

Н.П. Запивалов¹, Э.И. Машинский²¹Российская академия естественных наук, Новосибирск²Институт геофизики СО РАН, Новосибирск

НЕСТАНДАРТНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ В ПОРОДАХ - КОЛЛЕКТОРАХ

Введение

В течение длительного времени проблема обнаружения нефтегазонасыщенных резервуаров сейсмическими методами решалась в рамках традиционной упругой модели. Несмотря на определенные успехи, достигнутые благодаря мощным технологическим и вычислительным возможностям, эффективность традиционных методов остается недостаточно высокой. На наш взгляд, это объясняется исчерпанием возможностей «упругой» парадигмы, которая хорошо себя показала при решении структурных задач геологии, но для задач изучения динамики резервуаров демонстрирует низкую информативность. Необходимы подходы, использующие новые знания о физике деформирования реальной геологической среды, весьма далекой, как выясняется, от совершенной упругости. С обнаружением нелинейных эффектов, не вписывающихся в классические законы, перспективность нового направления возросла (Запивалов, Попов, 2003; Машинский, 1998). Кратко остановимся на истории вопроса, а затем рассмотрим неупругие эффекты, которые могут придать новое качество сейсморазведочным методам.

При оконтуривании нефтегазовых залежей используется поглощение сейсмических волн (И.Я. Баллах, М.Ф. Мирчинк, К.А. Мустафаев, И.Г. Медовский, Л.А. Сергеев и др.). Параметры поглощения и скоростей волн V_p , V_s , V_p/V_s как основные оценочные критерии, позволяют в ряде случаев прогнозировать аномальные участки, приуроченные к нефтенасыщенным резервуарам. Однако, из-за многовариантности и сложности строения объекта не всегда получаются однозначные результаты. Использование полной динамической характеристики (формы импульса) повышает эффективность геологической интерпретации. Метод AVO, использующий амплитудный эффект, также способствует повышению эффективности (по сравнению с методом «яркого пятна»), но имеет свои ограничения, обусловленные литологическими изменениями, маскирующими углеводородные аномалии (Castagna, Smith, 1994).

Дальнейшее развитие методов изучения и прогнозирования залежей направлено на использование эффектов неупругости (Машинский, Запивалов, 1998). Согласно этой идеологии, наличие углеводородов вызывает аномальное поглощение и дисперсию скоростей сейсмических волн, которые намного больше, чем в «пустых» породах. Неуп-

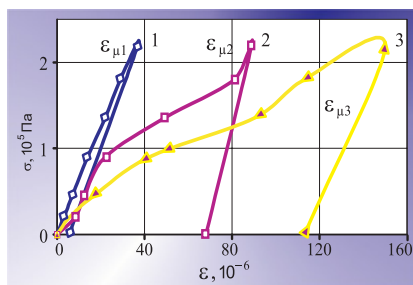


Рис. 1. Влияние влагонасыщения на гистерезис соотношений $\sigma(\varepsilon)$ Омбинского песчаника (2400 м). 1 – сухой образец; 2 – частичное насыщение (312 час, $t = 20^\circ\text{C}$); 3 – полное насыщение (1540 час, $t = 20^\circ\text{C}$).

ругость является причиной нелинейности в сейсмике и вызывает появление таких эффектов как генерация высших гармоник, сдвиг резонансной частоты и т.д. Исследования неупругости проясняют причину слабой эффективности традиционных сейсмических параметров. Процессы деформирования пород-коллекторов на микро- и мезоуровне носят сложный характер, поэтому для выявления эффективных поисковых признаков требуется основательное изучение процесса распространения волн.

Микропластическая неупругость и нелинейность

Обнаружение микропластичности пород и прямое измерение кривых $\sigma(\varepsilon)$ на малых деформациях ($\sim 10^{-6}$) показало существование физической нелинейности в диапазоне амплитуд, ранее относящихся к практически упругим (Машинский, Запивалов, 1998). Эксперименты с распространением импульсных сигналов малой интенсивности подтвердили влияние физической нелинейности на сейсмические волновые процессы. Привлечение микропластичности в качестве характеристики деформационных процессов существенно меняет представление об упруго-неупругом поведении пород. На малых амплитудах в традиционно упругой области регистрируются остаточные деформации и гистерезис. Открываются новые возможности для диагностики резервуаров по нелинейно-неупругим признакам.

Что представляет из себя микропластичность? Это свойство необратимости деформации пород в области энергий ниже условного предела упругости (в отличие от макропластичности). Микропластическая деформация существует совместно с упругой, а общая измеряемая деформация является суммой этих компонент. Микропластичность имеет многочисленные макропроявления: скачкообразность деформационного перехода (пороговые уровни энергии), необратимость остаточных деформаций (открытые петли гистерезиса), зависимость упругих модулей и поглощения от деформации. Физические механизмы микропластично-

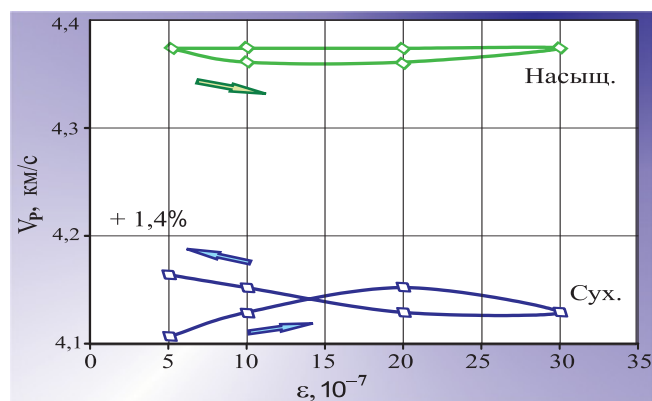


Рис. 2. Зависимости скорости P-волн от амплитуды импульса в сухом и насыщенном песчанике (пористость 8 %).

сти пород пока не изучены и могут быть, например, такими же, как в металлических поликристаллах (движение дислокаций) или другими (локальное скольжение на микроструктурных элементах, зерно-контактная адгезия, дискретная память) (Johnson et al., 1996).

Породы различного литологического состава различаются по микропластичности. Замечена изменчивость необратимых деформаций в зависимости от уровня прикладываемой энергии. При переходе из одного деформационного диапазона в другой (как это происходит при распространении волны) возникают изменения в характере зависимостей $\sigma(\epsilon)$, которые приводят к нелинейным искажениям. Наиболее сильные изменения деформационных характеристик происходят во флюидонасыщенных породах по сравнению с сухими. Предварительные исследования показали, что микропластическая неупругость в большей степени связана с характером насыщения.

Нелинейные характеристики пород, связанные с микропластической неупругостью, например, такие как амплитуднозависимые скорости, затухание и гистерезис могут представлять интерес в качестве дополнительных поисковых признаков. Имеются предпосылки, что эти параметры очень чувствительны к смене физического состояния (давлению, насыщению и т.д.). Пока эти данные немногочисленны и получены только в лабораторных условиях.

Атипичные экспериментальные данные

Покажем принципиальные возможности дифференциации пород по флюидонасыщению, когда используется амплитуднозависимый фактор. Они справедливы как для статических, так и для динамических измерений. На их основе мы надеемся найти в будущем более эффективные оценочные поисковые параметры.

В первую очередь необходимо посмотреть на зависимость напряженно-деформация $\sigma(\epsilon)$, которая является первоисточником нелинейности. В характере кривой $\sigma(\epsilon)$ заложена информация о среде, и ее особенности определяют дальнейшую «судьбу» распространяющегося динамического воздействия. Посмотрим эволюцию квазистатической зависимости $\sigma(\epsilon)$ на примере омбинского песчаника (Западная Сибирь). Сравнение петли гистерезиса в сухом, частично и полнонасыщенном состоянии показано на рис. 1. По мере увеличения насыщения наблюдается нелинейное преобразование кривых $\sigma(\epsilon)$. Происходит снижение модуля упругости, увеличение остаточных деформаций и расширение петли гистерезиса, что указывает на увеличение потерь энергии. Все это зависит от уровня прикладываемой энергии. Таким образом, насыщение существенно меняет характер деформационного поведения, увеличивая нелинейность.

Динамические эксперименты были поставлены для выявления и оценки необратимых процессов при распространении продольных и поперечных волн малой амплитуды. Эти эффекты могут быть положены в основу отличительных признаков дифференциации пород по флюидонасыщению. Методика измерений включала цикл изменения амплитуды импульса от минимальной до максимальной и обратно ($A_{\min} > A_{\max} > A_{\min}$). Эксперименты проводились на образцах песчаников различной пористости из сибирских месторождений, находящихся под всесторонним давлением (до 60 МПа). Использовалась методика от-

раженных волн. Пьезоэлектрические излучатель и приемник располагаются над образцом и регистрируются Р- и S-волны на частоте около 1 МГц. Точность измерения скоростей волн - 0,2 %. Наиболее выразительным является динамический гистерезис и различные формы его проявления (Рис. 2, 3).

Среднепористый песчаник. В сухом и насыщенном состоянии скорости волн, измеренные в виде амплитудного гистерезиса, имеют следующие особенности. Во-первых, остаточный гистерезис, т.е. величина несовпадения скоростей в начале и в конце амплитудного цикла. Для продольных волн его наибольшее значение (для данного размаха амплитуд) имеет сухой песчаник (1,4 %), рис. 2. Насыщенный песчаник остаточный гистерезис не показывает. Во-вторых, наблюдается перехлест ветвей гистерезиса, который отмечается только в сухом песчанике, а в насыщенном отсутствует. На S-волне с изменением амплитуды появляются также характерные кривые. Остаточный гистерезис для сухого песчаника составляет 1,2 %. Насыщение приводит к качественному отличию этого параметра – к гистерезису отрицательного знака в 2,5 %. Последнее обстоятельство является важным, поскольку указывает на необычное поведение породы.

Низкопористый песчаник. Другая картина гистерезиса наблюдается в этом песчанике (Рис. 3). На Р-волне остаточный гистерезис в сухом состоянии практически отсутствует. Насыщение дает отрицательный остаточный гистерезис в 1,1 %. Из графика видно, что уменьшение V_p происходит не только при увеличении амплитуды волны от минимальной до максимальной, но и при обратном ее уменьшении от максимального до исходного значения. На S-волне в сухом песчанике остаточный гистерезис составляет 1,2%, а в насыщенном - практически отсутствует.

Характер амплитудно-гистерезисных кривых мы рассмотрели и для других динамических параметров. Для тех же песчаников построены амплитудно-гистерезисные кривые для модуля объемного сжатия K_d и коэффициента Пуассона ν_d , рассчитанных по скоростям волн (Рис. 4, 5). Качественно эти параметры хорошо соответствуют скоростным данным. Характерные особенности гистерезиса (знак, перехлест ветвей) совпадают. Однако, имеются существенные количественные отличия. Величина остаточного гистерезиса K_d и особенно ν_d в несколько раз выше, чем скоростей волн (6,2 и 1,4 %), что свидетельствует о большей чувствительности параметров амплитудного гистерезиса по признаку насыщения при совместном использовании продольной и сдвиговой компоненты.

Выводы

Приведенные примеры нестандартного подхода к решению проблемы дифференциации пород по нелинейно-неупругим признакам позволяют сделать следующие выводы.

Амплитудная зависимость скоростей продольных и поперечных волн в песчаниках имеет различные проявления в зависимости от физического состояния породы. Данный параметр может служить отличительным признаком степени насыщения. Однако, он не всегда является достаточно чувствительным к тонким изменениям состояния породы и флюидонасыщенного резервуара. Разрешающую способность этого признака можно увеличить путем расширения диапазона амплитуд.

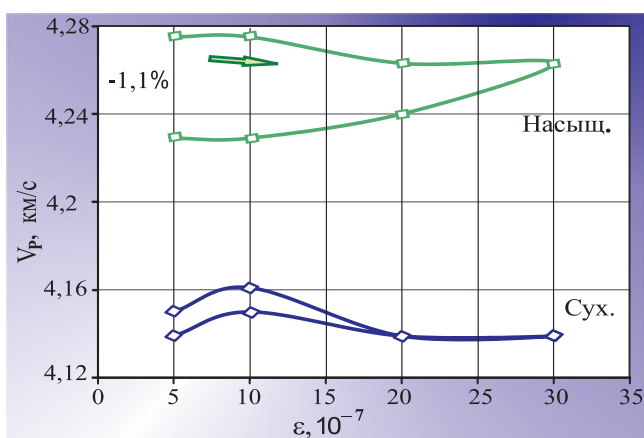


Рис. 3. Зависимости скорости Р-волны от амплитуды импульса в сухом и насыщенном песчанике (пористость 3 %).

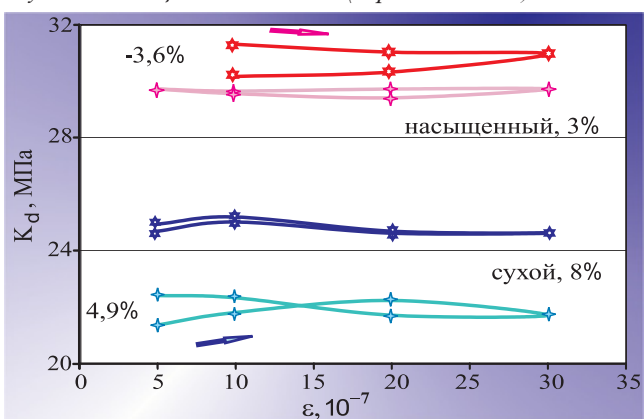


Рис. 4. Амплитудная зависимость модуля объемного сжатия.

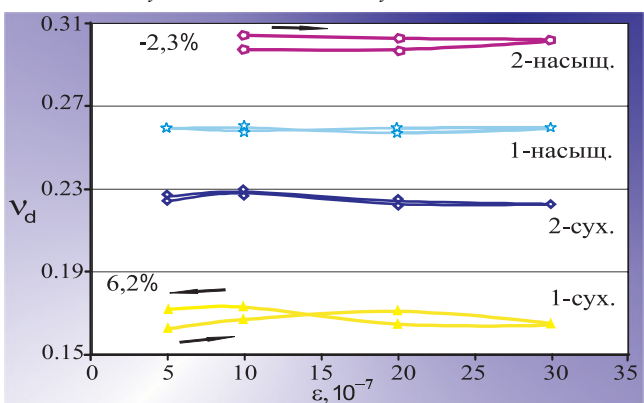


Рис. 5. Амплитудная зависимость коэффициента Пуассона.

Параметр остаточного гистерезиса сильнее реагирует на изменение физического состояния и может служить новым признаком различия пород по флюидонасыщению. Этот параметр наиболее эффективен при совместном использовании продольных и поперечных волн, что продемонстрировано на примере модуля объемного сжатия.

Заключение

Совершенствование физических основ изучения и прогнозирования залежей углеводородов направлено на использование новых свойств и явлений, в частности, микропластической неупругости. Установлено наличие необратимых процессов в породах при распространении упругих волн. Показана зависимость соотношений напряжение-деформация от уровня энергии, которая приводит к изменению скоростей волн от амплитуды волны и гистерезису открытого типа.

Измерения амплитудной зависимости скоростей волн и гистерезиса показало принципиальную возможность разделения «пустых» и насыщенных песчаников по остаточному гистерезису скоростей Р- и S-волн. Однако, для установления более четких критериев необходимо расширение диапазона амплитудных воздействий. Проведенные исследования показали, что использование неупругих параметров приводит к повышению информации о нефтегазоносных объектах. Традиционные измерения скоростей волн с постоянной амплитудой можно дополнить амплитудными кривыми кинематических и динамических параметров волн. Этот способ может быть перспективным для практики, однако необходимы дальнейшие исследования для установления границ применимости этих параметров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 03-05-64951).

Литература

- Запивалов Н.П., Попов И.П. *Флюидодинамические модели залежей нефти и газа*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003.
- Машинский Э.И. *Механическая модель среды с микропластичностью*. Известия РАН. Физика Земли, № 7, 1998. 11-17.
- Машинский Э.И., Запивалов Н.П. Эффекты микропластической неупругости горных пород при изучении коллекторов нефти и газа. *Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений*, № 11, 1998. 16-18.
- Castagna John P., Smith Steven W. Comparison of AVO: A modeling study. *Geophysics*. Vol. 59, N12, 1994. 1849-1855.
- Johnson P.A., Zinsner B., Rasolofosoan P.N.J. Resonance and elastic nonlinear phenomena in rock. *Journal of Geophys. Research*, 101, B5, 1996. 11,533-11,554.

Юдахин Ф.Н., Щукин Ю.К., Макаров В.И.

Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы

Екатеринбург: УрО РАН, 2003. ISBN 5-7691-1431-2, УДК 552.24
 Ответственный редактор: академик РАН Н.П. Лавров
 Рецензенты: Член-корр. РАН А.В. Николаев
 Докт.геол.-минерал. Наук В.Г. Трифонов

Для платформенных регионов Европейской России дана исчерпывающая характеристика региональных геолого-тектонических условий среды обитания применительно к практическим задачам оценки экологической, техногенной и сейсмической опасности. Работа основана на богатом материале экспериментальных исследований, в том числе и авторском, для разных масштабных уровней изучения среды – от регионального до детального. Делается акцент на изучение признаков активизации современных геодинамических процессов и методы прогноза и предупреждения нежелательных природных, экологических и техногенных катастроф в пределах Европейской России. Обширный картографический материал имеет самостоятельное значение, ряд материалов публикуется впервые. Значительный объем геофизических данных хранится в электронном виде и может непрерывно пополняться в базе накопленных данных и знаний.

Книга будет полезна научным и практическим работникам, занятым проблемой комплексного изучения и освоения природных ресурсов, а также для учебных целей.