стадию, в которой определяют время контактирования при соударении в процессе соударения, и в котором упомянутая длительность определяется как процентная доля времени контактирования при соударении в процессе соударения, такая как в диапазоне 10-40%.

8. Способ по любому из предшествующих пунктов, где медианный диаметр пор пористой среды определяют с помощью ртутной порометрии на образце пористой среды.

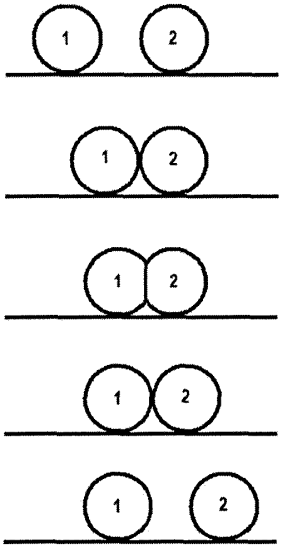
9. Способ по любому из предшествующих пунктов, в котором процесс соударения включает соударение между падающим твердым телом и плунжером, где тело имеет массу в диапазоне 10-10000 кг, и телу дают падать на плунжер с высоты в диапазоне 0,02-2,0 м.

10. Способ по любому из предшествующих пунктов, дополнительно включающий стадию, в которой генерируют несколько указанных процессов соударения с интервалами времени.

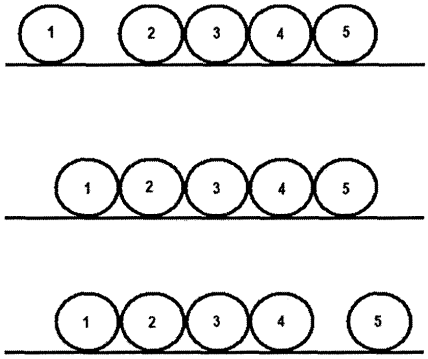
11. Способ по п.10, где указанные процессы соударения генерируют с интервалами времени в диапазоне 1-20 с.

12. Способ по любому из пп.10, 11, включающий стадию, в которой генерируют первую последовательность процессов соударения с первыми значениями амплитуды давления, длительности и времени между соударениями, за которой следует вторая последовательность процессов соударения с иными значениями амплитуды давления, длительности и времени между соударениями.

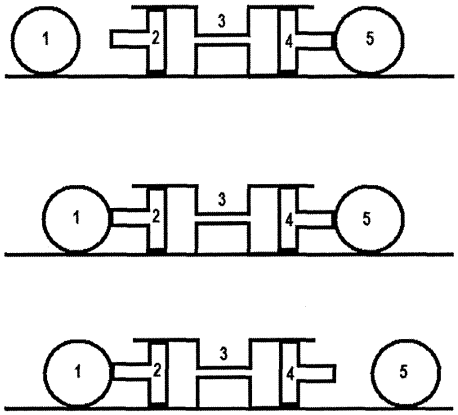
13. Способ по п.12, в котором указанные значения амплитуды давления и длительности варьируют изменением массы твердого тела и/или изменением скорости твердого тела относительно первой стеночной части перед соударением.



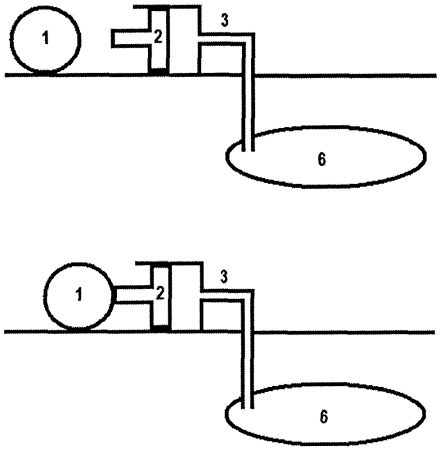
Фиг. 1A



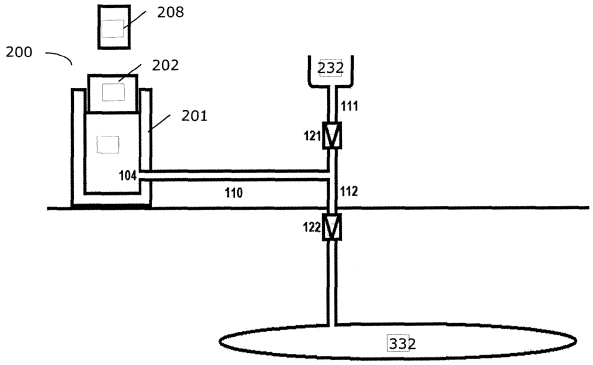
Фиг. 1B



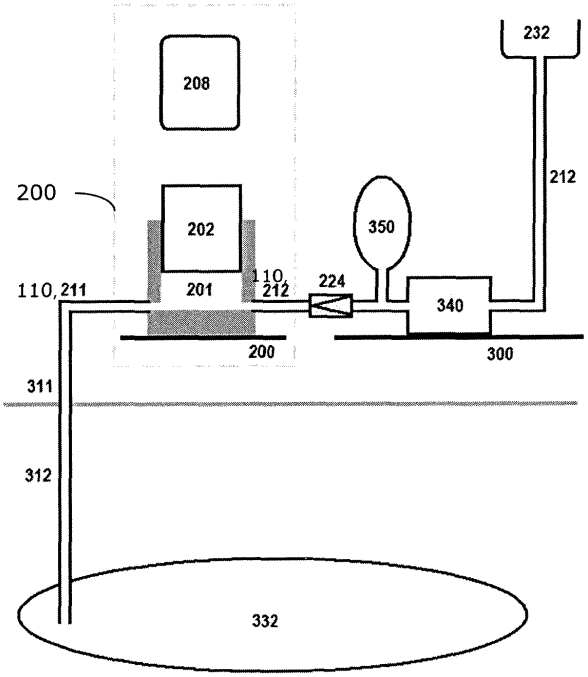
Фиг. 1C



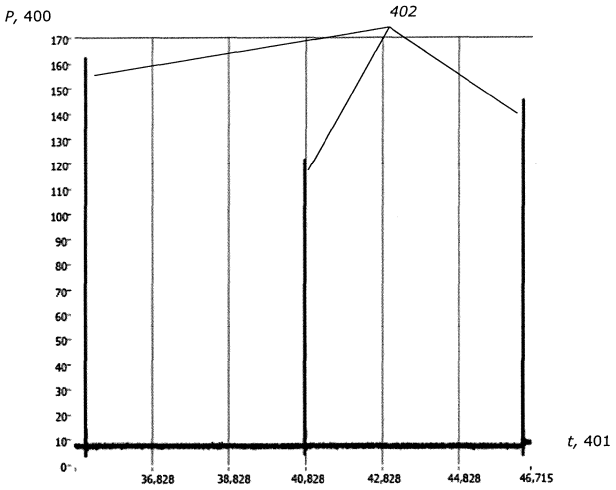
Фиг. 1D



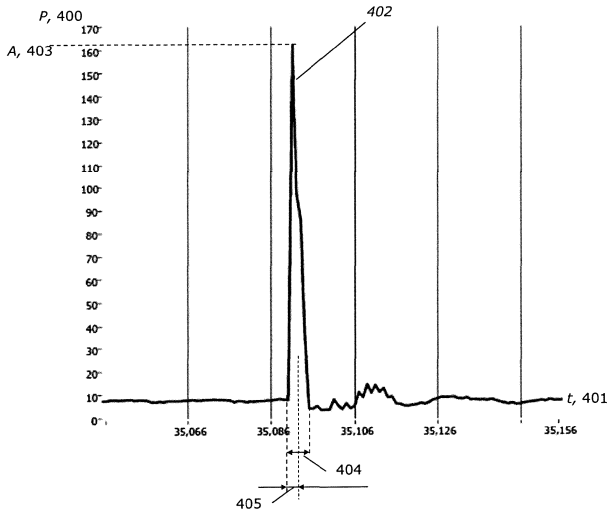
Фиг. 2



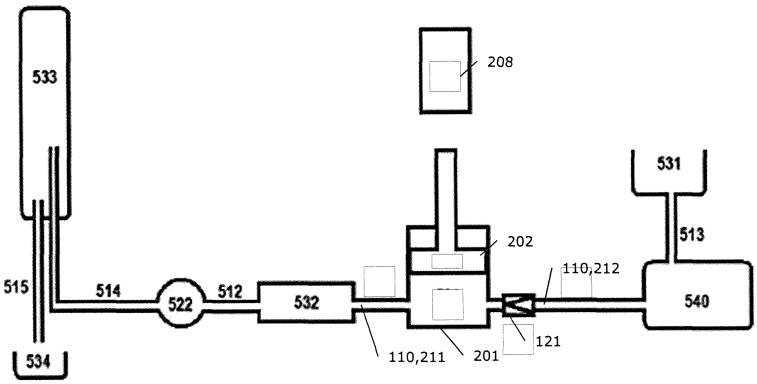
Фиг. 3



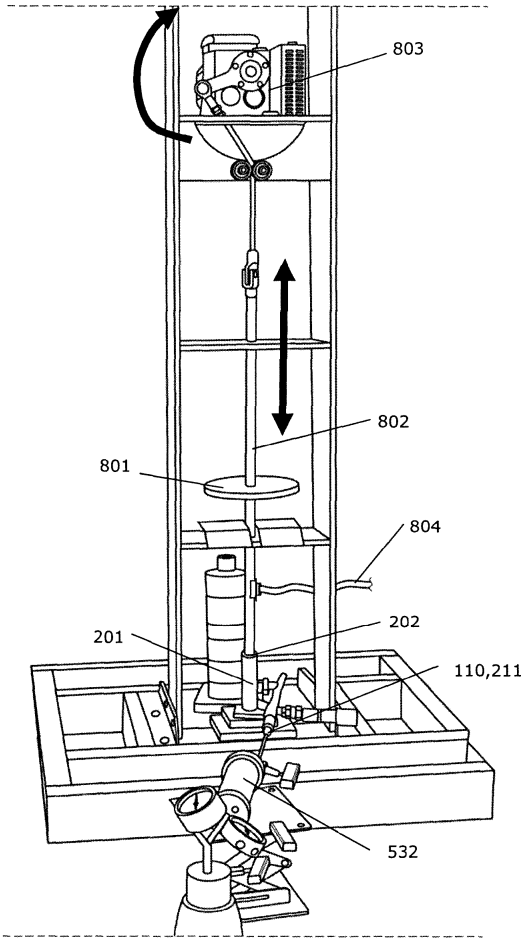
Фиг. 4A



Фиг. 4B



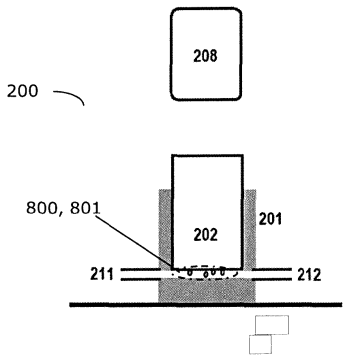
Фиг. 5



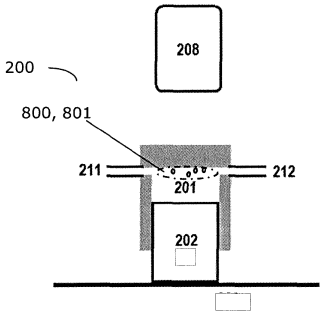
Фиг. 6

Эксперименты; A=стандартный способ; B=кратковременные давления	Поровый объем керна (мл)	Размер L/D (см)	Прони-цаемость по воде (Kw) (мДарси)	Исходное масло на месте (мл)	Скорость заводнения (мкм/сек)	Извлеченное масло (мл)	Нефтеотдача (% исходного оливкового масла (OOIP))
1 A	37.0	14.8/3.79	540	30.0	1.48	16.1	53.6
1 B	***37.3***	***14.8/3.79***	***540***	***29.9***	***1.48***	***19.4***	***64.9***
2 A	19.7	10.0/3.705	134	15.8	1.55	8.3	52.5
2 B	***19.7***	***10.0/3.705***	***134***	***16.1***	***1.55***	***9.3***	***57.8***
3 A	37.0	14.8/3.79	540	30.0	14.8	16.2	54.0
3 B	***37.0***	***14.8/3.79***	***540***	***30.6***	***30-40***	***20.7***	***67.6***
4 A	19.7	10.0/3.705	134	15.8	15.5	8.4	53.2
4 B	***19.7***	***10.0/3.705***	***134***	***16.1***	***15.5***	***9.9***	***61.5***

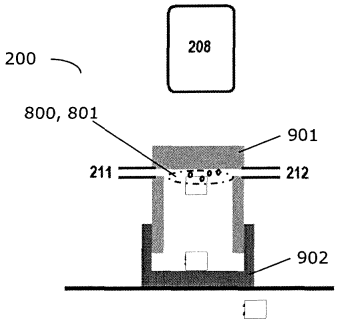
Фиг. 7



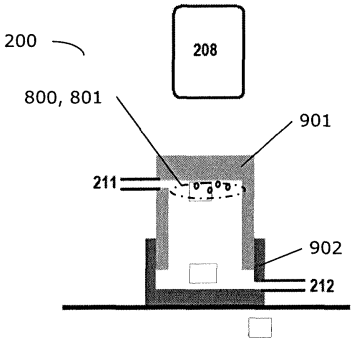
Фиг. 8A



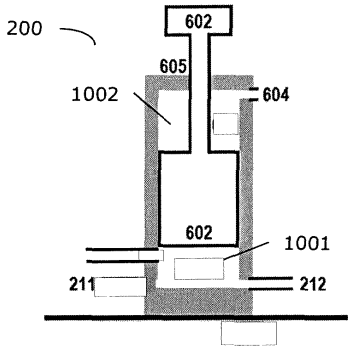
Фиг. 8B



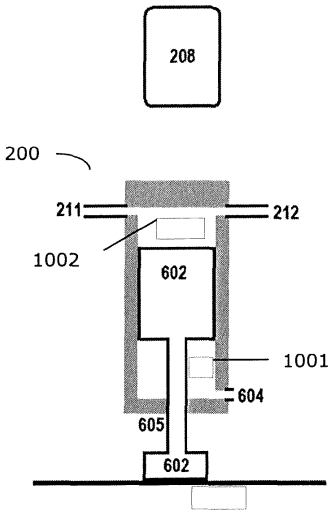
Фиг. 9A



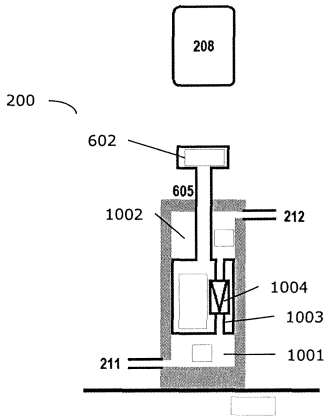
Фиг. 9B



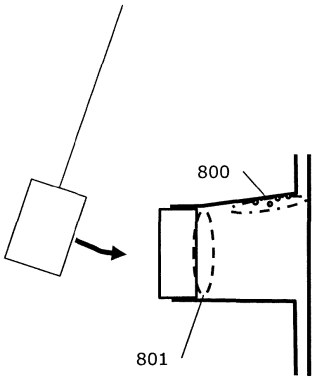
Фиг. 10A



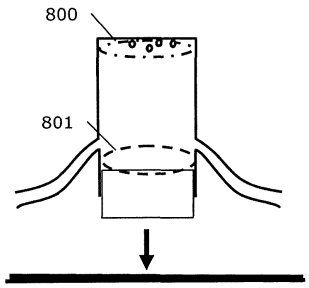
Фиг. 10B



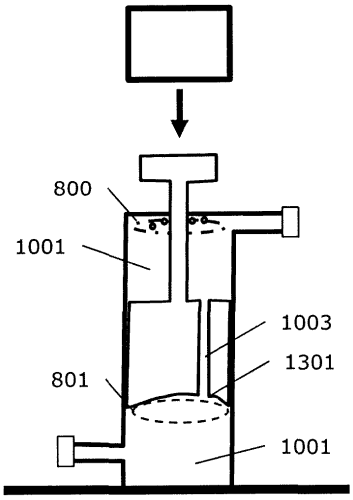
Фиг. 10C



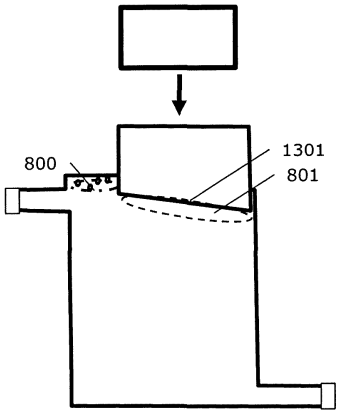
Фиг. 11



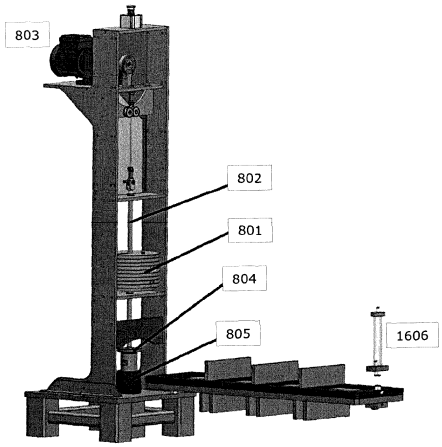
Фиг. 12



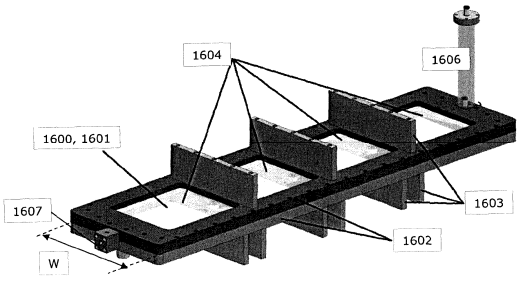
Фиг. 13



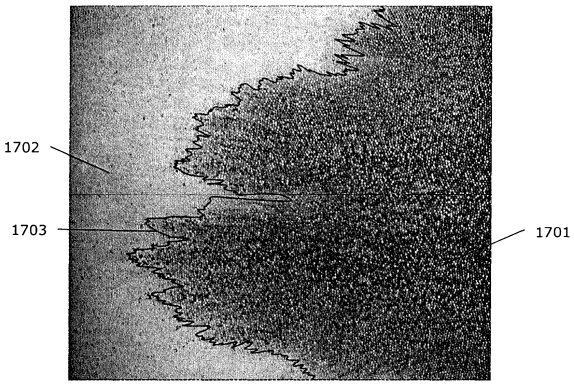
Фиг. 14



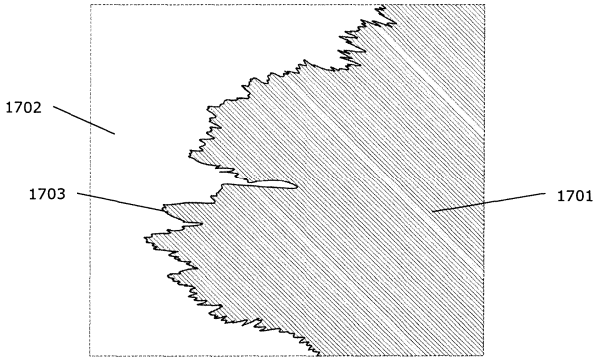
Фиг. 15



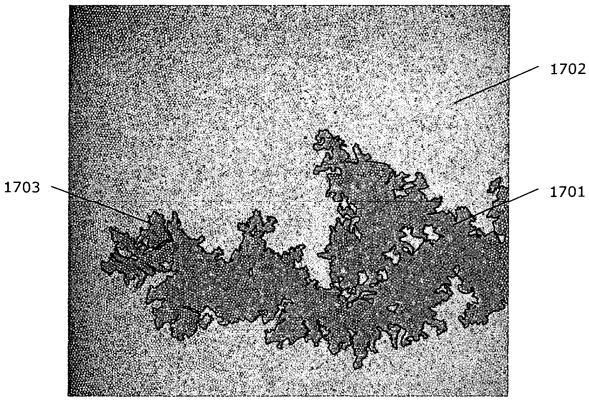
Фиг. 16



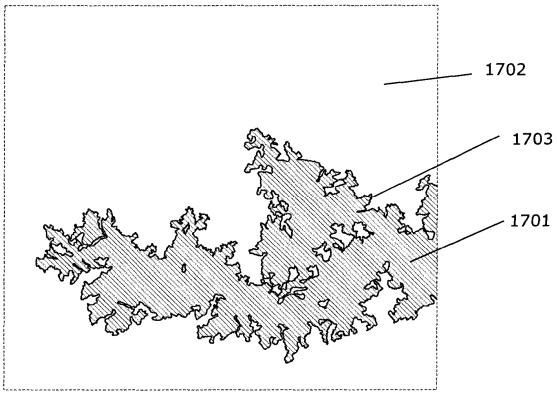
Фиг. 17A



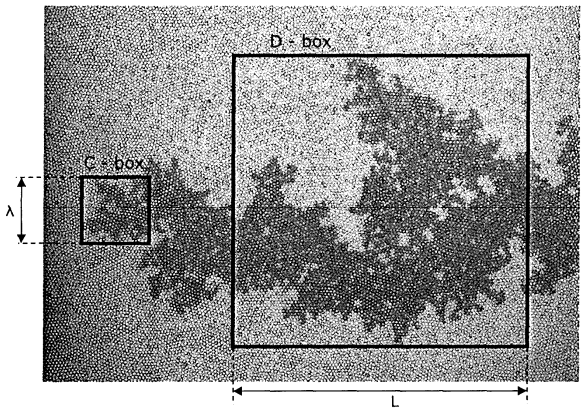
Фиг. 17B



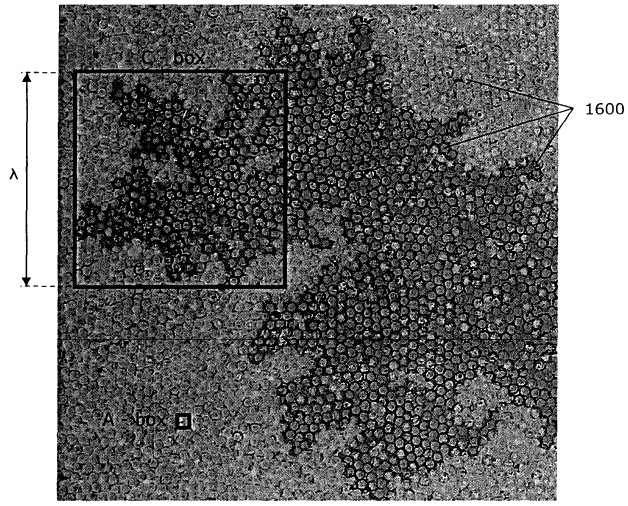
Фиг. 18A



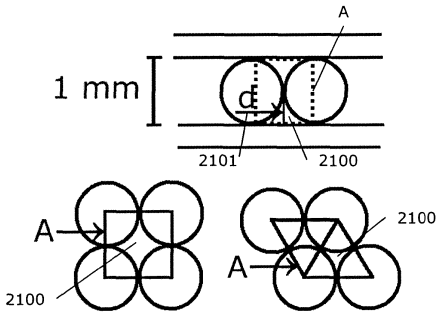
Фиг. 18B



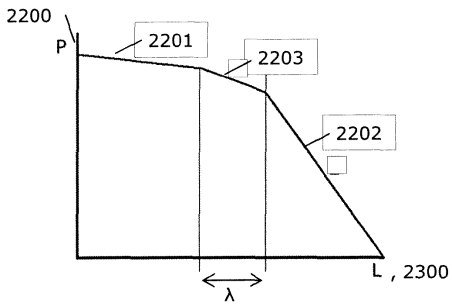
Фиг. 19



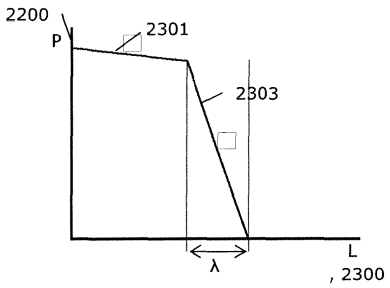
Фиг. 20



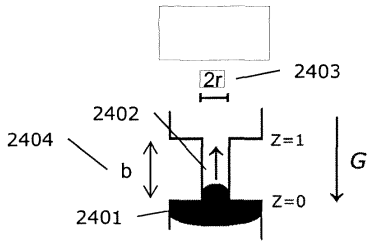
Фиг. 21



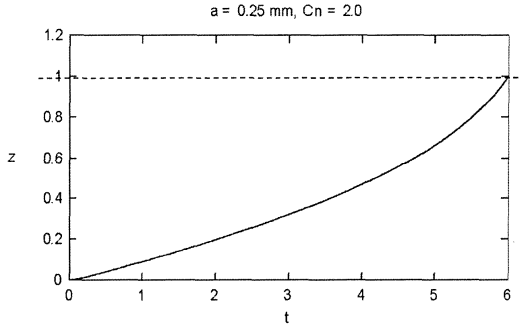
Фиг. 22



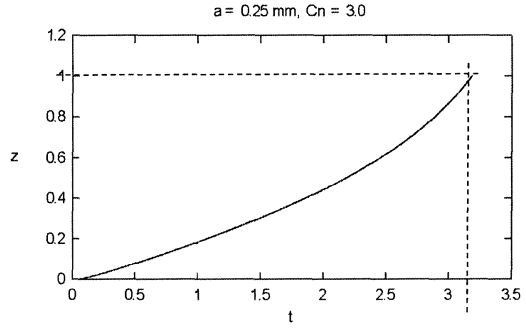
Фиг. 23



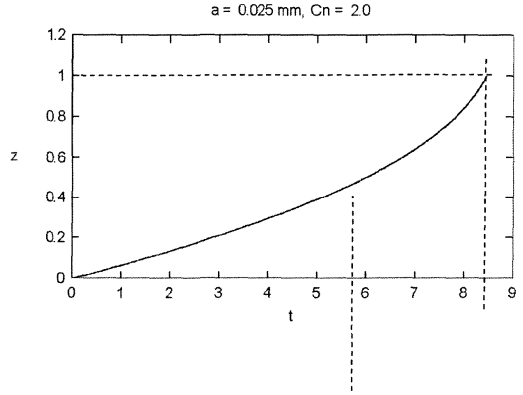
Фиг. 24



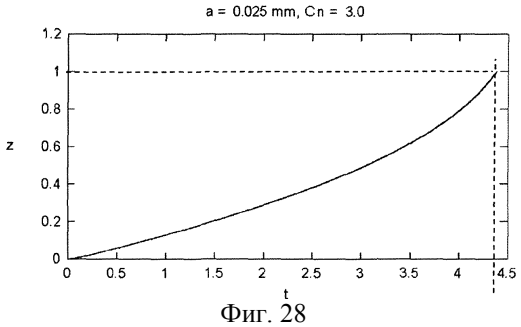
Фиг. 25



Фиг. 26



Фиг. 27



Фиг. 28

Евразийская патентная организация, ЕАПВ
Россия, 109012, Москва, Малый Черкасский пер., 2