

Использование вызванной акустической эмиссии коллекторов для обнаружения и извлечения углеводородов

В.В. Дрягин

ООО «Научно производственная фирма Интенсоник», Екатеринбург, Россия
E-mail: vvdryagin@mail.ru

Представлены результаты исследования сейсмоакустической эмиссии, возникающей в насыщенной пористой геологической среде при силовом акустическом воздействии на кернах и в скважинах. Показано, что волновое воздействие эффективно влияет на увеличение проницаемости относительно первоначального значения, и вызванная волновым воздействием акустическая эмиссия насыщенной пористой среды служит надежным источником информации о ее фильтрационно-емкостных свойствах.

В механизм акустической эмиссии вносит вклад градиент гидростатического давления, который создает фильтрацию флюида. При этом, чем больше проницаемость керна, тем шире полоса частот эмиссии, чем меньше проницаемость, тем более узкая полоса спектра, которая приближается к виду дискретного набора частот. Аналогичные данные получены в нефтяных пластах, где непрерывный спектр характерен для пористых песчаников терригенных коллекторов, а одиночные узкополосные спектры – для трещиноватых карбонатных коллекторов.

Принцип возбуждения в продуктивном пласте волн упругой энергии большой интенсивности и регистрации волн эмиссионного происхождения обеспечивает получение надежной информации о продуктивности пласта как в перфорированной скважине, так и в неперфорированной скважине, и может дать рекомендации по выбору интервала перфорации, а также стимулировать приток нефти из пласта.

Ключевые слова: сейсмоакустическая эмиссия, акустическое воздействие, насыщенная пористая среда, спектр вызванной акустической эмиссии, проницаемость коллектора.

Для цитирования: Дрягин В.В. (2018). Использование вызванной акустической эмиссии коллекторов для обнаружения и извлечения углеводородов. *Георесурсы*, 20(3), Ч.2, с. 246-260. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2018.3.246-260>

Исследования на кернах

Эмиссия упругой энергии в продуктивном пласте-коллекторе, который обладает смешанной насыщенностью и широким диапазоном фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС), имеет свои особенности по сравнению с сейсмоакустической эмиссией геологической среды, обусловленной ее напряженным состоянием в отсутствие насыщения. Прежде всего, это связано с наличием и свойствами внутренних источников сейсмоакустической эмиссии в этих средах. Исследованиям механизмов эмиссии в гетерогенной системе с различной насыщенностью коллектора посвящен целый ряд работ теоретического и экспериментального характера (Чеботарева, Володин, 2012; Пиковский, 2003; Володин, 2003; Руденко, 2006; Терцаги, 1961; Николаевский, Степанова, 2005; Вильчинская, Николаевский, 1984; Курленя и др., 1993; Дрягин, 2013).

Сейсмоакустическая томография нефтяной залежи, основанная на ее высоком эмиссионном потенциале и временной устойчивости процессов излучения упругой энергии, обеспечивает надежный источник информации для поиска нефти и газа. Особое значение здесь имеет изучение реакции среды на внешнее механическое воздействие и опосредованное воздействие, возникающее в самой среде под действием, так называемой вызванной сейсмоакустической эмиссии (Дрягин, 2013; Хисматуллин, 2007). Именно этот механизм является наиболее эффективным

средством локального воздействия на насыщенную среду, который может изменить эффективную проницаемость нефти и обеспечить, тем самым, повышение ее фильтрационных свойств. При этом излучение поля вызванной упругой энергии захватывает диапазон от единиц герц до десятков килогерц и зависит от структуры и состава насыщенной пористой среды.

Эмиссионные низкочастотные сигналы формируются и в сухих песках (Вильчинская, Николаевский, 1984) по мере распространения цуга колебаний от источника излучения к приемнику. При этом по мере увеличения области распространения фронта волны, увеличивается длительность и число низкочастотных колебаний в спектре акустической эмиссии. Происхождение низкочастотных колебаний связывают со значительным относительным смещением частиц в условиях их обжатия, т.е. уплотнения рыхлых песков, а в случае обжатия гранита, с началом развития трещин и развала образца на части (Воронина, Епифанов, 1980). В этом случае стадии разрушения гранита сопровождаются излучением акустической эмиссии, начиная с диапазона 1-12 кГц, появления трещин 100-800 Гц, и в конце разрушения спектр сигнала сосредоточен в диапазоне 2-50 Гц с максимумом 12,5 Гц.

В работах Николаевского (Николаевский, 1992; Николаевский, 2005) приводятся модели формирования доминантных частот в пластах, насыщенных водой и нефтью, связанных с фильтрацией и изменением фазовых проницаемостей под действием вибраций естественного или искусственного происхождения. Анализируя причины

положительного влияния слабого сейсмического воздействия на увеличение конечного коэффициента нефтеотдачи, автор указывает на механизмы формирования упругих высокочастотных колебаний в пласте за счет трений на контактах трещин и зерен.

Низкочастотные колебания в нефте- и водонасыщенном пласте наблюдались многими авторами (Беляков и др., 2004; Алексеев и др., 2004; Курленя, Сердюков, 1999; Барабанов и др., 1987; Позняков, 2005; Dangel, 2003; Engelbrecht, 1988), причем диапазон частот примерно совпадал и состоял в пределах 1,5-50 Гц в виде дискретных частот, например, 18, 20, 24 Гц и т.д.; все зависело от свойств объекта в месте проведения экспериментов. Главная особенность здесь состояла в том, что одни и те же частоты наблюдались как для нефтенасыщенного пласта, так и для водонасыщенного пласта. Конечно, все зависело от соотношения вода/нефть в пласте и его фильтрационных свойств.

Использование источников волнового воздействия (ВВ) с различными узкими параметрами воздействия и попытки объяснить механизм только в рамках этих своих параметров воздействия не позволяют оценить взаимодействие волнового поля с пористой средой в едином процессе, который охватывает широкий диапазон частот и взаимодействие между диапазонами.

В работах (Venkitaraman, 1995; Roberts, 2000; Roberts, 2005) приводятся результаты успешного использования энергии волнового поля в ультразвуковом диапазоне для удаления различного рода твердых частиц из насыщенной пористой среды.

Так, проницаемость насыщенного песчаника и известняка увеличивается в 3-7 раз после ультразвуковой обработки зерна волновым полем интенсивностью 20-250 Вт/м² на частоте 20-80 кГц (Venkitariman, 1995) при этом эффективность по глубине очистки от твердых частиц глины, грязи и фильтрата бурового раствора составляет не более 2,5 дюйма.

По результатам опытов с кернами (Roberts, 2000) воздействие акустической энергией с удельной мощностью 300-4500 Вт/м² на частоте 20 кГц позволяет эффективно удалять парафиновые и асфальтеновые отложения в пористом песчанике и восстанавливать его эффективную проницаемость до глубины 12-15 см.

В работе (Митрофанов и др., 1998) рассматриваются результаты лабораторных исследований по влиянию акустического воздействия (АВ) на фазовые проницаемости по нефти ($K_{прн}$), по воде ($K_{прв}$) и коэффициент вытеснения ($K_{вт}$) нефти водой в коллекторах терригенного типа. Опыты были поставлены с соблюдением пластовых условий и показали, что наиболее чувствительной к АВ является связанная фаза нефти, которая дольше сохраняет измененные свойства и предопределяет вязкость коллоидной УВ системы в целом. В работе отмечается, что акустическое воздействие продолжительностью 10-15 минут приводит к увеличению проницаемости по нефти на 17-40%. Эффективная вязкость нефти при этом снижается на 8-9%, а доля неподвижной фазы уменьшается в сравнении с исходной в 2 раза. Механизм этих процессов авторы связывают с перераспределением молекул УВ за счёт ослабления водородных связей. Параметры поля акустического воздействия, близки к параметрам

в предыдущих работах: удельная мощность 20000 Вт/м² на частоте 19 кГц.

Волновое воздействие в низкочастотной области 1-500 Гц имеет также многочисленные примеры увеличения подвижности многофазного флюида в коллекторах продуктивных пластов. Пример анализа результатов низкочастотного динамического воздействия в работе (Roberts, 2005) показывает обоснованность интереса в области исследования механизмов фильтрации флюидов в поровом пространстве с помощью лабораторных исследований и построения на их основе теоретических моделей. В этой работе сообщается о свойствах потока флюидов с резко различной вязкостью в поровом пространстве кернов под влиянием внешнего низкочастотного волнового поля. При этом отмечается принципиальная разница в поведении потока флюида при наложении волнового поля, а именно снижение перепада давления в керне для флюидов с малой вязкостью (декан+водный раствор) и повышение давления при движении флюида с большой вязкостью (нефть+водный раствор). Причина такого разнонаправленного поведения флюидов объясняется различным механизмом смачивания нефти и декана с поверхностью гидрофильного порового пространства керна в поле динамического волнового воздействия. В этой работе впервые показано, что низкочастотное волновое воздействие в керне также эффективно для восстановления проницаемости порового пространства, как и высокочастотное. Поскольку низкочастотное воздействие имеет большую глубину проникновения в геологическую среду, оно предпочтительней в технологическом отношении. В тоже время, в работе указывается на противоречие: с одной стороны, низкочастотное воздействие мобилизует нефть на заранее подвижной воде и тем самым увеличивает долю нефти в потоке флюида, а, с другой стороны, нефть, как более вязкая, закрывает поры, как только начинает двигаться.

В работе установлена связь механического напряжения и вызванной им деформации под действием внешнего динамического волнового воздействия с изменениями порового давления. Оценка величины этого давления не превышает 2,4 кПа при достижении порогового уровня напряжения динамического волнового воздействия амплитудой 600 кПа при котором наблюдались изменения потока флюида. Указывается также, что влияние изменений порового давления более важно для повышения порового потока, чем механические напряжения, производимые внешним воздействием.

Необходимо отметить, что изменение порового давления может произойти в результате фазовых переходов углеводородов и последующей их дегазации под действием внешнего акустического поля (Степанова, и др. 2003; Степанова, и др. 2005) на различных частотах. При этом изменение давления может составлять от 50 кПа до 1000 кПа в зависимости от газового фактора и параметров волнового воздействия.

Напряженно деформированное состояние пористой среды вызывает акустическую эмиссию (АЭ), а характер насыщения влияет на процесс накопления упругой энергии и выделения ее в виде АЭ (Хисматуллин, 2007). При этом для инициирования сигналов АЭ достаточно малого внешнего возмущения, которое по амплитуде

соизмеримо с естественным фоном АЭ в напряженно деформированном состоянии. В этой работе указывается, что керны, насыщенные нефтью, обладают максимальной величиной накопленной энергии и соответственно высокой скоростью выделения энергии, которая имеет импульсный характер. В кернах, насыщенных водой, наблюдался стабильный спад выделения энергии, при этом дисперсия сигнала АЭ в воде была как минимум в 2-3 раза меньше, чем в нефти. Эта закономерность была обнаружена и в нефтяной залежи при исследованиях в наземных и скважинных условиях (Дрягин, 2013; Графов, и др., 1998; Дрягин и др., 2005; Дрягин, 2001).

Таким образом, по целому ряду работ, связанных с изучением механизмов волнового воздействия на насыщенную пористую среду, оценка диапазона изменения порового давления может составлять 2-3 порядка. При этом указывается на существование порога давления в порах, приводящее к движению флюида, а также на механизм не установившегося его движения.

Очевидная связь эмиссионной активности насыщенной пористой среды и гидравлического давления в порах которая возникает во время волнового воздействия, требует изучения ее механизмов и количественных соотношений выделяемой упругой энергии с параметрами среды.

Для исследования процессов акустической эмиссионной активности в кернах в условиях напряжено деформированного состояния, фильтрации флюида и наложении волнового воздействия был поставлен эксперимент на установке УИК-АЭ.

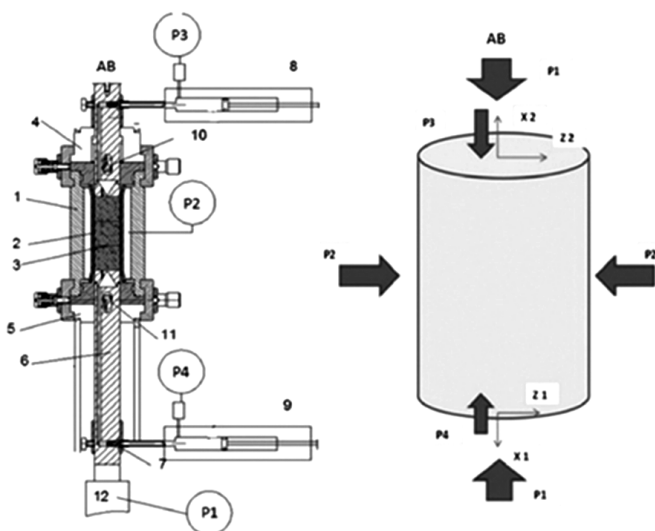


Рис. 1. Конструкция узла крепления керна, схема приложений усилий и расположения измерительных датчиков в установке УИК-АЭ. P1 – осевое давление сжатия, P2 – давление обжатия керна, P4 – давление флюида на входе керна, P3 – давление флюида на выходе керна, X1 и Z1 датчики ускорения продольных и поперечных колебаний на входе керна, X2 и Z2 датчики на выходе керна. Вход и выход керна – это условное обозначение относительно подачи насыщающего флюида. Основные узлы кернодержателя: 1 – камера высокого давления, 2 – резиновая манжета, 3 – керн, 4 и 5 – разборные элементы крепления и герметизации керна – фланцы с уплотнительными кольцами и хомутами фиксации, 6 – нижняя опора керна для передачи осевого усилия и подачи флюида, 7 – входной герметичный штуцер для ввода флюида, 8 и 9 – условное обозначение плунжерных насосов для приема (8) и подачи (9) флюида в керн, 10 и 11 – измерительные датчики акустической эмиссии.

Эксперименты проводились с образцами кернов пористого, слабо глинизированного песчаника пласта БС10(2-3) Тевлинско-Русскинского месторождения, Западная Сибирь (Чеботарева и др., 2016). Размеры составного керна: диаметр – 30 мм, длина – 90 мм. Первый образец керна (образец №1) имел параметры: пористость – $K_{no}=(20,5-21,4)\%$, проницаемость – $K_{np}=(89,31-89,99)*10^{-3} \text{ мм}^2$, второй образец №2 – $K_{no}=(16,6-16,8)\%$, $K_{np}=(8,02-10,47)*10^{-3} \text{ мм}^2$.

Схема приложения воздействующих усилий на керн и расположения измерительных датчиков показана на рис. 1.

Исследования волновых эмиссионных процессов в кернах производились в условиях максимально приближенных к пластовым давлениям. Процесс сжатия образца до давлений близких к пластовым условиям состоял из двух составляющих: первое – осевое сжатие (P1) с целью создания напряженного состояния, соответствующего горному давлению, второе – гидростатическое обжатие керна с целью создания пластового давления (P2) жидкости. Керн был предварительно насыщен остаточной водой в соответствии с отраслевыми стандартами исследования кернов. Во время подъема давления непрерывно происходила запись всех параметров давления жидкости и сигналов акустической эмиссии с соответствующей частотой дискретизации.

В основе сейсмоакустической томографии нефтяной залежи лежит высокий эмиссионный потенциал и временная неустойчивость процессов излучения упругой энергии (Хисматуллин, 2007; Николаевский, 1992; Николаевский, 2005). В механизм формирования акустической эмиссии в насыщенной пористой среде вносит вклад градиент давления, который обеспечивает фильтрацию флюида. Для изучения вклада этого явления в процесс образования АЭ был поставлен опыт на двух образцах кернов терригенного типа с различной проницаемостью из Тевлинско-Русскинского месторождения. Опыты проводились также на установке УИК-АЭ (Рис. 1), при предварительном нагружении керна осевым давлением P1 в пределах 10-21 МПа и давлением обжатия P2 33-35 Мпа. Фильтрация осуществлялась при помощи подачи жидкости на вход керна плунжерным насосом P4, в результате чего возникал перепад давления по керну $\Delta P = P4 - P3$, который устанавливался в соответствии с величиной его проницаемости (Рис. 2).

Для керна с большой проницаемостью $K_{np}=(89,31-89,99)*10^{-3} \text{ мм}^2$, рост давлений происходил быстрее и достигал предела за 4-5 секунд, в то время как для второго образца, с малой проницаемостью $K_{np}=(8,02-10,47)*10^{-3} \text{ мм}^2$, рост давления не завершился за 20 секунд наблюдения, при одинаковых условиях подачи флюида на вход керна при помощи насоса (Рис. 2б,г). На протяжении всего времени подачи флюида производилась запись сигналов акустической эмиссии при помощи датчика X2 на выходе керна (Рис. 2а, в). Зачерненная область на этих графиках после 63 секунды (Рис. 2а) и после 211 секунды на (Рис. 2в) соответствуют моменту включения акустического излучателя установленного на выходе керна.

Оказалось, что во время акустического воздействия на керн гидравлическое давление, изменяющееся в нем по постоянной составляющей, имело еще и колебательный

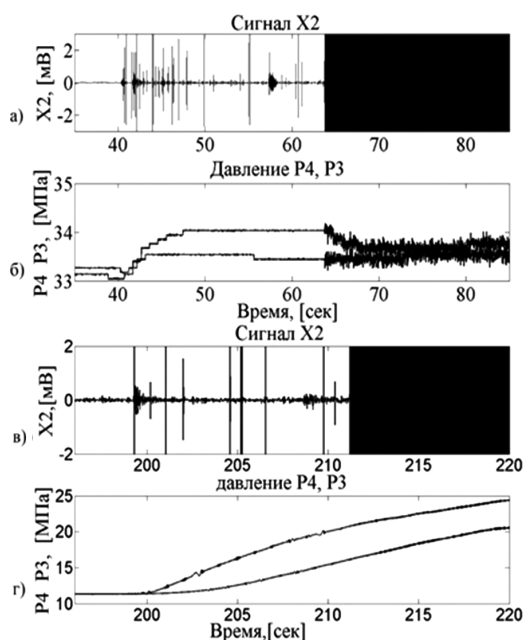


Рис. 2. Движение флюида в ядрах, влияние акустического воздействия на процесс фильтрации

характер, что и было зарегистрировано датчиками давления на входе и выходе ядра (Рис. 1). При этом вариации давления зависели от проницаемости ядра. Тренд их постоянных составляющих отражал изменения интегральных фильтрационных свойств всего ядра, которые можно оценить при помощи расчета проницаемости относительно начальной, до акустического воздействия в соответствии с законом Дарси. Но вначале необходимо рассмотреть процессы колебательного характера эмиссии и давления и сопоставить величину их энергии для разработки возможной модели физического процесса в поровом пространстве под влиянием внешнего акустического поля.

Таким полем воздействия в данных опытах служило поле излучения стержневого магнитострикционного излучателя. Излучатель соединен с волноводом, который, в свою очередь, плотно прижимается к ядру. Внутри волновода расположен канал для прокачки флюида и датчик акселерометр, расположенный в непосредственной близости к ядру.

Фильтрация в ядре существенно изменяется под влиянием внешнего волнового воздействия, что, в конечном итоге, приводит к изменению абсолютной проницаемости пористой среды для флюида любого типа, который находится в его порах. В опытах с фильтрацией (Рис. 2) была сделана оценка энергии, которая выделяется в жидкости порового пространства во время акустического воздействия, на этапе воздействия на ядро. Для вычисления плотности энергии высокочастотных колебаний давлений в ядре была использована разность $\Delta P = P_4 - P_3$. По амплитуде P_m этой разницы определялась плотность энергии, высокочастотной составляющей колебаний жидкости в зависимости от частоты. Частота при этом определялась методом Гильберта-Хуанга (Huang, 1998).

Взаимодействие волн поля упругих колебаний конечной амплитуды с поведением потока флюида в поровом пространстве на ядрах изучалось в работах (Venkitaraman, 1995; Roberts, 2000; Roberts, 2005), а также в работах (Хисматуллин, 2007; Митрофанов и др.,

1998). В лабораторных экспериментах (Roberts, 2005) было показано, что при волновом воздействии на ядро происходили связанные флуктуации порового давления. При этом оценка пульсаций порового давления составила 1,2–4,8 кПа, которого оказалось достаточно для стимулирования порового флюидопотока. Указываются основные механизмы влияния на поток, основанные на разрушении глинистых частиц и изменении смачиваемости пор флюидом под действием низкочастотных волновых колебаний от внешнего источника. Движение глинистых частиц относительно флюида или матрицы могут возникнуть если локальное поровое давление флюида будет генерироваться в поровом пространстве и составит указанную величину. Первоисточником этих пульсаций давления служила осевая стимуляция волнового воздействия от внешнего активатора с параметрами поля с порогом 600 кПа, при котором наблюдались изменения флюидопотока.

В опытах на установке УИК-АЭ использовался магнитострикционный акустический преобразователь с частотой излучения 19,3 кГц, подключенный к генератору питания, который обеспечивал удельную излучаемую мощность не менее 8 Вт/см² на торцевой поверхности ядра. При известном акустическом импедансе ядра можно оценить акустическое давление, которое развивает этот излучатель в ядре, и сопоставить параметры поля излучения активаторов в установках (Roberts, 2005) и УИК-АЭ (Табл. 1).

Прием сигналов давления, и в том и в другом случае, производился при помощи датчиков, расположенных на корпусе камеры ядеродержателя. В установке УИК-АЭ это датчики давления, установленные в канале гидросистемы в непосредственной близости к входу и выходу ядра, позволяющие регистрировать постоянную и переменную составляющую давления от 0 до 100 Гц (Рис. 2).

Вариации постоянной составляющей давлений P_4 и P_3 в образце №1 имеют более быстрый характер чем в образце №2 (Рис. 3а, в). В соответствии с законом Дарси, зная величину перепада давления по длине ядра, можно определить проницаемость в течение всего процесса АВ на ядро относительно начальной, до воздействия (Рис. 3б, г). Таким образом, для более проницаемого ядра процесс увеличения проницаемости в акустическом поле происходит за 20 секунд, достигает максимума, превышающего начальное значение в 2,5 раза, и затем снижается, возвращаясь к исходному, поскольку поддержание постоянного потока в этом опыте не производилось. Для второго образца с низкой проницаемостью рост давлений происходил значительно медленнее (Рис. 3в), и соответственно его относительная проницаемость изменяется медленнее и не достигает предельного значения за время опыта. Кроме того, изменение проницаемости носит колебательный

Источник происхождения	Установка	Установка
	Peter M. Roberts	УИК-АЭ
Параметр	Давление, кПа/Частота, Гц	Давление, кПа/Частота, Гц
Волновое воздействие	(300–1200)/(25–70)	(1800–2300)/19300
Регистрация давления	(1,2–4,8)/(25–70)	(200–500)/(4–100)

Табл. 1

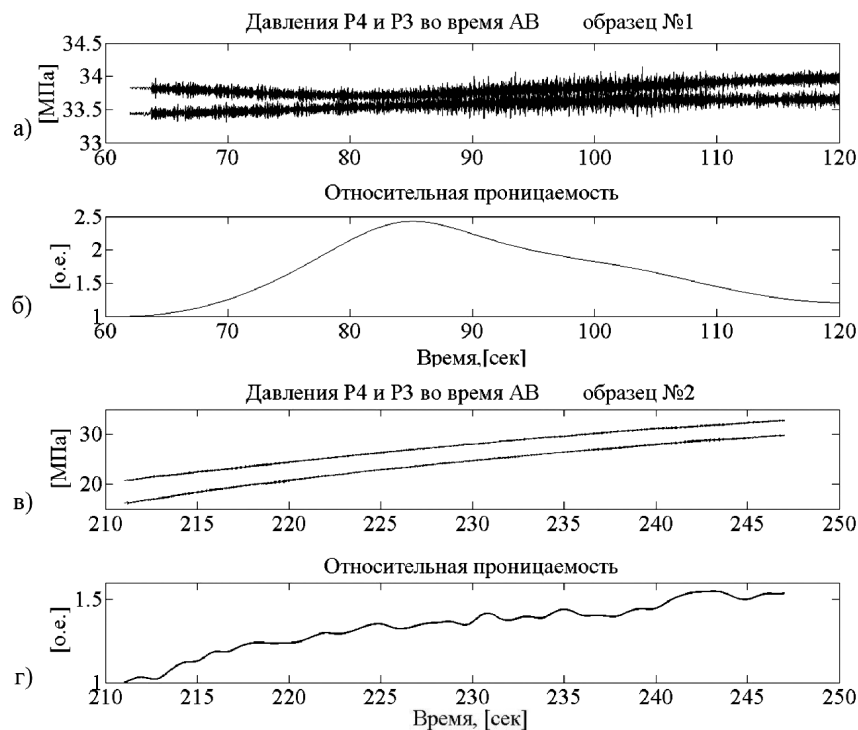


Рис. 3. Изменения относительной проницаемости кернов в процессе акустического воздействия

характер, который свидетельствует о дискретности фильтрации потока флюида в керне.

Необходимо отметить различие в результатах волнового воздействия на флюидопоток в керне. Так в работе (Roberts, 2005) показано, что низкочастотное воздействие может стимулировать поток, при этом поровое давление пульсировало под действием внешнего поля на той же частоте. В опыте на установке УИК-АЭ, волновое воздействие на высокой частоте вызывало акустическую эмиссию и вариации давления на низкой частоте, таким образом среда сама трансформирует волновое воздействие в область присущей ей низкой доминирующей частоте, что является ее свойством синхронизации процесса фильтрации. Это же отмечается в (Roberts, 2005) при том, что на условиях возбуждения волнового воздействия на частоте 25-70 Гц происходили связанные флуктуации порового давления.

Спектр сигнала акустической эмиссии в кернах в процессе фильтрации флюида до начала акустического воздействия приведен на рис. 4. Анализ спектра выполнен при помощи оконного преобразования Фурье, в скользящем окне заданной длины. Параметры преобразования подбирались оптимальным образом для выявления деталей процесса во времени, которые являются характерными данному типу коллектора. В данном случае частотный диапазон спектрограммы составлял от 50 до 20000 Гц. Спектрограмма показывает отчетливый дискретный характер набора частот в сигнале акустической эмиссии в керне на стадии подъема разности давления $\Delta P = P_4 - P_3$.

На рисунке показано изменение суммарной энергии акустической эмиссии в керне в зависимости от его проницаемости. Так в кернах малой проницаемости (8 мД) наибольший вклад в спектр энергии АЭ вносит высокочастотная составляющая, порядка 12 кГц. При этом изменение энергии во время фильтрации флюида по сравнению с фоновым значением составляет всего 2,3%. В кернах с

большой проницаемостью (89 мД) энергия АЭ распределена в широком диапазоне, начиная с десятков герц, что свидетельствует о наличии фильтрации в поровом и трещиноватом пространстве. Кроме того, динамика энергии составляет уже 101% при аналогичных условиях. В тоже время абсолютная энергия АЭ имеет противоположный характер. Так, в хорошо проницаемом керне энергия в 7-10 раз меньше, чем в более плотном образце.

Метод получения такого спектра состоит в выборе ограниченного числа спектральных линий, которые имеют максимальное значение в спектре сигнала из скользящего окна. Спектр этого сигнала имеет дискретный характер, причем значения пиковых частот подпадают под закономерность нелинейного закона распределения во всем диапазоне исследования. Таким законом может быть, к примеру, нелинейность среды с дисперсией. В этой среде происходит взаимодействие ограниченного числа волн, связанных с условиями резонанса частот и волновых векторов, т.е. с условиями синхронизма (Адронов, и др. 1981). В соответствии с теорией нелинейных систем, при взаимодействии нелинейно связанных осцилляторов возможны два варианта поведения нелинейной системы, а именно: распадная неустойчивость и слияние волн. В частности, известно взаимодействие колебаний между собой, например, в системе трех нелинейно связанных осцилляторов, которое порождает в системе колебания с комбинационными частотами. В этом случае выполняется условие резонанса частот и указывается, что может происходить обмен энергией между осцилляторами, при котором энергия возбужденного ВЧ осциллятора передается двум НЧ осцилляторам, или обратный процесс – слияние низкочастотных колебаний. Такое взаимодействие имеет, например, место в системе трёх нелинейно связанных осцилляторов, описываемой системой уравнений:

$$\ddot{x}_i + w_i^2 x_i = \mu \alpha_i x_j x_k; \quad i = 1, 2, 3; \quad j, k \neq i.$$

При малом μ – это слабо нелинейная система.

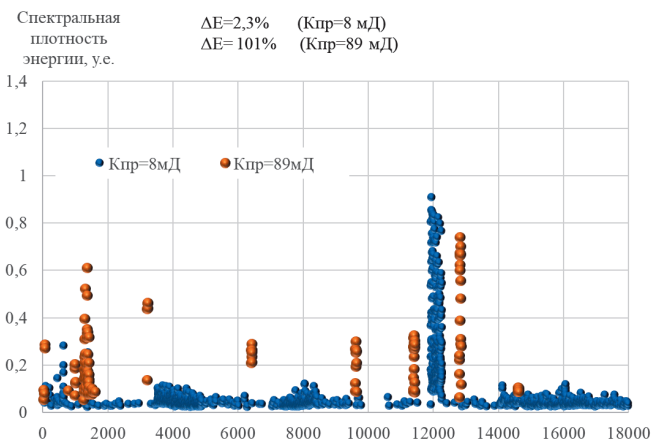


Рис. 4. Дискретный спектр акустической эмиссии в процессе фильтрации флюида (Гц)

Поведение её близко к суперпозиции квазигармонических колебаний осцилляторов с медленно меняющимися амплитудами. Благодаря нелинейной связи колебания двух осцилляторов с частот w_1 и w_2 порождают в системе колебания с комбинацией частотами w_1 и w_2 . Действие малой нелинейности накапливается, если выполнено условие резонанса частот:

$$w_1 + w_2 = w_3.$$

При деформировании песчаника, который является неоднородной средой, характерной для нефтяного коллектора, и при наложении акустического поля в нем происходит формирование волновых процессов. Возникающая при этом акустическая эмиссия представлена как дискретной, импульсной, так и непрерывной шумоподобной компонентой (Сбоев, 1988; Чеботарева и др., 2017; Чеботарева, 2016). Акустическая эмиссия связана с ускоренным движением дислокаций, выходом дислокаций на свободную поверхность и последующим образованием и развитием трещин, а также других процессов трения локальных контактов микрошероховатых поверхностей (Грешников, Дробот, 1976; Крылов, 1983; Робсман, 1996). Данные механизмы акустической эмиссии подходят для обоснования излучения в килогерцовом диапазоне частот, но они не объясняют генерацию в низкочастотном участке спектра (десятки и сотни герц). Кроме того, необходимо понимание механизма связи процессов, происходящих одновременно в высокочастотной и низкочастотной части спектра.

Одним из таких механизмов может служить механизм генерации низкочастотной ветви сейсмической эмиссии, на частотах огибающей высокочастотных колебаний элементов геосреды как результат эффекта модуляционной неустойчивости Лайтхилла. Такая составляющая эмиссии развивается в массиве горной породы при синхронном действии нелинейности и дисперсии (Володин, Чеботарева, 2014). Разница между диапазонами несущей и модуляционной волн определяется масштабным фактором дискретной среды, т.е. отношением размеров фрагментов и зоны их контактов и может достигать величины 10^4 и более. Взаимодействие высокочастотной и модуляционной волн осуществляется через режим неустойчивости – самомодуляции. Такие режимы являются предельно чувствительными к любым внешним воздействиям, в том числе и к акустическим воздействиям по данной технологии.

Такие же дискретные частоты наблюдались при анализе вызванной акустической эмиссии (ВАЭ) в скважинах.

При исследовании типов флюидальных систем осадочных нефтегазоносных бассейнов (Абукова, 1997; Сбоев, 1998), указывается, что один из них – геодинамический (ГФС) – связан с цепочкой процессов: геодинамического сжатия, повышения потенциальной энергии упругой деформации и возникновения микросейсмического шума. При этом указывается, что при внешнем упругом воздействии возникают квазирезонансные микросейсмические колебания с амплитудами в 2-3 раза превышающими амплитуды провоцирующих колебаний. Как следствие, наложение на флюидальную систему даже малых волновых воздействий, при сохранении геологической структуры, приводит к переводу части энергии деформации в высокочастотную энергию, которая влечет за собой флюидодинамические нелинейные явления.

Подтверждается действие механизма передачи упругой энергии из одного частотного диапазона в другой, отстоящие в спектре на один – три порядка, при участии энергии неограниченного источника упругой деформации локальной зоны геосреды и информационно-энергетического упругого воздействия от внешнего волнового источника.

Таким образом, установлена прямая связь насыщенности порового пространства и акустической эмиссии, причем наибольшие изменения эмиссии происходят в низкочастотной области спектра. Вероятно, эти изменения обусловлены влиянием синхронизирующего фактора флюида в механических вибрациях структуры порового пространства керна под действием внешней статической нагрузки.

В механизм акустической эмиссии вносит вклад градиент гидростатического давления, который создает фильтрацию флюида. При этом, чем больше проницаемость керна, тем шире полоса частот эмиссии, чем меньше проницаемость, тем более узкая полоса спектра, которая приближается к виду резонансной кривой. Аналогичные данные получены в нефтяных пластах, где непрерывный спектр характерен для пористых песчаников терригенных коллекторов, а одиночные узкополосные спектры – для трещиноватых карбонатных коллекторов.

Акустическая эмиссия в пористых и трещиновато-пористых проницаемых средах усиливается при насыщении и фильтрации флюида, что служит важным информативным признаком продуктивности и фильтрационных свойств коллекторов.

Внешнее волновое воздействие в равной мере эффективно влияет на увеличение проницаемости в широком диапазоне параметров волнового поля – от сейсмического (единицы герц) до ультразвукового. Так, волновое воздействие на низких и высоких частотах приводит к одинаковому количественному возрастанию относительной проницаемости на десятки и сотни процентов относительно первоначального значения.

Как наиболее вероятные, механизмы увеличения проницаемости в волновом поле (например, увеличение смачиваемости поверхности пор и ослабление водородных связей, что приводит к возрастанию подвижности флюида в порах) являются необходимым условием этого эффекта. Однако вариации внутри порового давления

несут в себе более существенную информацию о сложных механизмах движения флюида в порах и взаимодействия его с поверхностью, которые отражают волновые резонансные процессы взаимодействия потоков энергий на разномасштабных уровнях.

Таким образом, увеличение проницаемости при любых частотах внешнего воздействия, дискретность ее изменений при стационарных параметрах воздействия свидетельствуют о способности среды к синхронизации процесса фильтрации и синхронизации на много масштабных уровнях. Накопление экспериментального материала и создание моделей этих процессов является актуальной задачей физики нефтяного пласта.

Исследования в скважинах

Исследования способов детализации обнаружения остаточных запасов углеводородов при разработке месторождений методами нелинейной геофизики, основанными на изменении свойств насыщенной пористой среды под действием физических полей, получили в последнее время новые и достаточно убедительные данные. На принципе возбуждения в продуктивном пласте волн упругой энергии большой интенсивности и регистрации волн эмиссионного происхождения основана технология управления нефте-газодобычей месторождения.

Этот принцип реализован в цикле: акустическое воздействие – каротаж акустической эмиссии. Возбуждаемые волны упругой энергии способствуют запуску физико-химических процессов в пласте, приводящих к увеличению фазовой проницаемости нефти и газа, а регистрируемые упругие эмиссионные волны несут информацию о характере насыщенности и фильтрационных свойствах этих пластов, что позволяет осуществлять управляемое воздействие на продуктивную залежь.

Технические средства позволяют выполнить всю технологию за одну спускоподъемную операцию малогабаритным прибором диаметром 43 мм. Программный комплекс управления, регистрации и анализа промыслово-геофизической информации обеспечивает возможность принятия решения по оптимизации технологии в процессе ее выполнения.

На современном этапе развития этой технологии можно привести многочисленные примеры успешного ее применения на различных месторождениях страны и за рубежом. Однако главное преимущество технологии заключается в наличии возможности адаптации ее к промыслово-геофизическим условиям эксплуатации объекта воздействия в реальном времени. Результаты такого подхода к методу акустического воздействия можно показать на примере месторождений Лукоил в Пермской области и в Западной Сибири. Ранее были опубликованы материалы по результатам использования метода акустического воздействия в сочетании с полноценными гидродинамическими исследованиями (ГДИ) месторождений, которые показали его высокую эффективность (Мерсон и др., 1999; Митрофанов и др., 1998).

В (Мерсон, и др. 1999) приведены анализ возможности ультразвука в нефтедобыче и оценка причин редкого использования метода в промысловой практике. Такие причины заключаются в основном в отсутствии обоснованности выбора объектов обработки и критериев выбора

режимов акустического поля с учетом петрофизических свойств пород-коллекторов и технических параметров состояния системы «скважина-пласт» в целом. Эти выводы сделаны на основании детальных гидродинамических исследований, которые были спланированы и выполнены в цикле АВ – ГДИ (Митрофанов и др., 1998). К сожалению, подобные работы в дальнейшем, по экономическим соображениям, не были реализованы в промышленных масштабах. Это было следствием сложности и большой трудоемкости проведения ГДИ на месторождении, в том числе по причине низкого технического состояния в те времена средств контроля параметров добычи. В тоже время, материалы по исследованию фильтрационно-емкостных свойств, полученные в этой работе, дали важные параметры пласта и их изменения под влиянием АВ, которые легли в основу методики оперативного контроля технологического процесса в реальном времени.

Основные параметры пласта, опубликованные в (Митрофанов и др., 1998) и частично приведенные в (Мерсон и др., 1999), – проницаемость и гидропроводность призабойной и удаленной зоны пласта, дебит скважин, продолжительность эффекта АВ и другие. На рис. 5а, б приведены данные изменений проницаемости призабойной зоны и удаленной зоны пласта в процессе акустического воздействия для трех скважин различных месторождений. Продуктивные пласты значительно отличаются по своим фильтрационным свойствам, что отражается на результатах воздействия.

В статье (Митрофанов и др., 1998) рассматриваются результаты промысловых испытаний АВ на примере терригенных нижнекаменноугольных продуктивных отложений трёх месторождений Предуралья прогиба: Пихтовского (1), Ольховского (2) и Уньвинского (3). В пределах прогиба тульско-бобриковские отложения существенно отличаются от аналогичных образований в платформенной части. Для них характерно проявление разнообразных диагенетических процессов и битуминозности, а также низкое содержание глинистости (менее 5%). Всё это обусловило неоднородность пород по смачиваемости в сочетании с высокой нефтенасыщенностью и проницаемостью.

Методом АВ с целью повышения нефтеотдачи пластов на каждом месторождении было обработано по одной скважине. Все скважины работающие, насосные, но значительно отличаются между собой по исходным параметрам и режимам эксплуатации. О реальном изменении призабойной зоны пласта (ПЗП) и удаленной зоны пласта (УЗП) судили по гидродинамическим исследованиям, проведённым до и после АВ. Окончательным критерием эффективности АВ служили данные продолжительных промысловых наблюдений и экономический анализ.

Согласно результатам гидродинамических исследований, во всех скважинах отмечается значительное улучшение состояния одновременно призабойной и удалённой зон пласта по мощности работающих пропластков, проницаемости, гидропроводности и коэффициентам продуктивности (Рис. 5, 6). Например, в скважине №174 работающих пропластков стало 4 вместо 3, а их общая работающая толщина увеличилась с 7,8 до 10,6 м. Фильтрационные свойства особенно заметно улучшились в ПЗП. Коэффициент продуктивности

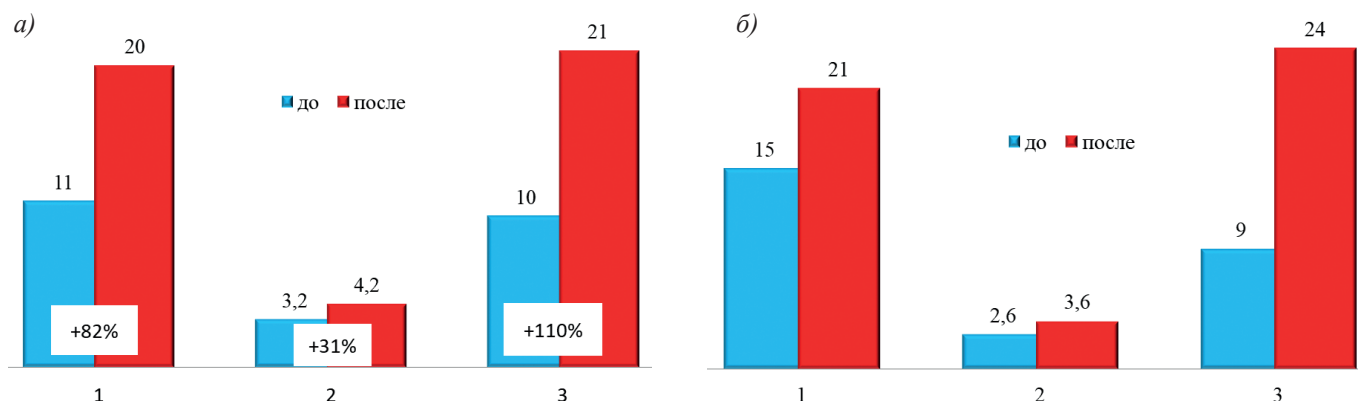


Рис. 5. Изменение проницаемости пласта в процессе акустического воздействия. а) Проницаемость призабойной зоны (мД), б) Проницаемость удаленной зоны (мД). 1 – скважина №174 Пихтовского месторождения, 2 – скважина №266 Ольховского месторождения, 3 – скважина №255 Уньвинского месторождения

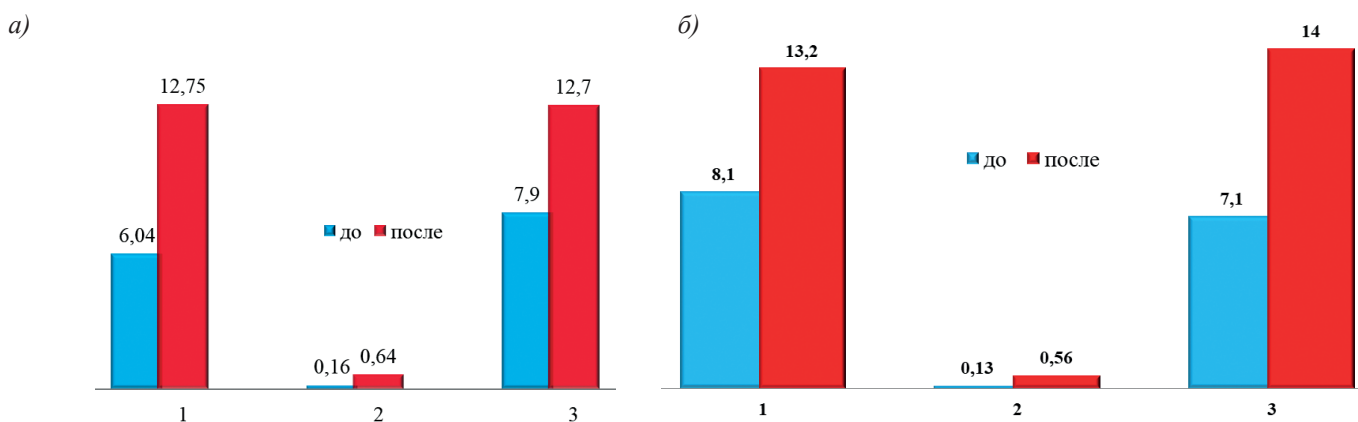


Рис. 6. а) Гидропроводность призабойной зоны пласта (мкм²·м/МПа·с), б) Гидропроводность удаленной зоны пласта (мкм²·м/МПа·с). Условные обозначения см. рис. 5.

скважины увеличился с 2,6 до 5,9 т/сут МПа (на 127 %), гидропроводность – с 6 до 12,8 мкм²см/мПа·с (на 111 %), проницаемость – с 11 до 20 мД (на 82 %). Различие между призабойной и удалённой зонами пласта нивелируется и коэффициент закупорки пласта снижается с 1,34 до 1,03.

Аналогичная тенденция изменения параметров пласта наблюдается и в остальных двух скважинах. Причём у самой низкодебитной (скважина № 266, Ольховское месторождение) относительное улучшение ПЗП происходит в большей степени. В частности, коэффициент продуктивности увеличился на 312%.

Особенности изменений основных фильтрационных параметров пласта под действием АВ – проницаемости и гидропроводности, состоят в зависимости от уровня исходной проницаемости пласта. Так, для пласта с проницаемостью менее 5 мД (скв. 266) прирост проницаемости составляет в пределах 31-38% для ПЗП и УЗП, в то время как гидропроводность такого пласта возрастает на 300-330%. Этим обусловлено значительно большее влияние АВ на увеличение его фильтрационных свойств – работающей мощности пласта (200%) и коэффициента продуктивности (312%)(Рис. 7).

Но в силу потенциально низких ФЕС пласта, прирост дебита (Рис. 8) и накопленная добыча на этой скважине (Рис. 9) естественно меньше. Однако продолжительность эффекта (13 месяцев) соизмерима с другими скважинами. Из этого следует вывод о возможности и необходимости применения метода АВ в низкопроницаемых коллекторах.

На примере скважины №174 можно говорить о конечном эффекте от АВ. Она прошла весь цикл динамики

дебитов, включая рост, стабилизацию и падение до уровня значений перед обработкой. Весь период эксплуатации скважины можно разбить на пять этапов, существенно отличающихся по среднесуточным дебитам. С 1983 г. по 1986 г. при фонтанном режиме наблюдаются максимальные дебиты – в среднем 68,2 т/сут. Далее, до 1994 г. происходит резкое падение дебита до 4,6 т/с с последующим ростом и стабилизацией на уровне 16,9 т/сут. После акустический период эксплуатации характеризуется значительным увеличением дебита, в среднем до 47,6 т/сут, или восстановлением начального на 69,8%. Повышения дебитов перед АВ (1995 г.) обусловлены обработками ПЗ пласта растворителем стабикатором или гексановой фракцией (ГФ) в сочетании с нитрилотриметилфосфоновой кислотой (ИСБ).

За весь период акустического эффекта (16 мес.) накопленная добыча нефти достигла 23,5 тыс. т., или 30,4% от суммарной за 12,6 лет эксплуатации скважины до момента АВ. Согласно прогнозным дебитам (7,9 т/сут.) она могла составить лишь 3,9 тыс. т., что обеспечивает за счёт АВ гарантированный дополнительный объём нефти в 19,6 тыс. т. (25,3 %). Обводнённость продукции в период акустического эффекта осталась неизменной – менее 1%.

Показатели акустического метода повышения нефтеотдачи выгодно отличаются от результатов после обработок растворителем стабикатором, а также ГФ в комбинации с ИСБ по максимальным и средним дебитам, дополнительной добыче и времени проявления положительного эффекта (Рис. 10, 11).

В первую очередь следует обратить внимание на самую по сравнению с другими методами длительность

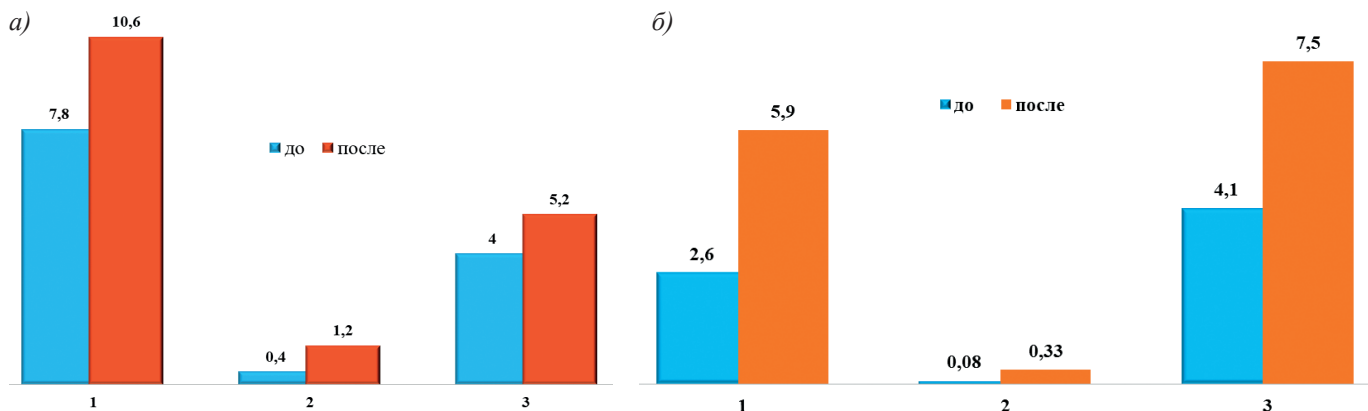


Рис. 7. а) Работающая мощность пласта (м), б) Коэффициент продуктивности (тонн/сут*МПа). Условные обозначения см. рис. 5.

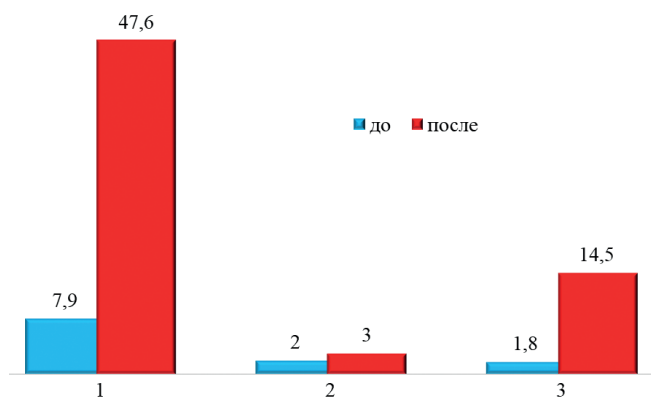


Рис. 8. Изменение среднесуточного дебита (тонн/сут.). Условные обозначения см. рис. 5.

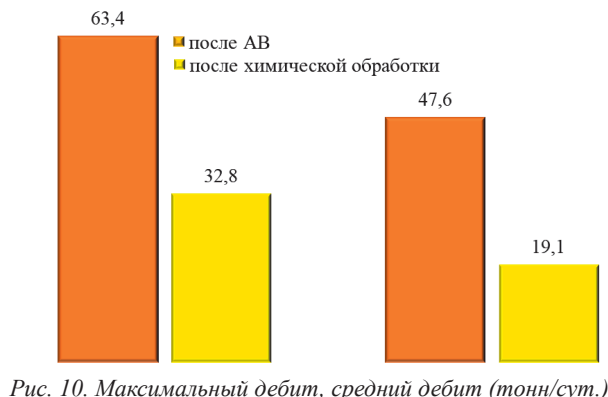


Рис. 10. Максимальный дебит, средний дебит (тонн/сут.)

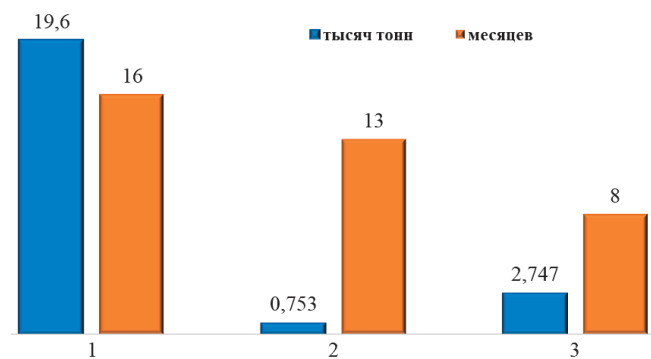


Рис. 9. Накопленная добыча (тысяч тонн), продолжительность (мес.). Условные обозначения см. рис. 5.

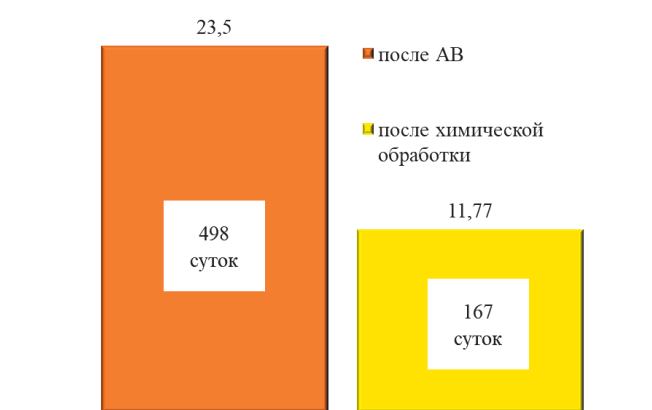


Рис. 11. Дополнительная добыча (тысяч тонн), продолжительность эффекта (сут.)

эффекта, что обусловило в конечном итоге значительное количество дополнительно добытой нефти. Эффект от стабилизатора приведен в расчёте на одну обработку, время его проявления можно принять равным 167 дней, тогда относительный эффект метода АВ будет больше на 331 день (198 %).

Существенным моментом является и то, что на всех скважинах после АВ работы по капитальному ремонту не проводились. Таким образом, по скв. 174 Пихтовского месторождения межремонтный период составил 16,6 мес., а для скв. 266 Ольховского и скв. 255 Уньвинского месторождений он будет, соответственно, более 13 и 8 мес.

Таким образом, на всех трёх скважинах высокочастотные обработки призабойных зон терригенных пластов с помощью аппаратуры ААВ310 с источниками магнитострикционного типа оказались успешными. Фактические и прогнозные данные по добыче нефти в течение длительных периодов после АВ полностью

подтверждают заключения по гидродинамическим исследованиям о существенном улучшении состояния ПЗП и свидетельствуют об эффективности проведённых работ по повышению нефтеотдачи.

Приведенный в данной работе метод гидродинамических исследований является всеобъемлющим по качеству и полноте оценки эффективности результатов АВ, но в тоже время трудоемким и дорогостоящим для регулярного использования совместно с акустическим воздействием, которое выполняется малогабаритным прибором по технологии геофизических исследований. Поэтому был разработан метод контроля, основанный на исследовании упругой энергии, ее параметров и свойств в зависимости от изменений состояния фильтрационно-емкостных свойств пласта в процессе АВ. В основе этого метода лежит изучение эмиссии упругой энергии в пласте, обусловленной естественными процессами и вызванными различными видами искусственного воздействия, в

том числе акустическим воздействием (Дрягин, 2001). Эмиссия упругой энергии представляет собой процесс излучения упругих волн в геологической среде в широком диапазоне частот, от единиц герц до ультразвука. Такое излучение или сейсмоакустическая эмиссия (САЭ) претерпевает значительные изменения в насыщенной пористой среде, подвергнутой воздействию от внешнего источника упругих колебаний большой интенсивности. При этом, параметры воздействия также могут варьироваться в широких пределах – от вибросейсмических наземных источников до скважинных ультразвуковых источников. Особенностью, вызванной САЭ, является зависимость от изменений фильтрационно-емкостных свойств насыщенной пористой среды под влиянием акустического воздействия на продуктивный пласт. Результаты промысловых испытаний акустического воздействия при помощи аппаратуры ААВ400, в которой было выполнено объединение двух функций – излучение мощного акустического поля и прием слабых эмиссионных сигналов в скважине в течение одного технологического цикла, позволило получить новую качественную информацию об энергетических процессах в коллекторах и их связи с наличием и извлечением нефти (Дрягин и др., 2005; Дрягин и др., 2014).

Излучение акустического поля и прием сигналов САЭ производится устройствами, расположенными в одном скважинном геофизическом приборе, который может перемещаться по стволу скважины в процессе исследований с заданным алгоритмом работы аппаратуры. Энергия акустической эмиссии, которая выделяется в процессе акустического воздействия, определялась методом вычисления спектральной плотности энергии во всем регистрируемом диапазоне частот – от единиц герц до 20 кГц. В дальнейшем данные обрабатывались программой Интенграф. На рис. 12 показан пример комплексного анализа сигнала акустической эмиссии в продуктивном пласте БС10 Тевлино-Русскинского месторождения (Западная Сибирь) в процессе акустического воздействия.

На рисунке 12а приведены диаграммы, которые получают в процессе выполнения технологии каротажа акустической эмиссии совместно с акустическим воздействием в скважине. Каротажная спектрограмма строится в реальном времени по мере продвижения прибора при измерении естественного фона сейсмоакустической эмиссии и затем в процессе выполнения цикла: акустическое воздействие – измерение акустической эмиссии для каждой точки с шагом 0,5 метра. На каротажной диаграмме приведены графики энергии сигналов акустической эмиссии до и после акустического воздействия, а также разницы энергии в процентах относительно фона. На рисунке 12б приведен сигнал акустической эмиссии и его временная спектрограмма, которую также можно просматривать в процессе выполнения каротажа. На рисунке 12в приведен пример спектра сигнала акустической эмиссии на глубине 2845 м до и после акустического воздействия. Спектр рассчитывался по специальной программе в скользящем окне с выделением главных частот. Также как и на кернах, отчетливо выделяются дискретные частоты и их динамика в процессе акустического воздействия.

Неоднородность фильтрационно-емкостных свойств пласта по разрезу скважины отражается в графиках энергии сигнала акустической эмиссии, которая измерена в

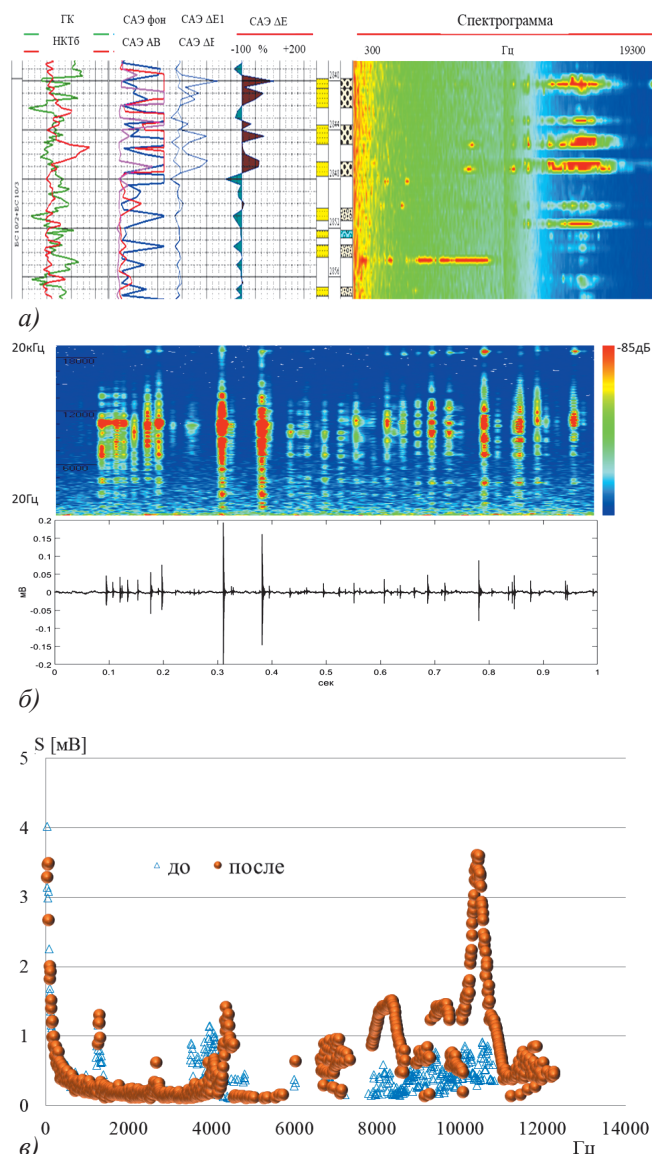


Рис. 12. Анализ эмиссии в процессе АВ

процентах относительно фонового значения, а также в виде каротажной спектрограммы. Поскольку каротаж САЭ был выполнен до перфорации скважины, эмиссия, вызванная воздействием, показывает только потенциально нефтенасыщенные интервалы пласта. Нижний интервал в подошве пласта (2846-2847) также имеет положительную динамику АЭ, однако не был включен в состав перфорации скважины, возможно из опасения его заводнения. Вероятно, его следовало приобщить к разработке, что могло увеличить продуктивность скважины. Тем не менее, скважина, перфорированная в указанном интервале, дала дебит 48 т/сут, при обводненности продукции 2%, (Табл. 2).

В среднем увеличение сигнала САЭ после АВ составляет несколько десятков процентов в пласте, насыщенном нефтью относительно фонового уровня. В то же время отдельные события акустической эмиссии в виде единичных действий источников эмиссии происходят случайным образом и имеют характерные параметры импульсов сигнала конечной длительности определенной формы. При этом отмечено наличие доминирующих частот с определенным максимальным значением энергии и частоты заполнения.

По результатам геолого-геофизической информации

промысловых испытаний на приток нефти из этих пластов и сопоставления с данными каротажа сейсмоакустической эмиссии (КСАЭ) установлена связь параметров эмиссии с типом его коллектора. Продуктивность определяется поровыми и трещиноватыми типами коллекторов, которые различным образом выделяются по доминирующим частотам и динамике их энергии после акустического воздействия. Коллекторы с проницаемостью 2-12 мД порового типа обладают доминантными частотами (6-9 кГц) и имеют прирост 30-40% энергии САЭ относительно фоновой. При испытаниях на приток в двух таких скважинах они обеспечили дебит порядка 40 тонн в сутки нефтью с обводненностью, не превышающей 2% (Табл. 2). Аналогичные испытания коллектора с проницаемостью 221-444 мД показали дебит 40 тонн в сутки, при этом параметры акустической эмиссии составили: доминирующая частота – 10-12 кГц, прирост энергии АЭ – 180% относительно фоновой. Для этих коллекторов характерно проявление второго диапазона доминантных частот в области (2-4 кГц) с динамикой в 2-3 раза меньшей, чем предыдущая частота. Изменение активности эмиссии по разрезу пласта носит резко неоднородный характер, что свидетельствует о сильной неоднородности пласта-коллектора в отношении его фильтрационно-емкостных свойств.

Аналогичный результат был получен на скважине №XXX7, которая также вскрыла пласт БС10 на Тевлинско-Русскинском месторождении (Табл. 2). На рис. 13 приведены данные по энергии эмиссии, а также по проницаемости и электропроводности пласта, которые были получены по результатам исследования открытого ствола скважины. Ситуация в этой скважине близка к предыдущей скважине. Верхняя часть пласта в интервале 2518-2522 м обладает повышенным сопротивлением, проницаемостью и эмиссионной энергией. Ниже глубины 2522 м эмиссионная активность, вызванная воздействием, резко падает, что свидетельствует о заводнении пласта, этому фактору соответствует и малое

электросопротивление. Причем в интервале 2525-2528 м по данным окончательного каротажа проницаемость имеет аномально высокую величину, порядка 380 мД, при этом методы акустической эмиссии и электропроводности указывают на его насыщенность водой. Перфорация произведена в интервале 2518-2520 м, приток нефти составил 41 т/сут. с обводненностью 2%.

Водонасыщенный пласт приведен на примере исследования скважины №XXX6 месторождения Дружное, Западная Сибирь. Здесь прослеживается отрицательная динамика вызванной акустической эмиссии после акустического воздействия, что отражается на диаграммах ГИС (Табл. 2). Результаты испытаний показали приток жидкости с дебитом 54 т/сут. с обводненностью 97%. В этой скважине была выполнена технология гидроразрыва пласта, что способствовало получению большого дебита, однако неучет характера текущего насыщения пласта привел практически полному заводнению продукции.

Использование метода на коллекторах карбонатного типа показано на примере месторождения Алибекмола, нефтегазоносность которого связана с подсолевыми каменноугольными отложениями и приурочены к ним двумя продуктивными толщами КТ-I и КТ-II, разделенными межкарбонатной толщей пород (МКТ).

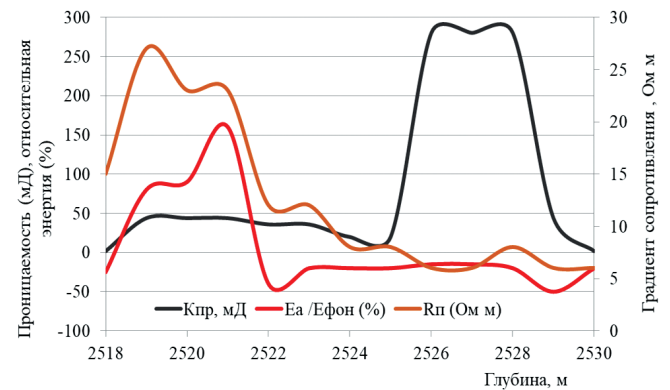


Рис. 13. ГИС и энергия САЭ

Месторождение	Интервал	Заключение о насыщенности		Результаты испытаний		Диаграммы ГИС/КСАЭ
		ГИС	КСАЭ	Дебит/Кводы		
Тевлинско-Русскинское	исследования / перфорации					
БС10/2-БС10/3	2838-2858 м	Нефть	Нефть	48 т/с	2%	
№XXX5	2840-2845 м					
Тевлино-Русскинское		Нефть	Нефть	41 т/с	2%	
БС10/2-БС10/3	2518-2538 м					
№XXX7	2518-2520 м					
Дружное	2941-2976 м	Нефть	Вода	54 т/с	97%	
ЮС1	2945-2952 м					
№XXX6	+ ГРП					

Табл. 2

Для исследования текущей нефтенасыщенности и стимулирования добычи нефти из продуктивных пластов на месторождении был применен метод каротажа сейсмо-акустической эмиссии в цикле с одновременным акустическим воздействием на призабойную зону в скважине.

Работы по технологии вызванной САЭ, проведенные на скважине №54 месторождения Алибекмола, проводились на интервалах глубин 3158-3378 м, что соответствует нефтяной залежи, приуроченной к отложениям нижней карбонатной толще КТ-II с отложениями верхневизейско-каширского возраста, и литологически представлена преимущественно известняками с прослоями зеленовато-серых аргиллитов.

Исследуемый нами интервал в скважине относится к продуктивному пласту КТ-II-П-4, нефтенасыщенность которого выявлена по ГИС, при этом вскрытая эффективная нефтенасыщенная толщина составляет 18,9 м, а эффективная водонасыщенная толщина составляет до 33,4 м. Условно водонефтяной контакт для этого блока принят на абсолютной отметке -3324,8 м. На дату проведения исследований САЭ в скважине, которые проводились дважды в 2003 г. с интервалом два месяца, параметры добычи нефти по основным интервалам представлены в табл. 3.

Общая характеристика работы скважины на этот период определяется как не стабильная на штуцере 7 мм с наиболее интенсивно работающими интервалами 3262,2-3268 м, 3210,1-3216 м и 3160-3163,1 м. На штуцере 9 мм режим работы скважины стал установившимся за счет работы нижних интервалов, при этом произошло перераспределение отдачи флюида по работающим интервалам, например, заработал интервал 3280,9-3303,3 м с дебитом 87 м³/сут., что составило 36% от общего притока. На штуцере 11 мм также была отмечена интенсификация работы нижних интервалов, но кроме того резко увеличился дебит из интервала 3210,1-3216 м – 139,57 м³/сут.

Акустическая эмиссия после акустического воздействия увеличилась в работающих интервалах пропорционально увеличению притока флюида из них. При этом сигнал эмиссии существует в интервалах до АВ, но после изменяется по форме и местоположению. Производительность работы скважины значительно увеличивалась непосредственно в процессе акустического воздействия. Воздействие проводили последовательно по всем интервалам перфорации, начиная с верхних, при этом давление на устье возросло с 4 Мпа до 9 Мпа к моменту завершения работ в нижних интервалах перфорации. Также, как и во время испытаний, при увеличении размера штуцера произошел захват воды из пластов, о чем свидетельствовал интенсивный выброс воды, который привел к гашению факела попутного газа. На рис. 14 приведена каротажная спектрограмма акустической эмиссии в процессе акустического воздействия. Само акустическое воздействие составляло облучение силовым акустическим полем продолжительностью не менее 2 минут на метр интервала пласта. При этом воздействию подвергались также интервалы за пределами перфорации.

На рис. 15 приведены спектры акустической эмиссии до и после акустического воздействия в точках остановки прибора, причем точка записи 3264 м находится внутри интервала перфорации, а точка 3327 м – в неперфорированном интервале. Поскольку сигнал эмиссии вне интервала перфорации имеет такую же большую динамику, как и в продуктивном интервале перфорации, можно утверждать, что этот интервал также обладает потенциалом нефтеотдачи.

Нелинейные свойства карбонатной среды также нашли свое отражение в виде дискретных частот аналогично полученным для терригенных коллекторов на кернах и в скважинах.

Интервал перф-и,	Дебит			Динамика САЭ после АВ в % от фона		Работающие интервалы, м	
	(м ³ /сут) -- (% от общ.)						
м	при штуцере			07.04.2003	01.06.2003	07.04.2003	01.06.2003
	7	9	11				
3210-3216	32.8 -- 24.5%	18 -- 7.6%	139.6 -- 38.5%	18	-140	3212,5-3214	3208-3218
3233-3235	0	0	0	-17	-20	3223,5-3234	3232-3235
3262-3268	29.8 -- 22.3%	18.1--	4.4 --	-15	-10	3261-3262	3260-3264
		7.6%	1.2%				
3280-3306	1.6 --	87.2 --	82.2 --	11,6	2	3280-3282	3280-3306
	1.2%	36.5%	22.7%	10,8		3284-3286	
					-10		3292-3294
				4,9		3299-3300	
				11,3		3300-3302	
3320-3326	18.2 --	25.3 --	12.8 --	-26	4,3	3320-3322	3320-3322
	13.6%	10.6%	3.5%				

Табл. 3

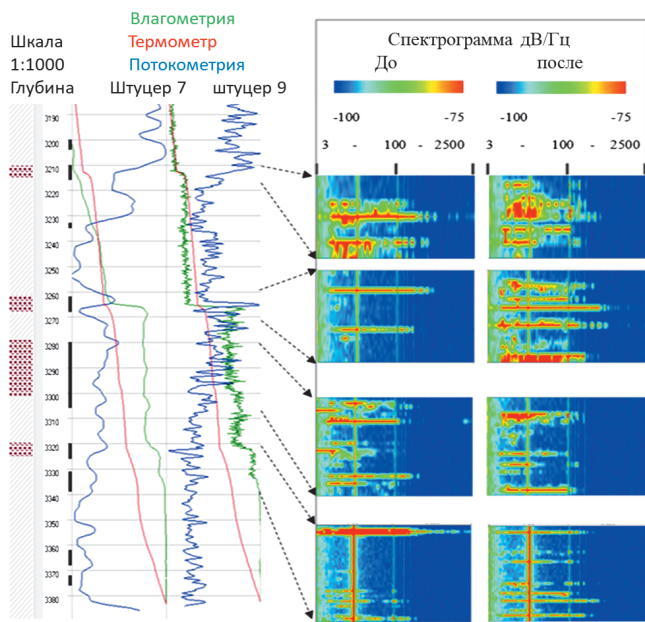


Рис. 14. Месторождение Алибекмола, скважина №54

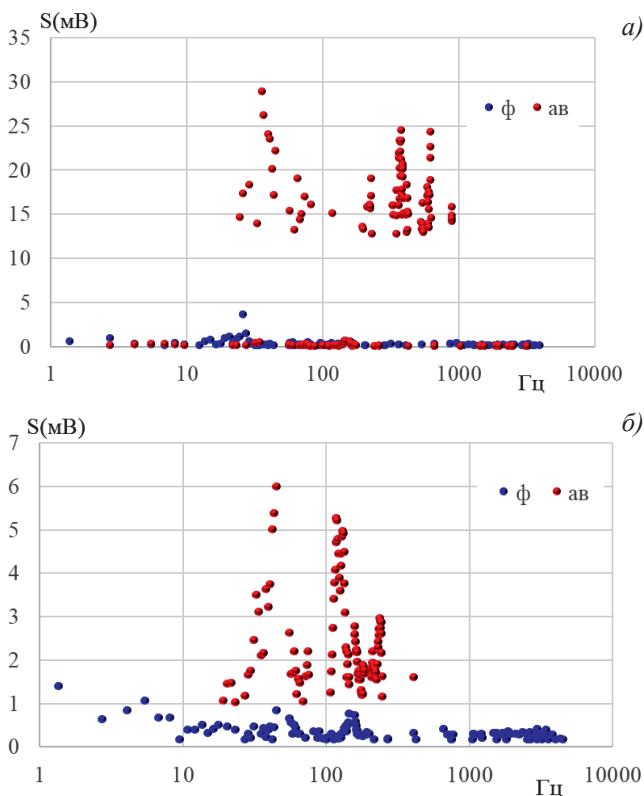


Рис. 15. Спектры акустической эмиссии в процессе акустического воздействия в двух точках исследуемого интервала. а) Спектр АЭ на глубине 3264 м, б) Спектр АЭ на глубине 3327 м. Ф – фоновая запись акустической эмиссии до начала акустического воздействия, АВ – акустическая эмиссия после воздействия.

Таким образом, принцип возбуждения в продуктивном пласте волн упругой энергии большой интенсивности и регистрации волн эмиссионного происхождения обеспечивает получение надежной информации о текущей насыщенности продуктивного пласта в неперфорированной скважине и может дать рекомендации по выбору интервала перфорации и стимулировать приток нефти из пласта.

Выводы

Упругая энергия пласта коллектора, насыщенного нефтью и газом, является надежным информационным параметром его продуктивности.

Каротаж ВАЭ позволяет выделять коллектора в терригенных и карбонатных отложениях, уточнять геологическое строение залежей.

Технология позволяет проводить реконструкцию нефтегазовых резервуаров, определять тип флюидонасыщения и давать оценку емкостных параметров коллектора в условиях высокой расчлененности и неоднородности по проницаемости.

Рассмотренные технологические решения смогут обеспечить необходимой информацией для подбора наиболее оптимальной схемы разработки залежей, повышения коэффициента извлечения нефти.

Технология выполняется малогабаритным зондом диаметром 43 мм и выполняется за одну спуско-подъемную операцию при помощи программно-аппаратного комплекса MSAE 100 разработки НПФ Интенсоник.

Литература

Абукова Л.А. (1997). Основные типы флюидных систем осадочных нефтегазоносных бассейнов. *Геология нефти и газа*, 9, с. 25-29.

Адронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. (1981). Теория колебаний. Москва: Наука, 916 с.

Алексеев А.С., Геца Н.И., Глинский Б.М. и др. (2004). Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. Новосибирск: Изд-во ИВМ и МГ СО РАН.

Барабанов В.Л., Гриневский А.О., Кисин И.Г., Николаев А.В. (1987). О некоторых эффектах вибрационного сейсмического воздействия на водонасыщенную среду сопоставление их с эффектами удаленных землетрясений. *ДАН*, 297(1), с. 52-56.

Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В. (2004). Акустический резонанс нефтяной залежи. *ДАН Геофизика*, 397(1), с. 101-102.

Вильчинская Н.А., Николаевский В.Н. (1984). Акустическая эмиссия и спектр сейсмических сигналов. *Известия АН СССР. Сер. Физика Земли*, 5, с. 91-100.

Володин И.А. (2003). Нелинейность и многомасштабность в сейсмоакустике. *Проблемы геофизики XXI века*, кн. 2, Москва: Наука, с. 5-36.

Володин И.А., Чеботарева И.Я. (2014). Сейсмическая эмиссия в зонах техногенных воздействий. *Акустический журнал*, 60(5), с. 505-517.

Воронина И.Ю., Епифанов В.П. (1980). Акустические исследования структурных изменений гранита при осевом сжатии. *Акустический журнал*, 26(3), с. 371-376.

Графов Б.М., Арутюнов С.Л., Казаринов В.Е., Кузнецов О.Л., Сиротинский Ю.В., Сунцов А.Е. (1998). Анализ геоакустического излучения нефтегазовой залежи при использовании технологии АНЧАР. *Геофизика*, 5, с. 24-28.

Грешников В.А., Дробот Ю.Б. (1976). Акустическая эмиссия. Москва: Изд-во стандартов, 272 с.

Дрягин В.В. (2001). Способ определения характера насыщенности коллектора. Патент РФ № 2187636 от 21.02.2001.

Дрягин В.В. (2013). Сейсмоакустическая эмиссия нефтепродуктивного пласта. *Акустический журнал*, 59(6), с. 744-751.

Дрягин В.В., Иванов Д.Б., Нигматуллин Д.Ф., Шумилов А.В. (2014). Сейсмоакустическая эмиссия продуктивного пласта в технологии обнаружения и извлечения углеводородов. *Геофизика*, 4, с. 54-59.

Дрягин В.В., Кузнецов О.Л., Стародубцев А.А., Рок В.Е. (2005). Поиск углеводородов методом вызванной сейсмоакустической эмиссии в скважинах. *Акустический журнал*, 51, прил. 1, с. 66-73.

Крылов В.М. (1983). Об излучении звука развивающимися трещинами. *Акустический журнал*, 29(6), с. 790-798.

Курленя М.В., Опарин В.Н., Востриков В.И. (1993). О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа Vμ. *Доклады академии наук*, 333(4), с. 515-521.

Курленя М.В., Сердюков С.В. (1999). Низкочастотные резонансы сейсмической люминесценции горных пород в вибротомографическом поле малой энергии. *ФТПРПИ*, 1, с. 3-7.

Мерсон М., Митрофанов В., Сафин Д. (1999). Возможности ультразвука в нефтедобыче. *Нефть России*, 1, с. 17-23.

Митрофанов В.П., Дзюбенко А.И., Нечаева Н.Ю., Дрягин В.В. (1998). Результаты промысловых испытаний акустического воздействия на призабойную зону пласта. *Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений*, 10, с. 29-35.

Митрофанов В.П., Терентьев Б.М., Злобин А.А. (1998). Петрофизическое обоснование акустического стимулирования процессов вытеснения нефти водой. *Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений*, 9, с. 22-27.

Николаевский В.Н. (1992). Вибрации горных массивов и конечная нефтеотдача пласта. *Механика жидкости и газа*, 5, с. 110-119.

Николаевский В.Н. (2005). Сейсмовибрационный метод оживления нефтегазового обводненного пласта. *Геофизические исследования*, 1, с. 37-47.

Николаевский В.Н., Степанова Г.С. (2005). Нелинейная сейсмика и акустическое воздействие на нефтеотдачу пласта. *Акустический журнал*, Вып. «Геоакустика», 51, с. 150-159.

Пиковский М., Розенблум М., Куртс Ю. (2003). Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. Москва: Техносфера, 496 с.

Позняков В.А. (2005). Интенсивность рассеянных волн-новы сейсмический атрибут для прогноза фильтрационно-емкостных свойств нефтенасыщенного коллектора. *ДАН Геофизика*, 404(1), с. 105-108.

Робсман В.А. (1996). Нелинейная трансформация вероятностных распределений сигналов акустической эмиссии при эволюции ансамбля дефектов в твердом теле. *Акустический журнал*, 42(6), с. 846-852.

Руденко О.В. (2006). Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики. *УФН*, 176(1), с. 77-95.

Сбоев В.М. (1988). Исследование микросейсмических процессов, возникающих в массиве горных пород подземных рудников. Новосибирск, с. 71. (Препринт/Институт горного дела СО АН СССР. №25)

Степанова Г.С., Ненартович Т.Л., Ягодов Г.Н. (2005). Сравнительный анализ влияния мощности акустического воздействия на разгазирование модели нефти. *Технологии повышения нефтеотдачи пластов: Сборник научных трудов*, 133, с. 107-116.

Степанова Г.С., Ягодов Г.Н., Ненартович Т.Л., Николаевский В.Н. (2003). Влияние ультразвуковых колебаний на процесс разгазирования нефти. *Бурение и нефть*, 7-8, с. 36-38.

Терцаги К. (1961). Теория механики грунтов. Пер. с нем. Изд. Москва: Госстройиздат, 507 с.

Хисматуллин Р.К. (2007). Динамика напряженно-деформированного

состояния горной породы при разных типах насыщенности. *Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия*, 9/1(59), с. 232-241.

Чеботарева И.Я., Володин И.А., Дрягин В.В. (2016). Генерация низкочастотной ветви акустической эмиссии в горных породах под воздействием. *ДАН*, 468(2), с. 205-208.

Чеботарева И.Я., Володин И.А., Дрягин В.В. (2017). Акустические эффекты при деформировании структурно неоднородных сред. *Акустический журнал*, 63(1), с. 84-93.

Чеботарева И.Я., Володин И.А. (2012). Образы процесса гидроразрыва пласта в сейсмическом шуме. *Доклады РАН*, 444(2), с. 202-207.

Dangel S., Schaerpmann M.E. et al. (2003). Phenomenology of tremor – like signals observed over hydrocarbon reservoirs. *J. Volcanology and Geothermal Res.* 128, pp. 135-158.

Engelbrecht J., Khamidullin Y. (1988). On the possible amplification of nonlinear seismic waves. *Phys. Earth Planet. Inter.* 50(1), pp. 39-45.

Huang N. E., Shen Z., Long S. R., Wu M. C., Shih H. H., Zheng Q., Yen N.-C., Tung C. C., and Liu H.H. (1998). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 454, pp. 903-995.

Roberts P.M. (2005). Laboratory Observations of Porous Fluid-Flow Behavior in Berea Sandstone Induced by Low-Frequency Dynamic Stress Stimulation. *Acoust. Phys.*, 51(Suppl. 1), pp. S140-S148. <https://doi.org/10.1134/1.2133962>.

Roberts P.M., Venkitaraman A., Sharma M. M., (2000). Ultrasonic Removal of Organic Deposits and Polymer Induced Formation Damage, *SPE Drill Completion*, 15(1), pp. 19-24. <https://doi.org/10.2118/62046-PA>

Venkitaraman A., Roberts P. M., Sharma M. M. (1995). Ultrasonic Removal of Near-Wellbore Damage Caused by Fines and Mud Solids. *SPE Drill Completion*, 10(3), pp. 193-197.

Сведения об авторе

Вениамин Викторович Дрягин – канд. тех. наук, директор, ООО «Научно производственная фирма Интенсоник» Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена 100, оф. 104. E-mail: vvdryagin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27.06.2018;

Принята к публикации 01.08.2018; Опубликовано 30.08.2018

IN ENGLISH

Use of induced acoustic emission of reservoirs for the detection and recovery of hydrocarbons

V.V. Dryagin

Research and Production Company Intensonic LLC, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. The results of a study of seismoacoustic emission appearing in a saturated porous geological environment with forced acoustic impact on cores and in wells are presented. It is shown that the wave action effectively influences the increase in permeability relative to the initial value and the acoustic emission of a saturated porous medium caused by the wave action serves as a reliable source of information on its reservoir properties.

The hydrostatic pressure gradient contributes to the acoustic emission mechanism, which creates fluid filtration. In this case, the greater the core permeability, the wider the emission frequency band, the smaller the permeability, the narrower the band of the spectrum, which approaches the form of a discrete set of frequencies. Similar data were obtained in oil reservoirs, where a continuous spectrum is characteristic of porous sandstones of terrigenous reservoirs, and single narrow-band spectra, for fractured carbonate reservoirs.

The principle of excitation of high-intensity waves of elastic energy and registration of waves of emission origin in the reservoir provides reliable information on reservoir

productivity in both perforated well and non-perforated well, and can give recommendations on the selection of the perforation interval and also stimulate the inflow of oil from the reservoir.

Keywords: seismoacoustic emission, acoustic impact, saturated porous medium, spectrum of induced acoustic emission, reservoir permeability.

Recommended citation: Dryagin V.V. (2018). Use of induced acoustic emission of reservoirs for the detection and recovery of hydrocarbons. *Georesursy = Georesources*, 20(3), Part 2, pp. 246-260. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2018.3.246-260>

References

Abukova L.A. (1997). The main types of fluid systems of sedimentary oil and gas basins. *Geologiya nefi i gaza = Oil and Gas Geology*, 9, pp. 25-29. (In Russ.)

Adronov A.A., Vitt A.A., Khaikin S.E. (1981). Theory of oscillations. Moscow: Nauka, 916 p. (In Russ.)

Alekseev A.S., Geza N.I., Glinskii B.M. et al. (2004). Active seismology

with powerful vibrational sources. Novosibirsk: IVM and MG SO RAN. (In Russ.)

Barabanov V.L., Grinevskii A.O., Kisin I.G., Nikolaev A.V. (1987). On some effects of the vibrational seismic impact on the water-saturated medium, their comparison with the effects of remote earthquakes. *DAN*, 297(1), pp. 52-56. (In Russ.)

Belyakov A.S., Lavrov V.S., Nikolaev A.V. (2004). Acoustic resonance of an oil deposit. *DAN Geophysics*, 397(1), pp. 101-102. (In Russ.)

Chebotaeva I.Ya., Volodin I.A., Dryagin V.V. (2016). Generation of a low-frequency branch of acoustic emission in rocks under the influence. *DAN*, 468(2), pp. 205-208. (In Russ.)

Chebotaeva I.Ya., Volodin I.A., Dryagin V.V. (2017). Acoustic effects in the deformation of structurally inhomogeneous media. *Akusticheskii zhurnal = Acoustic journal*, 63(1), pp.84-93. (In Russ.)

Chebotaeva I.Ya., Volodin. I.A. (2012). Images of the hydraulic fracturing process in seismic noise. *Doklady RAN*, 444(2), pp. 202-207. (In Russ.)

Dangel S., Schaepman M.E. et al. (2003). Phenomenology of tremor – like signals observed over hydrocarbon reservoirs. *J. Volcanology and Geothermal Res*, 128, pp. 135-158.

Dryagin V.V. (2001). A method for determining the character of the reservoir saturation. *Patent RF*, No. 2187636. (In Russ.)

Dryagin V.V. (2013). Seismoakusticheskaya emissiya nefteproduktivnogo plasta [Seismoacoustic emission of an oil-producing bed]. *Akusticheskii zhurnal = Acoustic journal*, 59(6), pp. 744-751. (In Russ.)

Dryagin V.V., Ivanov D.B., Nigmatullin D.F., Shumilov A.V. (2014). Seismic-acoustic emission of producing formation in detection and extraction technology. *Geofizika = Geophysics*, 4, pp. 54-59. (In Russ.)

Dryagin V.V., Kuznetsov O.L., Starodubtsev A.A., Rok V.E. (2005). Search for Hydrocarbons in Wells by the Method of Induced Seismoacoustic Emission. *Akusticheskii zhurnal = Acoustic journal*, 51(suppl. 1), pp. 66-73. (In Russ.)

Engelbrecht J., Khamidullin Y. (1988). On the possible amplification of nonlinear seismic waves. *Phys. Earth Planet. Inter*, 50(1), pp. 39-45.

Grafov B.M., Arutyunov S.L., Kazarinov V.E., Kuznetsov O.L., Sirovinskii Yu.V., Suntsov A.E. (1998). Analysis of geoacoustic radiation of oil and gas deposits using ANCHAR technology. *Geofizika = Geophysics*, 5, pp.24-28. (In Russ.)

Greshnikov V.A., Drobot Yu.B. (1976). Acoustic emission. Moscow: Standarts Publ., 272 p. (In Russ.)

Huang N. E., Shen Z., Long S. R., Wu M. C., Shih H. H., Zheng Q., Yen N.-C., Tung C. C., and Liu H.H. (1998). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 454, pp. 903-995.

Khismatullin R.K. (2007). Dynamics of the stress-strain state of a rock at different types of saturation. *Vestnik SamGU. Estesvennonauchnaya seriya*, 9/1(59), pp. 232-241. (In Russ.)

Krylov V.M. (1983). On the radiation of sound by developing fractures. *Akusticheskii zhurnal = Acoustic journal*, 29(6), pp. 790-798. (In Russ.)

Kurlenya M.V., Oparin V.N., Vostrikov V.I. (1993). On the formation of elastic wave blocks during pulsed excitation of block media. Waves of pendulum type V_{μ} . *Doklady akademii nauk*, 333,(4), pp. 515-521. (In Russ.)

Kurlenya M.V., Serdyukov S.V. (1999). Low-frequency resonances of seismic luminescence of rocks in a low-energy vibroseis field. *FTRPPI*, 1. (In Russ.)

Merson M., Mitrofanov V., Safin D. (1999). Possibilities of ultrasound in oil production. *Neft' Rossii [Oil of Russia]*, 1, pp. 17-23. (In Russ.)

Mitrofanov V.P., Dzyubenko A.I., Nechaeva N.Yu., Dryagin V.V. (1998). The results of field tests of the acoustic treatment of the bottomhole formation zone. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh mestorozhdenii = Geology, geophysics and development of oil fields*, 10, pp. 29-35. (In Russ.)

Mitrofanov V.P., Terent'ev B.M., Zlobin A.A. (1998). Petrophysical feasibility of acoustic stimulation of water-oil displacement processes. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh mestorozhdenii = Geology, geophysics and development of oil fields*, 9, pp. 22-27. (In Russ.)

Nikolaevskii V.N. (1992). Vibration of mountain massifs and ultimate

oil recovery. *Mekhanika zhidkosti i gaza = Fluid Dynamics*, 5, pp. 110-119. (In Russ.)

Nikolaevskii V.N. (2005). Seismic vibration technique for reanimation of oil and gas watered layer. *Geofizicheskie issledovaniya = Geophysical research*, 1, pp.37-47. (In Russ.)

Nikolaevskii V.N., Stepanova G.S. (2005). Nonlinear Seismics and the Acoustic Effect on the Oil Recovery. *Akusticheskii zhurnal = Acoustic journal*, 51(Is. «Geoakoustics»), pp. 150-159. (In Russ.)

Pikovskii M., Rozenblyum M., Kurts Yu. (2003). Synchronization. A fundamental nonlinear phenomenon. Moscow: Tekhnosfera, 496 p. (In Russ.)

Poznyakov V.A. (2005). The intensity of the scattered waves is a new seismic attribute for the prediction of the filtration-capacitive properties of the oil-saturated reservoir. *DAN Geophysics*, 404(1), pp.105-108. (In Russ.)

Roberts P.M. (2005). Laboratory Observations of Porous Fluid-Flow Behavior in Berea Sandstone Induced by Low-Frequency Dynamic Stress Stimulation. *Acoust. Phys.*, 51(Suppl. 1), pp. S140-S148. <https://doi.org/10.1134/1.2133962>.

Roberts P.M., Venkitaraman A., Sharma M. M., (2000). Ultrasonic Removal of Organic Deposits and Polymer Induced Formation Damage, *SPE Drill Completion*, 15(1), pp. 19-24. <https://doi.org/10.2118/62046-PA>

Robtsman V.A. (1996). Nonlinear transformation of probability distributions of acoustic emission signals during the evolution of an ensemble of defects in a solid. *Akusticheskii zhurnal = Acoustic journal*, 42(6), pp. 846-852. (In Russ.)

Rudenko O.V. (2006). Giant nonlinearities in structurally inhomogeneous media and the fundamentals of nonlinear acoustic diagnostic techniques. *UFN*, 176(1), pp. 77-95. (In Russ.)

Shoeb V.M. (1988). Investigation of microseismic processes occurring in an array of rocks of underground mines. Novosibirsk, 71 p. (Preprint/ Institute of Mining, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, No. 25) (In Russ.)

Stepanova G.S., Nenartovich T.L., Yagodov G.N. (2005). Comparative analysis of the effect of acoustic power on the degassing of the oil model. *Enhanced oil recovery technologies: Coll. papers*, 133, pp.107-116. (In Russ.)

Stepanova G.S., Yagodov G.N., Nenartovich T.L., Nikolaevskii V.N. (2003). Influence of ultrasonic vibrations on the process of oil degassing. *Burenie i nefi' = Drilling and oil*, 7-8, pp. 36-38. (In Russ.)

Tertsagi K. (1961). Theory of soil mechanics. Transl. from Ger. Moscow: Gosstroizdat, 507 p. (In Russ.)

Venkitaraman A., Roberts P. M., Sharma M. M. (1995). Ultrasonic Removal of Near-Wellbore Damage Caused by Fines and Mud Solids. *SPE Drill Completion*, 10(3), pp. 193-197.

Vilchinskaya N.A., Nikolaevskii V.N. (1984). Acoustic emission and spectrum of seismic signals. *Izvestiya AN SSSR. Ser. Fizika Zemli*, 5, pp. 91-100. (In Russ.)

Volodin I.A. (2003). Nonlinearity and multiscale in seismoacoustics. *Problemy geofiziki XXI veka [Problems of geophysics of the XXI century]*. Book 2. Moscow: Nauka, pp. 5-36. (In Russ.)

Volodin I.A., Chebotaeva I.Ya. (2014). Seismic emission in technological impact zones. *Akusticheskii zhurnal = Acoustic journal*, 60(5), pp. 505-517. (In Russ.)

Voronina I.Yu., Epifanov V.P. (1980). Acoustic studies of structural changes in granite under axial compression. *Akusticheskii zhurnal = Acoustic journal*, 26(3), pp. 371-376. (In Russ.)

About the Author

Veniamin V. Dryagin – PhD (Physics and Mathematics),
Director

Research and Production Company Intensonic LLC
Amundsen st., 100 of. 104, Ekaterinburg, 620016, Russian
Federation. E-mail: vdryagin@mail.ru

Manuscript received 27 June 2018;

Accepted 01 August 2018; Published 30 August 2018