РАЗРАБОТКА ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Г.В. Иголкина, В.В. Дрягин, О.А. Хачай, Д.Б. Иванов, З.С. Мезенина
Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург,
e-mail: galinaigolkina@yandex.ru

Введение

В последнее время новые и убедительные данные получены в результате промыслово-геофизических исследований методом каротажа вызванной энергоактивности пластов-коллекторов [1–3].

Технология управления нефтедобычей на нефтяном месторождении основана на возбуждении в продуктивном пласте-коллекторе волн упругой энергии большой интенсивности и регистрации волн эмиссионного происхождения. Возбуждаемые волны способствуют запуску в пласте физико-химических процессов, приводящих к увеличению фазовой проницаемости нефти, а регистрируемые упругие эмиссионные волны несут информацию о характере насыщенности этих пластов, что позволяет осуществлять управляемое воздействие на залежь нефти.

Результаты исследований

Исследования, проведенные в Институте геофизики УрО РАН совместно с НПФ «Интенсоник», показали, что впервые выявленная и запатентованная закономерность проявления отклика пористой насыщенной среды на волновое поле большой интенсивности может быть положена в основу новой комплексной технологии, позволяющей эффективно решать указанную задачу и восстанавливать фильтрационные характеристики пластов. С физической точки зрения такой отклик является результатом нелинейного взаимодействия волнового поля с флюидом, заполняющим поровое пространство, и проявляется в виде генерации вторичного излучения, параметры которого адекватно связаны с характером насыщения коллектора.

Процессы разработки нефтегазовых месторождений связаны с движением многофазных многокомпонентных сред, которые характеризуются неравновесными и нелинейными реологическими свойствами. Реальное поведение пластовых систем определяется сложностью реологии движущихся жидкостей и морфологического строения пористой среды, а также многообразием процессов взаимодействия между жидкостью и пористой средой. Учет этих факторов необходим для содержательного

описания процессов фильтрации за счет нелинейности, неравновесности и неоднородности, присущих реальным системам.

Сейсмоакустическая эмиссия (САЭ) представляет собой процесс излучения упругих волн в результате обратимых или частично обратимых изменений структуры твердых тел под влиянием внешних и внутренних факторов различной физической природы, таких как локальные перераспределения напряжений, образование новых трещин, дегазация, изменение фазового состояния и химического состава пород. В кристаллических массивах САЭ связана с процессом образования новых трещин; в флюидонасыщенных средах, наряду с упругими процессами, могут действовать и гидродинамические факторы [1, 2].

Исследования сейсмоакустической эмиссии в прискважинной области пласта, обусловленной как естественными процессами, так и искусственными воздействиями на него, позволяют выявить закономерную связь свойств эмиссии с наличием углеводородов.

Динамические нелинейные процессы в продуктивном пласте находят свое отражение в постоянно действующем излучении упругой энергии в сейсмическом и акустическом диапазонах частот, что следует из анализа фоновых записей САЭ. При этом любое внешнее упругое воздействие на залежь вызывает активизацию процессов становления и релаксации состояний насыщенного порового пространства, изменение фильтрации, дегазации, фазовой проницаемости и др., при условии наличия углеводородов сложного состава и воды. Эти процессы неизбежно изменяют энергетическое состояние среды, которое отражается в изменении акустической эмиссии. Корреляция высокочастотной части САЭ с низкочастотной свидетельствует о развитии процесса в пространстве на разномасштабных уровнях. Вероятно, такая согласованность диапазонов частот САЭ отражает способность процесса охватить всю залежь углеводородов при наличии разового или периодически повторяющегося спускового механизма в виде виброволнового воздействия [1].

Излучение мощного акустического поля и прием слабых эмиссионных сигналов в скважине в течение одного технологического цикла позволили получить новую качественную информацию об энергетических процессах в коллекторах и их связи с наличием и извлечением нефти.

При проведении промысловых исследований энергия акустической эмиссии, выделяемая в исследуемом интервале записи, определялась экспресс-методом вычисления

спектральной плотности энергии во всем регистрируемом диапазоне частот и регистрировалась специальной геофизической станцией. Среднее увеличение сигнала САЭ составляло 12–42% прироста относительно фона, в то время как события акустической эмиссии в виде единичных действий источников эмиссии происходили случайным образом, имея при этом характерные параметры импульсов сигнала АЭ конечной длительности, определенной формы с определенным максимальным значением энергии и частоты заполнения. Было отмечено наличие доминирующих частот в составе АЭ.

Запись акустической эмиссии в течение продолжительного времени относительно времени силового воздействия на пласт позволяет выявить процесс развития акустической эмиссии и рассчитать его основные параметры, как в скважине, так и на образцах керна. Таковыми параметрами АЭ являются: энергия, интенсивность, доминирующие частоты и их амплитуды, а также кинематические параметры. Установлена одинаковая зависимость этих параметров от насыщенности в скважинах и кернах. В ходе проведения лабораторных исследований на образцах керна было выявлено улучшение фильтрации через образцы под действием акустического поля. В свою очередь, это может быть доказательством увеличения коэффициента продуктивности при акустическом воздействии на пласт. Улучшения фильтрационно-емкостных свойств при акустическом воздействии отражаются в измененном эмиссионном отклике среды [2].

Сопоставление параметров эмиссионных сигналов с геологическими характеристиками месторождений позволило установить взаимосвязь их спектральной энергетической характеристики и доминирующих частот с поровым или трещиноватым типом коллектора [2–5].

Были исследованы нелинейные параметры вызванной акустической эмиссии для решения задачи определения насыщенности продуктивных коллекторов и сделан анализ нескольких интервалов продуктивных пластов в скважине Тевлинско-Русскинского месторождения в Западной Сибири. Записи сигналов САЭ произведены по всему интервалу залежи пласта БС10 (2–3). Он включает семь раздельных пластов-коллекторов с различной насыщенностью, оцениваемой с помощью неперфорированной обсадной колонны. Пласты сложены мелкозернистыми песчаниками с прослоями алевролитов и аргиллитов. Коллекторами являются песчаники и алевролиты, не коллекторами –

аргиллиты и глины. Фильтрационно-емкостные свойства этих коллекторов изменяются в широких пределах: пористость от 21,2 до 26,9%, проницаемость – от 2 до 444 мД [2–4].

С целью сравнения сигналов приведены для одинаковых глубин, в одних масштабах времени и амплитуды. Уже по внешнему виду сигналов САЭ видно, что активность и энергия эмиссии после акустического воздействия возросли и проявляются в виде повторяющихся импульсов, однако по-разному на разных глубинах. Эти фрагменты записи сигналов выделены из общей записи сигналов продолжительностью 15–60 с.

По результатам геолого-геофизической информации промысловых испытаний на приток нефти из этих пластов и сопоставления с данными КСАЭ установлено, что продуктивность этих пластов 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 обладают доминантными частотами (6–9 кГц) и имеют прирост 30–40% энергии САЭ (относительно фоновой энергии), при испытаниях на приток в двух скважинах они обеспечили дебит 34–40 т нефти в сутки (с обводненностью, не превышающей 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 90–180% 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. В верхних интервалах пласта с проницаемостью 220 и 444 мД происходит существенное увеличение энергии САЭ после воздействия. В нижнем интервале пласта изменение энергии имеет более сложный характер и включает как увеличение энергии, так и ее уменьшение после воздействия. В непроницаемых интервалах между пластами-коллекторами изменение энергии носит отрицательный характер. Последнее, вероятно, связано со снятием механических напряжений в непроницаемой и ненасыщенной горной породе при акустическом воздействии.

Наиболее отчетливо (см. рис. 1) прослеживается связь энергии САЭ с расчетным коэффициентом проницаемости Кпр (мД), полученным по результатам ГИС в открытом стволе скважины [1]. Энергия САЭ определялась, как и в предыдущем случае, в

отношении к фоновой энергии, измеренной до акустического воздействия. Энергия после акустического воздействия определялась как суммарная энергия высокочастотной составляющей сигнала САЭ, измеренной с шагом 0.5 м по глубине скважины. Относительная энергия высокочастотной составляющей САЭ (дБ):

$$\mathrm{E}^* = 20\lg\left(\sum Eat(i)/(fon)\right), \qquad (1)$$

где $\sum Eat(i)$ – суммарная энергия сигнала САЭ, определенная по спектральной плотности энергии высокочастотной части спектра, полученная после нескольких (i = 2–4) сеансов акустического воздействия; $\sum E(fon)$ – фоновая энергия сигнала в той же части спектра.

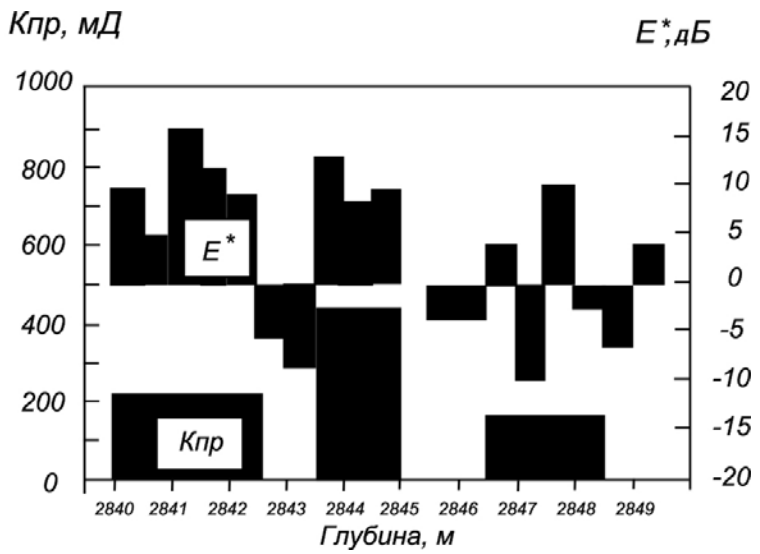

Рис. 1. Соотношение энергии, вызванной САЭ, с проницаемостью коллектора

Впервые отмечаются два фактора влияния на залежь: непосредственное действие искусственных вибраций на среду и опосредованное действие самой сейсмоакустической эмиссией, которая была вызвана этими вибрациями. При этом отмечается, что на фоне равномерного вибрационного воздействия происходит второй процесс локального кратковременного облучения небольшого объема среды мощным акустическим полем. Это поле является более эффективным фактором, влияющим на проницаемость нефтенасыщенной среды, чем равное ему по мощности поле периодических колебаний, возбуждаемых вибратором.

Частота максимального ускорения, приведенная в этих расчетах, определялась по спектральному анализу сигналов САЭ, которые имеют характер высокочастотных затухающих импульсов, причем эти импульсы могут присутствовать в нефтенасыщенном пласте как в фоновом замере САЭ, так и появляться или усиливаться после акустического воздействия. Как правило, САЭ проявляется в виде пакета импульсов длительностью несколько секунд.

Дальнейшая методика интерпретации результатов выполнена при помощи разложения сигнала САЭ на эмпирические моды методом Гильберта – Хуанга, с последующим применением к полученным компонентам разложения преобразования Гильберта. Метод позволяет реализовать адаптивный анализ нелинейных и нестационарных сигналов и получить набор эмпирических мод непосредственно из данных временной реализации сигнала, что дает возможность учесть все его локальные особенности в реальном времени.

Анализ данных каротажа сейсмоакустической эмиссии с использованием преобразования Гильберта – Хуанга позволил установить новые корреляционные зависимости между сигналами САЭ и коэффициентом проницаемости при различном типе флюида. Для нефтенасыщенных коллекторов коэффициент корреляции $K(dW(f), К_{пр})<0$ для всех частотных поддиапазонов. Для водонасыщенного интервала $K(dW(f), К_{пр})>0$ для всех частотных поддиапазонов. В случаях смешанного насыщения (вода+нефть, нефть+вода) происходит изменение знака $K(dW(f), К_{пр})$ для различных частотных поддиапазонов [8].

В работе показана возможность применения КСАЭ для количественной оценки коэффициента насыщенности. Для получения количественной зависимости между коэффициентом водонасыщенности Кв и данным КСАЭ было выведено уравнение множественной регрессии. Результирующее уравнение множественной регрессии для пласта БС:

$$Кв = 45{,}321 + 0{,}277*\ln Wf + 1{,}181*\ln Wv_1 - 0{,}576*\ln Wv_2, \qquad (2)$$

где Wf – плотность энергии сигналов естественной САЭ; Wv_1 – плотность энергии сигналов вызванной САЭ после первого акустического воздействия (АВ); Wv_2 – плотность энергии сигналов вызванной САЭ после второго АВ [8].

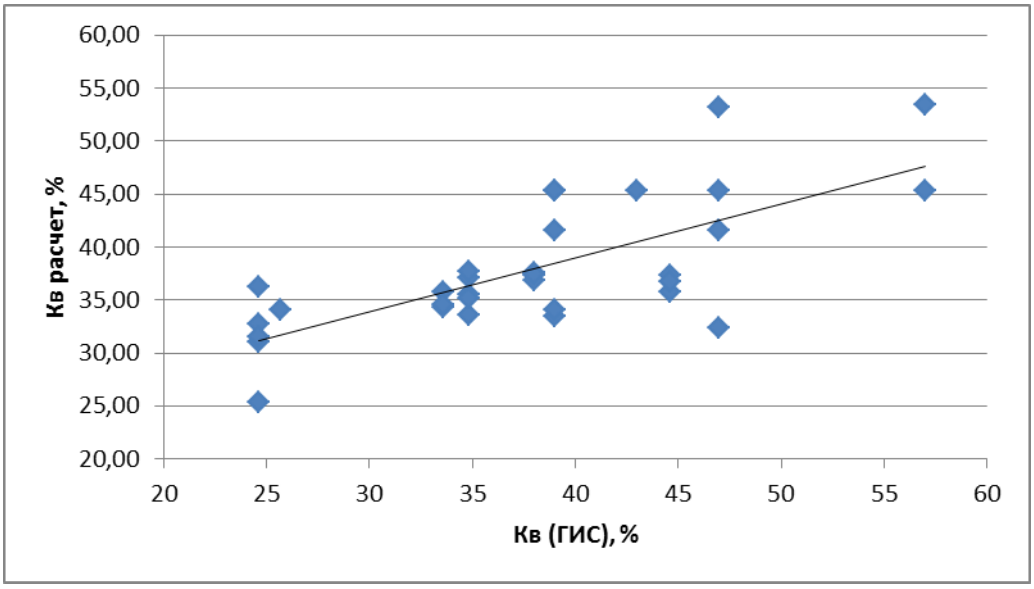

Рис. 2. Фактические и расчетные значения коэффициента водонасыщенности

Кроме того, в работе был предложен новый метод мониторинга для картирования и идентификации изменения состояния гетерогенной двухфазной среды с иерархическими включениями при ее отработке. Анализ результатов электромагнитного индукционного мониторинга в натурных условиях позволяет сделать следующие выводы: строение массива горных пород различного вещественного состава удовлетворяет модели иерархичной дискретной среды, нам удалось проследить два иерархических уровня. Зоны дезинтеграции, выделенные по данным электромагнитного мониторинга, в околовыработочном пространстве расположены несимметрично в почве и в кровле и дискретно, т.е. имеются интервалы полного их отсутствия. Максимальные изменения в массиве, находящемся под техногенным влиянием, происходят именно в их морфологии, пространственном положении в зависимости от времени и интенсивности воздействия [6, 7].

Предложенный метод картирования и мониторинга гетерогенной сложнопостроенной двухфазной среды может быть использован при управлении добычей вязкой нефти в шахтных условиях и легкой нефти в субгоризонтальных скважинах. Он соответствует требованиям эффективного по экономическим показателям и наиболее полного извлечения углеводородов на месторождениях, а также диктует необходимость создания новых геотехнологий освоения месторождений нефти и газа, основанных на фундаментальных достижениях в области геофизики и геомеханики.

Сопоставление научных результатов с мировыми достижениями

Способы решения проблемы добычи трудноизвлекаемых запасов нефти представлены двумя основными группами, одна из которых включает методы улучшения системы разработки месторождений, другая – физико-химические и волновые методы увеличения нефтеотдачи и интенсификации нефтедобычи.

К нетрадиционным методам повышения добычи трудноизвлекаемых запасов УВ относятся: введение различных химических добавок в закачиваемую воду; введение в пласт бактериальных штаммов: воздействие на пласт волновыми физическими полями. Разработка таких методов требует комплексного применения передовых достижений академической науки в различных областях, что обусловливает необходимость создания консорциумов из нефтедобывающих компаний, сервисных фирм, нефтемашиностроительных заводов, малых внедренческих компаний и академических научных центров, поддерживаемых государством через целевые инновационные проекты.

Зарубежные коллеги пытаются решить задачу повышения нефтеотдачи месторождения на основе применения волнового акустического воздействия и анализа вызванной эмиссионной активности в скважине путем усложнения систем наблюдения, что приводит к удорожанию аппаратуры, увеличению времени наблюдательного процесса и при отсутствии точного знания модели среды и модели процесса не всегда обеспечивает желаемый прогнозный результат. Наши исследования сводятся к компромиссному решению: не усложняя аппаратурно-методический комплекс, использовать теоретические подходы, основанные на распознавании образов: нефть, нефть+вода, вода по критериям, разработанным с помощью фазовых диаграмм сейсмоакустических данных. Кроме того, нами предложен метод исследований влияния акустического поля на фильтрационно-емкостные свойства насыщенной пористой среды.

Методы и подходы, использованные в ходе выполнения работы

Методическая база позволит создать технические условия и руководящие документы по применению технологии виброакустического воздействия (ВАВ) и каротажа сейсмоакустической эмиссии (КСАЭ) для оценки характера насыщенности коллектора и восстановления его проницаемости как при выполнении работ в отдельной скважине, так и при мониторинге объектов и месторождений. Технические условия применения метода позволят организовать серийное производство оборудования на российских предприятиях, а также его сертификацию по международным стандартам.

Материально-техническая база для выполнения проекта основана на накопленном опыте в разработке и эксплуатации аппаратуры метода ВАВ и КСАЭ на ряде месторождений Российской Федерации и Казахстана. Имеется установка для исследования керна УИК АЭ, разработанная и изготовленная в ООО НПФ «Интенсоник» в соответствии с заданием ООО «Лукойл – Западная Сибирь» в 2011 г. Выполнены исследования кернов по Тевлинско-Русскинскому и Ватьеганскому нефтяным месторождениям.

Выводы

Использование предложенной экологически безопасной технологии повышения нефтеотдачи месторождений обеспечивает существенное сокращение затрат на поддержание уровня нефтеотдачи. Эта технология включает в себя аппаратуру, позволяющую реализовать новый метод активного сейсмоакустического каротажа в работающих скважинах, экспрессную обработку данных, теоретическое обоснование метода в классе современных нелинейных представлений об активном воздействии на нефтенасыщенную среду, блок рекомендаций по дальнейшей отработке месторождения, что позволяет управлять процессом его отработки.

Предложенный электромагнитный индукционный метод мониторинга может быть также использован при управлении добычей вязкой нефти в шахтных условиях и легкой нефти в субгоризонтальных скважинах. Он соответствует требованиям эффективного по экономическим показателям и наиболее полного извлечения углеводородов на месторождениях и также диктует необходимость создания новых комплексных геотехнологий освоения месторождений нефти и газа, основанных на фундаментальных достижениях в области геофизики и геомеханики.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований по Отделению наук о Земле РАН (проект № 12-П-5-1016).

Литература

1. *Дрягин В.В.* Сейсмоакустическая эмиссия нефтепродуктивного пласта // Акуст. журн. 2013. Т. 59, № 6. С. 744–751.

2. *Дрягин В.В.* Сейсмоакустическая эмиссия и проницаемость коллектора // Глубинное строение. Геодинамика. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических

полей: Седьмые научные чтения Ю.П. Булашевича: материалы. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2013. С. 112–114.

3. *Дрягин В.В., Иванов Д.Б., Иголкина Г.В., Мезенина З.С.* О лабораторных исследованиях керна и создании интерпретационных моделей нефтенасыщенности по данным каротажа КСАЭ // Там же. С. 115–117.

4. *Иголкина Г.В., Мезенина З.С.* Исследование магнитных характеристик пород при изучении нефтегазовых бассейнов (на примере Кечимовского и Тевлинско-Русскинского месторождений Западной Сибири) // Электрон. науч. журн. «Нефтегазовое дело», 2013. № 2 .С. 52–71. – Режим доступа: htpp://www.ogbus.ru.

5. *Иголкина Г.В.* Решение технологических задач при исследовании сверхглубоких и нефтегазовых скважин методом магнитометрии // НТВ «Каротажник», Тверь. 2013. № 230. С. 25–40.

6. *Hachay O.A., Dryagin V.V., Igolkina G.V., Khachay O.Yu.* Reflection of no equilibrium two phase processes of filtration in heterogeneous media in the active seism acoustic borehole monitoring data // EGU General Assembly 2013. Geophysical Research Abstracts. Vienna, 2013. Vol. 15. EGU2013-49.

7. *Хачай О.А.* Отражение процессов неравновесной двухфазной фильтрации в нефтенасыщенных неоднородных средах в данных активного электромагнитного индукционного мониторинга // Глубинное строение. Геодинамика. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей: Седьмые науч. чтения Ю.П. Булашевича: материалы. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2013. С. 315–317.

8. *Иванов Д.Б.* Количественная оценка характера насыщенности по данным каротажа сейсмоакустической эмиссии // XIV Уральская молодежная науч. школа по геофизике: материалы. Екатеринбург, 2013. С. 97–98.