

К вопросу о механизме электроразрядной интенсификации притока флюидов в скважины

П. П. Малюшевский, А. П. Малюшевская

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: malushevsk_pavel@ukr.net*

Исследуются современные методы импульсного воздействия на призабойную зону нефтеносных пластов, в том числе метод электровзрыва. Обсуждаются их достоинства и недостатки в практическом использовании. Рассматривается возможный физический механизм эффективно-го воздействия импульсной кавитации и последующего газовыделения на прискважинные участки нефтеносных пластов. Результатом такого воздействия являются разрушение запирающего слоя и возобновлением притока. Предлагается рациональное расположение электроразрядной камеры на устье скважины, которая становится одновременно волноводом электроразрядных волн давления-растяжения к призабойной зоне нефтеносного пласта.

Ключевые слова: электрический разряд, нефтеносный пласт, импульсная кавитация, возобновление притока нефти.

УДК 622.244.5:537.528

ВВЕДЕНИЕ

Нефтяная промышленность находится в сложной фазе развития. На разрабатываемых месторождениях почти не осталось фонтанирующих скважин при одновременном увеличении их обводнённости, а новые месторождения имеют слабые геолого-промысловые характеристики по сравнению с разрабатываемыми.

В реальных условиях фильтрационные свойства пласта ухудшаются на всех этапах сооружения и эксплуатации скважин. При бурении фильтрационные свойства в прискважинной зоне начинают ухудшаться с момента вскрытия пласта. Под действием репрессии твёрдая фаза промысловой жидкости частично откладывается на стенке скважины, образуя глинистую корку, некоторое её количество с частицами меньше диаметра пор проникает в пласт, образуя зону кольматации толщиной от 2 до 10 см. При этом проницаемость снижается на 30–60%, а при проявлении ещё и самокольматации в прискважинной зоне может произойти полная блокировка проницаемых пор.

Важным элементом современной технологии нефтедобычи является декольматация скважин.

В последние три десятилетия для декольматации, а значит, для повышения добычи нефти используются (наряду с другими методами и оборудованием) погружные электроразрядные устройства [1] типа «Скиф» с целью обработки призабойной зоны скважин. При этом повышаются и нефтедобыча, и нефтеотдача.

Электроразрядное устройство типа «Скиф» представляет собой погружаемый в скважину генератор импульсных токов (ГИТ) с активным разрядником для воспроизводства в скважинной

жидкости электрических разрядов. Все элементы ГИТ секционированы и заключены в прочный, жесткий трубчатый корпус длиной от 5 до 11 м с минимизированным диаметром по размеру скважины. Устройство опускается в скважину на кабель-тросе под собственным весом и таким образом может использоваться только в прямолинейных вертикальных или слабонаклонных скважинах. Это его недостаток, поскольку в настоящее время всё больше эксплуатируют пологонаклонные скважины (например, с берега моря в шельфовые месторождения или при кустовом способе разбуривания скважин одной буровой вышкой). Более того, после входа буримой скважины в продуктивный пласт её разворачивают горизонтально и ведут вдоль пласта в его толще или иногда даже с обратным наклоном (подъёмом). Ясно, что в этих случаях погружное электроразрядное устройство совершенно неприменимо, причем даже при успешной технической достижимой минимизации размеров таких погружных электроразрядных устройств [2]. Вероятно, такую ситуацию можно было бы назвать тупиковой, но нельзя забывать, что остаются неисследованными множество других способов и схем транспортировки комплекса электровзрывных воздействий из скважин в зону продуктивного пласта.

Чтобы расширить область использования электрического разряда как инструмента интенсификации нефтедобычи (или добычи других полезных ископаемых через скважины), необходимо подробно разобраться в физическом механизме локального электроразрядного воздействия на насыщенный жидкостью пласт, а после получения необходимых знаний можно предложить приемлемую новую схему электровзрывно-

го воздействия на продуктивный пласт через действующую скважину.

Пока самой распространённой гипотезой механизма электроразрядной интенсификации фильтрационных процессов в пластах и повышения их нефтеотдачи считается «превалирующее действие на изменение фильтрационных характеристик в пористой насыщенной среде нефтяного коллектора волн сжатия, создающих и развивающих радиальные и цилиндрические трещины» [3, 4].

Однако «пористая насыщенная среда нефтяного коллектора» при увеличении скорости нагружения (электрический взрыв) ведёт себя так, что возрастает удельная энергоёмкость разрушения как при нормальном, так и при повышенном давлении.

С ростом скорости деформирования почти пропорционально увеличивается удельная поверхностная энергия, что связывается с ростом предельных напряжений текучести, возрастанием модуля упругости первого рода примерно в 3,5 раза, модуля всестороннего сжатия – почти в 5 раз, а модуля упругости второго рода – более чем в 5 раз; в слабых же породах под воздействием импульса давления может иметь место так называемый эффект уплотнения, то есть уменьшение объёма порового пространства и соответственно уменьшение проницаемости [5].

Указанная в [3, 4] гипотеза, к сожалению, и до настоящего времени остаётся неподтверждённой. Приведенные в [4] и взятые в расчет экспериментальные (полученные в стендовых условиях) данные не отвечают скважинным условиям, поскольку для разряда использовалась не солёная пластовая вода, а пресная. В солёной морской воде осуществить электрический пробой не удаётся, поэтому рассуждения о параметрах канала электрического разряда, на основании которых выполнены все расчеты со всеми вытекающими последствиями, не состоятельны.

Конечно, в таких условиях на аноде возникает плотный сгусток коронного разряда, также генерирующий волны сжатия и гидродинамические течения парогазовой полостью, образовавшейся на месте плазменной короны после прекращения ввода энергии. Но амплитуда давления этих волн по сравнению с пробойным разрядом в слабопроводящей воде меньше на порядок величины [6]. Такие слабые волны сжатия не в состоянии разрушить пластовые породы, которые к тому же сжаты геостатическим давлением. Таким образом, трещинообразование в данном случае исключено.

Специалистами в области электроразрядной интенсификации нефтедобычи проведены исследования работы погружных устройств с закры-

той электродной системой [7–9], существенно расширяющей возможности воспроизводства электрических разрядов. Однако применение предложенной закрытой электродной системы не устраняет принципиального недостатка существующих погружных скважинных устройств, а именно невозможности перемещения под действием сил гравитации в условиях наклонных, криволинейных, а тем более горизонтальных и восходящих скважин. Кроме того, путем использования закрытых электродных систем не устраняется необходимость извлечения из скважины насосно-компрессорных труб и других технологических систем перед ее электроразрядной обработкой.

ГЛАВНЫЙ ФАКТОР – ЭЛЕКТРОВЗРЫВНАЯ КАВИТАЦИЯ

С момента первых испытаний устройств типа «Скиф» [10] на нефтяных месторождениях Тартарстана возникла дискуссия по этому вопросу. Что же работает в солёной воде скважины, если электрический пробой не возникает, ударных волн явно нет, но нефтеотдача повышается? Были последовательно проанализированы все факторы электровзрыва, и возникло предположение о тогда редко учитываемом факторе – электроразрядной кавитации [11]. Но из-за необычности и даже по тем временам некоторой фантастичности предположения о нём быстро забыли специалисты, продолжавшие разработку метода электроразрядной интенсификации притока флюидов в скважину из продуктивного пласта. Хотя гораздо позже проведенные совместные исследования ASR Corp. и Лос-Аламосской национальной лаборатории показали повышение мобильности нефти при воздействии сейсмических волн даже очень незначительной амплитуды (70 Па) [12].

Все теории процесса интенсификации притока флюидов стали эксплуатировать вышеупомянутую гипотезу про интенсивное трещинообразование в пластовых породах под действием даже теоретически чрезвычайно слабого электровзрывного воздействия. Кроме того, зачастую параметры электровзрыва в солёной воде подменялись параметрами электровзрыва в пресной воде, и в дальнейших исследованиях эта неувязка совершенно не учитывалась.

Таким образом, приняв как основную гипотезу о кавитационном механизме интенсификации притока флюидов из продуктивного пласта в скважину, следует уже доказать её состоятельность.

Поскольку энергетически электрический взрыв в описанных выше условиях и аппаратах не является мощным, то, очевидно, он служит

как бы спусковым механизмом для каких-то мощных естественных пластовых процессов, увеличивающих долгосрочный повышенный приток флюидов в скважину.

Следует учесть, что по технологии бурения и эксплуатации скважин применяют много буровых и промывочных глинистых растворов. Когда такой раствор закачивают в скважину, то какая-то его часть внедряется в пласт, как показано выше. Насыщая породу, вода плотно обволакивает её частицы, наглухо забивает поры и порода становится плохо проницаемой.

Рядом исследователей установлено [13–15], что энергия сцепления воды с обволакиваемыми ею частицами равна произведению коэффициента поверхностного натяжения воды на площадь смачиваемой ею поверхности. Выяснилось, что на протяжении пласта, сквозь который нефть движется к скважине, вода перераспределяется очень неравномерно. Её содержание резко увеличивается в участках пласта, примыкающих к скважине, падая почти до нуля в отдалённых его участках. Причем непосредственно у скважины вода сливается почти в сплошную плёнку, сквозь которую и газу, и жидкости чрезвычайно трудно прорываться. Мелкодисперсные частицы, перемещаемые потоком нефти, постепенно также оседают в прискважинной зоне. Со временем именно у стенки скважины поры пласта оказываются закупоренными. Силы сцепления этих пробок со стенками пор пласта таковы, что успешно противостоят пластовому давлению.

При выполнении исследований [13] был отмечен следующий факт: для всех видов обработанной нефти характерно обильное газовыделение при каждом разряде. И это даже для нефти, поднятой на поверхность и долгое время находившейся в нормальных условиях. В пласте же при высоком давлении растворимость газов в сотни раз выше, и такая газонасыщенная жидкость при подходе к скважине оказывается в метастабильном состоянии. Вероятно, под действием даже коронного электрического разряда во всём объёме среды, окружающей разрядный промежуток (и в первую очередь в прискважинных зонах), возбуждаются кавитация (сопровождаемая так называемой «выпрямленной диффузией»), подобная [16], и бурное газовыделение. Вода, обволакивающая твёрдые частицы и поровые поверхности, в пульсирующем поле давления кавитационной области обрывается («стряхивается») с них, образуя проходы в запирающей плёнке.

Газовыделение регулируется изменением параметров электровзрывов [13, 16]. Быстро поднимается пластовое давление и выбрасывает закупоривающие растворные пробки из пор. Вме-

сте с ними из пор и микротрещин выбрасываются подвижные (незакреплённые) частицы, которые также препятствовали притоку нефти к скважине. В прискважинном пространстве начинается и устанавливается хороший приток флюидов, то есть скважина как бы сама себя поддерживает, производя очистку пор и естественных микротрещин сильным естественным потоком движущейся под действием уже несдерживаемого пластового давления нефти. Увеличиваются работающая толща пласта и дебит скважины. Только постепенно (в проведенных экспериментах – через 6–10 месяцев) приток нефти вновь начинает падать.

Исходя из вышесказанного, следует признать актуальным решение проблемы управляемого генерирования электроразрядной кавитации в призабойной зоне пласта (ПЗП) нефтяных и водонагнетательных скважин.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЛАСТ

Ещё в 1980-е годы в тресте «Татнефтегеофизика» была разработана новая технология воздействия на прискважинную зону с помощью депрессии и репрессии. Отличительной её особенностью является многократность создания глубоких и резких депрессий и репрессий в зоне обработки. Проведение такой обработки в импульсном режиме позволяет полностью использовать вымывающий эффект и эффект гидроудара. В дальнейшем эта технология обработки призабойной зоны нефтяных и водонагнетательных скважин была усовершенствована [15].

При реализации гидроударной технологии генератор импульсов давления размещали на устье скважины на обсадной колонне или боковом отводе. По внешнему электрическому сигналу генератор сначала воздействует сжатым воздухом на столб скважинной жидкости давлением p_k , а затем через заданный промежуток времени снимает нагрузку. В результате столб скважинной жидкости сжимается и совершает интенсивные колебания, а на забое скважины возникают последовательно сменяющие друг друга репрессия и депрессия. Коэффициент отражения на забое скважины (цементный мост) в данном случае близок к 0,9, а на устье – от газовой полости – 1. При забое из многометрового слоя глины коэффициент отражения составляет 0,5. При $p_k \geq 0,5p_c$ (p_c – гидростатическое давление на забое) и разгрузке устья депрессия на забое достигает p_c , и происходит разрыв жидкости. При схлопывании полостей в призабойной зоне зависимость «давление – время» принимает вид, характерный для кавитационных процессов: рез-

кие, многократно повторяющиеся пики давления. При $p_k \geq 0,7p_c$ разрывы на забое повторяются до третьего колебания столба жидкости в скважине. Использование сжатого воздуха под давлением до 15 МПа позволяет создавать полное разрежение до разрыва жидкости на забое скважин глубиной до 2–3 км. При этом расход сжатого воздуха на одно воздействие в скважине глубиной 3 км достигает 100 дм³. Технология может осуществляться как при поднятых и извлеченных насосно-компрессорных трубах, так и по межтрубному пространству без подъема насоса. Конечно, следует отметить, что это достаточно сложная, малопроизводительная и расходная технология обработки призабойной зоны пласта.

Авторы этой технологии объясняют физический механизм очистки призабойной зоны как «эффект вантуза»: «многократное возвратно-поступательное движение флюида в призабойной зоне пласта с периодом от 1 до 10 с при достаточно большом градиенте давления (до 20 МПа) способствует разрушению кольматирующих частиц, их отрыву от поверхности каналов и трещин в призабойной зоне, а вынос флюида в скважину через перфорационные каналы – вовлечению в неё этих частиц и осаждению их на забое» [15]. Однако они совершенно не берут во внимание наблюдаемую ими же кавитацию.

Недавно фирма ASR Corp. (США) совместно с ООО «РусГазНефть» предложили гидроударную технологию для повышения нефтедобычи и нефтеотдачи [17], по существу близкую к описанной выше, но по техническому исполнению существенно иную.

Предложенное ими гидроударное устройство состоит из двух незначительно модифицированных стандартных штанговых насосов, работающих в скважине с помощью двух цилиндров с плунжерами, соединёнными между собой несколькими специальными трубами НКТ-10. Одновременное движение вверх плунжеров приводит к сжатию жидкости между ними и внутри НКТ-10. В момент выхода нижнего плунжера из верхнего конца цилиндра происходит очень быстрый (40–50 мс) выброс сжатой жидкости, приводящий к классическому гидроудару. Возникшая гидроударная волна через перфорационные отверстия распространяется по пласту со скоростью звука, воздействует на пласт. По мере движения по пласту гидроударная волна трансформируется в упругие волны.

Авторы объясняют способность упругих волн повысить нефтеотдачу пласта двумя физическими механизмами. Первый – упругие волны, воздействуя на капельную нефть, просто отрывают её капли от стенок поровых каналов и вовлекают в существующий поток жидкости. Второй меха-

низм подразумевает коалесценцию нефтяных плёнок, окружающих зёрна породы, с образованием капель нефти, способных к перемещению.

Но авторы [17] свои рассуждения относят на макроскопический уровень, совершенно не поясняя, каким образом гидроударная волна с фронтом шириной ~ 74 м (пересчет 50 мс) проникает в каналы, поры и капилляры с характерным поперечным сечением 5–100 мкм. Ведь такое может произойти, как показано в [18], только в том случае, если сама гидроударная волна трансформируется в микрокавитацию, обеспечивающую более короткие ударные фронты генерируемых волн сжатия.

Однако в двух рассмотренных методах и технологиях есть неоспоримое преимущество: воздействие на пласт осуществляется фактически от устья скважины, что снимает все ограничения габаритов исполнительных аппаратов и устройств. Кроме того, один из них позволяет не извлекать насосно-компрессорные трубы, существенно ускоряя и облегчая процесс обработки скважин.

Электроразрядный способ обработки скважин от устья

Для эффективной реализации кавитационного механизма воздействия на призабойную зону пласта следует расположить электровзрывной источник первичных волн сжатия–разрежения также на устье скважины. Лучшим вариантом геометрии его электроразрядной камеры будет эллипсоидальная, аналогичная [19], так как это позволит её второй фокус вынести непосредственно в скважину. Ранее было показано [20], что при осуществлении подводного электрического взрыва в одном из фокусов разрядной камеры эллипсоидальной формы, вследствие активных волновых процессов, во втором её фокусе через некоторое время, определяемое параметрами жидкости, возникает область с характеристиками поля давлений такими же, как в первом фокусе в момент электровзрыва. В то же время в первом фокусе давление столь же быстро снижается, практически исчезает.

Рассчитывать импульсное давление электровзрыва в первом фокусе следует с учетом заполнения скважины углеводородной жидкостью [20]. Решение задачи об электрическом разряде в нефти в газодинамическом приближении требует использования уравнения состояния вещества, выражающего зависимость давления от плотности. В расчетах применили уравнение Тэйта, коэффициенты которого рассчитывались по обобщенной методике, разработанной для жидких углеводородов [21].

Для проверки уравнения были взяты экспериментальные данные, полученные для 32 углево-

дородов различного молекулярного строения, – от C_6 до C_{20} с молекулярной массой от 86 до 563, и охвачен диапазон температур от комнатной до близкой к критической, а по давлению – от атмосферного до 1000 МПа.

Изначально рассматривали уравнение состояния углеводородной жидкости в виде

$$V_0 - V = A \ln \left[(p + B) / (p_0 + B) \right], \quad (1)$$

где A , B – осредненные константы уравнения состояния; p – давление.

Сравнивая (1) с известным уравнением Тэйта для воды

$$p = B[(r/r_0)^n - 1], \quad (2)$$

где $B = 304,5$ МПа; $n = 7,15$ – показатель адиабаты, ρ – плотность, определяли соответствие между константами обоих уравнений, преобразовав последнее уравнение к виду (1):

$$(p/B + 1)^{1/n} = r/r_0 B(1/n) \ln(p/B + 1) = \ln(V/V_0).$$

Полагая изменение удельного объёма незначительным, принимали $V = V_0 + \Delta V$ и правую часть раскладывали в ряд по ΔV :

$$\begin{aligned} \ln(V_0/V) &= \ln[V_0/(V_0 + \Delta V)] = -\ln(1 + \Delta V/V_0) \approx \\ &\approx -\Delta V/V_0 = (V_0 - V)/V_0 \Rightarrow \\ (1/n) \ln(p/B + 1) &= (V_0 - V)/V_0, \\ (V_0/n) \ln(p/B + 1) &= V_0 - V, \end{aligned}$$

то есть $V_0/n = A$, $B = B$.

Для нефти удельный объём V_0 при атмосферном давлении можно определить по плотности, однако этот параметр не является обязательным, так как по результатам расчетов [21] значение A/V_0 практически не зависит от температуры и типа углеводорода, и его величина равна 0,8939, а показатель адиабаты для нефти $n = 11,19$. Коэффициент B практически также мало зависит от давления (только при давлениях ниже 30 МПа, где сжимаемость жидкостей очень мала, прослеживается влияние p на B до температуры нормального кипения). Однако в отличие от коэффициента A параметр B зависит от температуры. Расчеты [21] показали, что характер этой зависимости подобен для всех исследованных углеводородов. Для расчета коэффициента B авторами была найдена зависимость B от удельного объёма (при 100°C) и температуры. Этим уравнением можно пользоваться до температуры $0,9 T_{кр}$ и до давления 1000 МПа для углеводородов с удельным объёмом при 100°C 1,3–1,7 см³/г. Таким образом, для нефти, плотность которой при нормальной температуре колеблется в пределах от 0,73 до 1,04 г/см³, в уравнении Тэйта при нормальных условиях установлены следующие

константы: $n = 11,19$, $B = 119,59$ – $128,33$ МПа.

Одной из основных характеристик сжимаемости среды является скорость звука. Полученное уравнение состояния нефти и известное соотношение $a^2 = \partial p / \partial \rho$ (a – скорость звука в среде; p – давление; ρ – плотность среды) позволили получить зависимость скорости звука в нефти для средних параметров: $a = [n(p_0 + B)/\rho_0]$. Для полученного ранее диапазона изменения констант B и ρ предельные значения скорости звука следующие $a_{\min} = 1300$ м/с, $a_{\max} = 1335$ м/с. Средняя скорость звука в нефти $a_{cp} = 1317$ м/с при температуре $T = 300$ К.

Полученное уравнение состояния нефти с вычисленными коэффициентами и определение скорости звука в ней позволили рассчитывать поле давлений в трубе, заполненной нефтью, при воспроизводстве электрических взрывов [21]. Для описания движения жидкости использовались соответствующая модель газовой динамики, уравнение состояния нефти, учитывались начальные и граничные условия, уравнение баланса энергии в канале разряда, уравнение движения тонкостенной цилиндрической трубы при динамическом нагружении. Решение задачи было выполнено численно, методами характеристики С.К. Годунова.

Для количества введенной за 2 мкс энергии 1 кДж через 50 мкс на расстоянии 50 мм от фокуса давление составляет 8 МПа, а через 100 мкс на расстоянии 100 мм – 6 МПа. В трубе формируется плоский ударно-волновой фронт [22–25], фактически солитон. Он движется в скважине, как в волноводе. В дальнейшем в результате прохождения солитона обсадная труба скважины будет испытывать радиальные и продольные упругие деформации. При этом продольные перемещения по своей величине будут превосходить радиальные [26]. Такие упругие деформации будут активировать ПЗП, насыщенную газосодержащей жидкостью.

Далее, примерно через 1 мс, в первом фокусе электроразрядной камеры послеразрядная полость достигает максимального радиуса около 4 см и начинает захлопывание, порождая волну разрежения, а захлопнувшись – новую волну давления с амплитудой 7 МПа. Отметим, что захлопывание её происходит в поле отраженных от жестких стенок волн сжатия, чем обеспечивается сильный кумулятивный эффект [27, 28].

По цилиндрическому волноводу волны давления–разрежения в скважине уходят к зоне продуктивного пласта, на забое скважины возникают последовательно сменяющие друг друга репрессия и депрессия. При этом в волнах разрежения на зародышах кавитации – газовых мик-

ропузырьках – возбуждается интенсивная кавитация, передающаяся в околоскважинную зону пласта. Часть образовавшихся кавитационных пузырьков может пульсировать линейно относительно своего равновесного радиуса; часть – колебаться нелинейно, возбуждая и обеспечивая так называемую «выпрямленную диффузию» растворённых в нефти газов в пузырёк; ещё какая-то часть, увеличившись до максимального радиуса, может быстро сжаться до полного захлопывания кавитационного пузырька, локально возбуждая ударные волны в узком пространстве.

Нелинейные пульсации кавитационных пузырьков вызывают появление акустических потоков [29], которые носят вихревой характер и возникают в свободном неоднородном поле вблизи препятствий, находящихся в звуковом поле. Потоки, возникающие в пограничном слое (шлихтинговское течение), уменьшают его толщину, оказывая существенное влияние на процессы массо- и теплопереноса. Они ускоряют процессы перемешивания сред, очистки загрязнённых поверхностей, дегазации жидкостей и др.

То есть кавитация обеспечивает разрушение обволакивающих частицы жидкостных плёнок и стимулирует общее газовыделение в прискважинной зоне пласта. Здесь быстро поднимается пластовое давление, которое также возобновляет общее интенсивное движение жидкости и выбрасывает закупоривающие пробки из пор и капилляров, и так далее, как показано выше.

В этом процессе комплексного воздействия на призабойную зону заметную роль может играть и гиперзвук с широким частотным диапазоном, который сопровождает каждый электровзрыв.

Ранее нами было установлено [30, 31], что акустическое излучение подводного электрического взрыва имеет широкий спектр, в котором полоса верхних частот простирается вплоть до 120 кГц. Это позволяет утверждать, что собственное акустическое излучение подводного электрического взрыва будет интенсивно резонансно возбуждать и поддерживать пульсации кавитационных пузырьков даже малых размеров – до 0,01 мм.

Представляет практический интерес исследование эффективной глубины проникновения акустических волн в пласт [32, 33]. Наиболее распространены продуктивные пласты с поровыми каналами диаметром от 2 до 20 мкм. Пласт из-за наличия сил трения между жидкостью и стенками каналов обладает естественными демпфирующими свойствами по отношению к гидродинамическим волнам, и при выборе акустического поля одним из определяющих факторов может стать эффективная глубина проникновения этих волн в породу. Рассеяние энергии колебаний за

счет внутреннего трения в жидкости (и тем более связанное с теплопроводностью) относительно невелико по сравнению с рассеянием вследствие трения о стенки каналов. Эффективная глубина проникновения ультразвуковых волн находится в пределах единиц сантиметров; нижние области звуковых волн (20–40 Гц) проникают в пласт на глубину 1–2,5 м. Непосредственно для увеличения нефтеотдачи пластов следует считать наиболее эффективными субинфразвуковые гидродинамические волны (частота – менее 0,5 Гц).

Первые два поддиапазона частот обеспечиваются непосредственно электровзрывами, а третий – субинфразвуковой (чтобы обеспечить частоту циклов вплоть до $2 \cdot 10^{-8}$ Гц) – можно осуществить режимом циклической закачки жидкости через разрядную камеру.

Согласно обстоятельным натурным исследованиям процессов акустической обработки действующих скважин сибирскими учеными [34], акустические поля являются эффективным средством увеличения фильтрационных свойств призабойной зоны скважин, увеличения работающей толщины пласта, повышения дебита скважины и производительности. В конечном счете акустическое воздействие можно использовать для решения промысловых задач – увеличения дебита добывающих скважин, вызова притока жидкости из пласта простаивающих скважин, повышения приёмистости нагнетательных скважин [34].

Технологические эффекты акустического воздействия определяются возникновением дополнительного градиента давления в пористой среде, увеличением температуропроводности пород, расформированием зон пониженной проницаемости, вызванной проникновением в пласт фильтра промывочного раствора. И действительно, по данным [34], значительно (в 1,7 раза) возрастала гидропроводность призабойной зоны пласта.

Акустическое воздействие не вызывало нарушений контакта цементного камня и в то же время создавало существенную температурную аномалию в зоне притока. Это свидетельствовало о положительном изменении гидродинамической связи скважины с продуктивным пластом.

Однако также было установлено, что чрезмерное увеличение интенсивности акустической обработки может привести к резкому увеличению излишнего содержания газа в призабойной зоне пласта и, как следствие этого, снижению дебита скважины. То есть процесс акустической обработки скважин должен быть контролируемым и регулируемым.

При электроразрядной интенсификации притока флюидов в скважину импульсной обработкой от устья необходимая регулировка может

выполняться изменением параметров электро-разрядного воздействия.

ВЫВОДЫ

На основании представленных в данном обзоре материалов о механизме импульсных методов обработки скважин можно выдвинуть следующие обоснованные гипотезы.

1. В процессах электроразрядной интенсификации притока флюидов в скважины важную роль играют импульсная кавитация и естественное газовыделение, ею инициируемое.

2. Даже слабое импульсное воздействие на пласт, насыщенный флюидами, прямо не разрушающее породу, пробуждает природные силы, высвобождающие флюиды из пластов в направлении скважин.

3. Для обработки призабойной зоны пласта источник электровзрывных волн сжатия-растяжения целесообразно размещать на устье скважины – на обсадной колонне или боковом отводе так, чтобы при осуществлении электрического взрыва в разрядной камере, в обсадной колонне, как в волноводе, к призабойной зоне пласта распространялись электровзрывные волны и гиперзвук. Такое размещение источника импульсов давления-растяжения существенно выгоднее по сравнению с погружными электроразрядными устройствами вследствие следующих причин: ось скважины может как угодно отличаться от вертикальной прямолинейной; полностью исключаются ограничения величины использованной энергии в импульсе; исключается целевая необходимость извлечения из скважины насосно-компрессорных труб; появляется практическая возможность оперативной регулировки ёмкости батареи конденсаторов; уменьшается стоимость и увеличивается универсальность применяемых конденсаторов и в целом генератора импульсных токов.

ЛИТЕРАТУРА

1. SU 969062 1977.05.03, Малюшевский П.П., Рябов В.П., Горовенко Г.Г., Бордах С.И. *Устройство для воздействия на призабойную зону скважин*.
2. Курашко Ю.И., Хвощан О.В., Литвинов В.В., Мельхер Ю.И. Электроразрядное погружное устройство для обработки нефтяных скважин с уменьшенными массогабаритными показателями. *Материалы XIII научной школы-семинара «Физика импульсных воздействий на конденсированные среды»*. Николаев, 2007, 146.
3. Сизоненко О.Н., Любимов А.Д., Денисюк О.Н. Исследование влияния профиля волны сжатия электроразряда на изменение пористости и проницаемости осадочных пород. *Физика и техника высоких давлений*. 1997, (1), 107–111.
4. Сизоненко О.Н., Барбашова Г.А., Хвощан О.В. К вопросу распространения волны напряжений в пласте при электрическом разряде в скважине. *ЭОМ*. 2003, (4), 51–56.
5. Михалюк А.В. *Торпедирование и импульсный гидроразрыв пластов*. Киев: Наукова думка, 1986. 207 с.
6. Шамко В.В., Богуславский Л.З. Математическое моделирование коронного разряда в сильных водных электролитах. *Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий. Сб. науч. трудов*. Вып.4. Николаев: Атолл, 2002. 34–44.
7. Жекул В.Г., Поклонов С.Г., Швец И.С. Электроразрядные погружные установки со стабилизированными параметрами. *Нефтяное хозяйство*. 2006, (2), 89–91.
8. Жекул В.Г., Поклонов С.Г., Смирнов А.П. Экспериментальные исследования эффективности электроразрядного воздействия на физической модели при забойной зоны продуктивного пласта. *ЭОМ*. 2011, 47(1), 101–105.
9. Жекул В.Г., Кучернюк В.А., Мельхер Ю.И., Поклонов С.Г., Смирнов А.П., Швец И.С. Электроразрядная обработка скважин на нефтедобывающих месторождениях Украины. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2012, 21, 72–77.
10. Максудов Р.А., Сизоненко О.Н., Малюшевский П.П. Использование электровзрывного воздействия на призабойную зону. *Нефтяное хозяйство*. 1985, (1), 34–35.
11. А.С. SU 1058343 1981.06.08. Малюшевский П.П., Сизоненко О.Н., Горовенко Г.Г., Максудов Р.А. *Устройство для электровзрывной обработки пласта*.
12. Roberts P., Sharma A. Low-Frequency Acoustic Stimulation of Fluid Flow in Porous Media. *J of Acoustic Society of America*. 1999, 105(2), 1385–1388.
13. Малюшевский П.П. *Основы разрядно-импульсной технологии*. К.: Наукова думка, 1983. 272 с.
14. Трофимова Л.П., Глушенко В.Ж., Жекул В.Г., Поклонов С.Г., Швец И.С. Электроразрядное возбуждение акустических импульсов в условиях скважин. *Нефтяное хозяйство*. 2003, (12), 28–31.
15. Балашканд М.И., Андреев Ю.Н., Казнин В.А. Обработка призабойной зоны пласта импульсами давления. *Нефтяное хозяйство*. 1990, (8), 71–74.
16. Малюшевский П.П., Малюшевская А.П., Левда В.И. Электровзрывная нелинейная, объёмная кавитация в технологических реакторах. Часть 1 (Электроразрядное генерирование газовой фазы – зародышей кавитации). *ЭОМ*. 2004, (1), 46–53.
17. Борткевич С.В., Вуден В.О., Костров С.А. *Гидродударная технология для повышения нефтедобычи и нефтеотдачи. Нефтегазовые технологии*. М.: Топливо и энергетика, 2005. 5–7.
18. Малюшевский П.П. О механизме тонкого измельчения материалов при электрическом

- взрыве в ограниченном объёме. *ЭОМ*. 1982, (3), 58–63.
19. RU 2278733 2006.06.27. Малюшевский П.П. (UA), Ремизов О.А. (RU) *Способ и устройство для раскалывания изделий из хрупкого и твёрдого материала*.
 20. Малюшевский П.П., Горовенко Г.Г., Ивлиев А.И., Пастухов В.Н. *Электровзрывные силовые импульсные системы*. Киев: Наукова думка, 1987. 220 с.
 21. Семко А.Н., Коломенская В.В. Расчет параметров течения при электрическом разряде нефти. Тезисы докладов VII научной школы «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах». Николаев, 1995, 142.
 22. Жекул В.Г., Поклонов С.Г., Трофимова Л.П., Швец И.С. Формирование электрического разряда в водонефтяных эмульсиях при высоких давлениях и температурах. *ЭОМ*. 2001, **207**(1), 37–43.
 23. Расторгуев Ю.Л., Ковальский В.В. Уравнение состояния Тэйта и его проверка по экспериментальным данным. *Известия вузов. Нефть и газ*. 1975, (8), 58–60.
 24. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*. М.: Наука, 1966. 688 с.
 25. Гласс И.И. *Ударные волны и человек*. М.: Мир, 1977. 192 с.
 26. Актершев С.П., Федоров А.В., Фомин В.М. Распространение солитона по трубопроводу, заполненному жидкостью. *ЖПМТФ*. 1986, (5), 58–63.
 27. Сулимов Б.К. Оптимизация кумулятивного эффекта при захлопывании электровзрывной каверны в поле внешнего переменного давления. *Тезисы докладов IV Всесоюзной научно-технической конференции «Электрический разряд в жидкости и его применение в промышленности»*. Ч.1. Николаев, 1988, 115.
 28. Сулимов Б.К., Шилин П.Е. Управление интенсивностью гидровозмущений при подводном электровзрыве. *Тезисы докладов VI науч. школы «Физика импульсных воздействий на конденсированные среды»*. Николаев, 1993, 131.
 29. *Мощные ультразвуковые поля*. Под ред. Л.Д. Розенберга. М.: Наука, 1968. 267 с.
 30. Малюшевская А.П., Катаев Н.М., Малюшевский П.П. Установление акустических характеристик подводных электрических разрядов и среды. *ЭОМ*. 1999, (6), 28–32.
 31. Малюшевская А.П., Малюшевский П.П., Смалько А.А., Тихоненко С.М. Высокочастотная составляющая акустического излучения подводного электрического разряда. *ЭОМ*. 2003, (1), 59–62.
 32. Янтурин А.Ш., Рахимкулов Р.Ш., Кагарманов Н.Ф. Выбор частот при акустическом воздействии на призабойную зону пласта. *Нефтяное хозяйство*. 1986, (12), 40–42.
 33. Кузнецов О.Л., Ефимова С.А., Жуйков Ю.Ф., Кузьмин В.А., Печков А.А., Дерягин В.В., Тараканов В.В. Акустическое воздействие на призабойную зону пласта. *Нефтяное хозяйство*. 1987, (5), 34–36.
 34. Чириков Л.И., Волков Л.Ф., Шабалинский А.Г. Применение акустических полей для обработки призабойной зоны скважин на месторождениях Западной Сибири. *Сборник трудов СибНИИИП*. Тюмень: СибНИИИП, 1990, 51–55.

Поступила 20.11.13

Summary

The review article deals with modern methods of pulse influence on the near-bottom zone of an oil-bearing bed, including the method of an electric blast. Their advantages and disadvantages in practical use are discussed. A possible physical mechanism of the effective action of a pulse cavitation and subsequent outgassing at near-bottom zones of an oil-bearing bed is considered. The result of such an action is the destruction of the blocking layer and the resumption of inflow. A rational layout is proposed of an electric discharge chamber at the heel, which becomes the waveguide of electro-explosive pressure-stretch waves to the near-bottom zone of the oil-bearing bed.

Keywords: electrical discharge, oil-bearing bed, pulse cavitation, resumption of oil flow.