

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ВАРИАЦИЙ СКОРОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ВОЛНЫ В ПЕСЧАНИКЕ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ИЗМЕНЕНИИ АМПЛИТУДЫ

Б.В. Пашков, Э.И. Машинский

Институт геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия

Проведены экспериментальные исследования зависимости скорости продольной волны и коэффициента поглощения от амплитуды акустического импульса ($f \sim 1$ МГц) на образцах нивагальских песчаников. Обнаружено увеличение скорости волны с увеличением амплитуды в диапазоне деформаций $\varepsilon_d \sim (0,3-2) \cdot 10^{-6}$. Коэффициент поглощения в том же амплитудном диапазоне с увеличением амплитуды уменьшается. Увеличение скорости волны с амплитудой составляет 0,6 %, в то время как уменьшение коэффициента поглощения достигает 10 %. Полный амплитудный цикл ($A_{\min} \rightarrow A_{\max} \rightarrow A_{\min}$) приводит к незначительному гистерезису параметра поглощения. Предлагается увеличить динамический диапазон для более полного установления влияния амплитуды на скорости волн и поглощение. Сделан вывод о большей чувствительности параметра поглощения по сравнению со скоростью волны к изменениям амплитуды импульсного воздействия. Предполагается, что выявленные зависимости могут быть перспективными в качестве дополнительного критерия при решении задач прогнозирования геологического разреза.

Неупругость, гистерезис, амплитудная зависимость скоростей волн и поглощения, нелинейная сейсмика.

VELOCITY AND ATTENUATION OF P WAVES IN SANDSTONE AS A FUNCTION OF STRAIN AMPLITUDE: LABORATORY EXPERIMENTS

B.V. Pashkov and E.I. Mashinsky

The reported laboratory experiments of cycling measurements investigate strain-amplitude dependence of compressional velocity and attenuation of acoustic waves ($f \sim 1$ MHz) in samples of the Nivagal sandstone. Strain-amplitude growth in a range of $\varepsilon_d \sim (0.3-2) \cdot 10^{-6}$ causes a 0.6 % velocity increase and an up to 10 % decrease in attenuation. Attenuation curves show a minor hysteresis in a full cycle ($A_{\min} \rightarrow A_{\max} \rightarrow A_{\min}$). Amplitude dependence of velocity and attenuation can be better resolved at higher strains. Attenuation is more sensitive to strain variations than velocity. The revealed relationships are useful as an additional criterion in imaging sandstone formations.

Nonelasticity, hysteresis, strain-amplitude dependence of velocity and attenuation, nonlinear seismics

ВВЕДЕНИЕ

Важной характеристикой нелинейности горных пород является зависимость кинематических и динамических параметров сейсмических волн от их амплитуды. Факт зависимости скорости волны от амплитуды известен давно, однако механизмы явления пока еще точно не установлены [1—3]. Особый интерес представляет характер этой зависимости, указывающий на знак изменения скорости при изменении амплитуды. Предположение о возрастающем, а не только падающем, характере скорости с ростом амплитуды высказывались и ранее, когда было установлено влияние микропластичности на модуль упругости [4, 5]. Однако эта сторона вопроса тем не менее оставалась неисследованной и не освещалась в литературе. С появлением теоретической работы [6] интерес к проведению таких исследований возрос [6, 7]. Авторами этих работ показана возможность возрастания скорости волны с увеличением амплитуды. Другой посылкой для проведения наших исследований послужила экспериментальная работа по изучению микропластичности, показавшая многоуровневый характер соотношений напряжение—деформация $\sigma(\varepsilon)$, при котором возможны все варианты зависимости модуля упругости от деформации (рост, падение, постоянство) [5]. Сначала мы рассмотрим краткую историю вопроса амплитудной зависимости скоростей волн, выполненных в теоретическом и экспериментальном плане, а затем перейдем к изложению наших экспериментов.

Данных по прямым измерениям зависимости скоростей волн от амплитуды в литературе приводится немного. В основном имеются косвенные данные в виде экспериментальных диаграмм $\sigma(\varepsilon)$ и зависимости декрементов затухания от деформации, по которым можно судить об амплитудной зависимости скорости волны. Так, при изучении деформации песчаников и кварцитов были получены кривые $\sigma(\varepsilon)$, из которых

следовало возрастание модуля (скорости) с увеличением напряжения и деформации [8]. Авторы работы [2], изучая затухание и скорости волн в песчаниках, получили уменьшение V_p с амплитудой при $\varepsilon > 10^{-6}$. Декремент затухания в том же диапазоне деформаций возрастает. Позже другими авторами было подтверждено уменьшение V_p с амплитудой в песчаниках [1].

Однако имеются данные, которые не укладываются в известные представления. Изучение скоростей волн в песчанике при давлении до 50 МПа показало незначительное отклонение этих величин при изменении амплитуды на порядок [9]. Уменьшение затухания с увеличением амплитуды в доломитах получено авторами [10]. Полевые измерения в приповерхностном грунте ($f \sim 500$ Гц) показали увеличение V_p с увеличением амплитуды и незамкнутый гистерезис скорости волны [11]. Изучение амплитудной зависимости скоростей волн в доломитах при одноосном давлении до 60 МПа показывает увеличение скорости волны при увеличении амплитуды [12]. В работе показан различный характер амплитудной зависимости для скорости волны, определяемой по первому вступлению и по первому максимуму импульса.

Резюмируя данные исследований по амплитудной зависимости скорости и затухания, можно сделать вывод, что в большинстве случаев для песчаников скорость с увеличением амплитуды уменьшается, а затухание увеличивается. Это совпадает с данными обобщающих работ [13, 14], где также описываются скачки модуля упругости на конечных точках диаграммы $\sigma(\varepsilon)$.

Статья посвящена экспериментальному исследованию амплитудной зависимости скоростей продольных акустических волн и коэффициента поглощения в консолидированных песчаниках, находящихся под гидростатическим давлением.

МЕТОДИКА И АППАРАТУРА

Модель для изучения упругих волн в образцах горных пород представляет собой трехслойную среду. Первый и третий слои выполнены в форме цилиндра из одного и того же материала (бериллиевой бронзы). Это обеспечивает одинаковое отражение продольных и поперечных волн на границах. Между этими слоями располагается образец породы. Возбуждение и прием ультразвуковых колебаний ($f \sim 1$ МГц) осуществлялся жестко закрепленными на акустической головке пьезоэлементами, поляризованными на продольную и поперечную волну. Пьезоэлементы из керамики изготовлены в виде таблеток. Каждый пьезоэлемент является совмещенной приемоизлучающей парой, обеспечивающей возбуждение и прием продольных или поперечных волн в образце. Такая модель позволяет изучать скорости и поглощение продольных и поперечных волн в образцах горных пород на отраженных волнах при контролируемом статическом давлении. Давление также обеспечивает постоянство контактных условий на границах раздела акустическая головка—образец—акустическая нагрузка. Измерения проводились при гидростатическом давлении 20 МПа, которое поддерживалось с точностью 2 %.

На пути прохождения импульса от источника до приемника укладывается более десяти длин волн, поэтому можно считать, что в данном случае речь не идет об эффектах в ближней зоне источника излучения. Кроме того, амплитуда импульса является достаточно малой (порядка 10^{-6}) и не достигает величин деформаций, которые имеют место в ближней зоне излучателя.

Относительную погрешность измерения скорости можно оценить по формуле [15]:

$$dV/V = dH/H + dT/T,$$

где H — толщина образца; T — разность времен вступлений волны; dH , dT — абсолютные ошибки измерения соответственно H и T . Для образцов с $H \sim 20$ мм и $T \sim 12$ мкс величины $dH/H \sim 0,05$ % и $dT/T \sim 0,15$ %. Для контроля влияния акустического контакта между преобразователем и образцом помещалась пленка из фторопласта или полиэтилена. Результаты измерений с применением этих методов показали, что расхождение значений скоростей не превышает 0,2 %. Эта величина определяет точность измерения скоростей волн в наших экспериментах. Вычисление скорости волны проводилось путем измерения разницы времен между первым максимумом отраженного импульса и первым минимумом импульса на входе образца. Однако, поскольку главная цель наших экспериментов состоит в установлении влияния амплитуды на скорость волны и поглощение, то нас интересует не абсолютная точность измерения скорости, а относительная точность, которая намного выше абсолютной. По крайней мере, изменения скорости волны под влиянием амплитуды, превышающие погрешность измерения в три—пять раз можно принимать за результат.

Отличительной особенностью используемой методики является получение амплитудной зависимости скорости и поглощения при изменении амплитуды по циклическому закону. Амплитуда импульса увеличивается дискретно от минимальной величины до максимальной, а затем уменьшается до исходного значения. На каждом значении амплитуды измеряются скорость волны и коэффициент поглощения.

В качестве объекта изучения использовался нивагальский песчаник, отобранный с глубины около 3 км. Он состоит на 70 % из мелкозернистого песчаника и на 30 % из крупнозернистого алевролита, кварц доминирует, присутствует полевой шпат. Плотность породы — $2,36 \text{ г/см}^3$, общая пористость — 13 %. Эксперименты проводились на сухом песчанике при комнатной температуре.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Перед тем как перейти к изучению влияния амплитуды на скорость волны и поглощение были проведены эксперименты по определению погрешности измерения этих параметров. Для этого проводилось множество дублирующих измерений на одном и том же образце при неизменном давлении (20 МПа) и постоянной амплитуде излучаемого импульса. Один цикл измерений включал 14 определений скорости волны и столько же — коэффициента поглощения. С целью проверки стабильности полученных данных проводилось повторение циклов измерения два—три раза через 10 мин. На рис. 1 представлен график, показывающий разброс скорости продольной волны в трех циклах измерения, сделанных в течение получаса. Максимальный разброс величин V_p составляет 0,2 %. Эта величина определяет возможности нашей аппаратуры по измерению отклонения скорости продольной волны за счет изменения амплитуды. Следует еще раз подчеркнуть, что в данном случае нас не интересует точность измерения абсолютной величины скорости волны, а нам важно выяснить имеется ли изменение скорости волны при изменении амплитуды по сравнению с постоянной амплитудой.

Погрешность измерения коэффициента поглощения определялась тем же методом, что и скорость волны (рис. 2). Повторные циклы измерений (14 последовательных измерений) на одном и том же образце при неизменном давлении и амплитуде дают отклонение α_p на средней величине амплитуды не более 1 %, а на максимальной амплитуде — около 0,3 %.

Зависимость скорости волны от амплитуды импульса определялась следующим образом. На фиксированном всестороннем давлении (20 МПа) проводилось измерение скорости волны на амплитудах, дискретно изменяющихся по циклическому закону. Амплитуда увеличивалась от минимальной до максимальной величины и затем уменьшалась в том же порядке. Минимальная и максимальная амплитуды различаются в 6 раз. В диапазоне амплитуд $\varepsilon_d \sim (0,3 - 2) \cdot 10^{-6}$ обнаружено увеличение V_p с увеличением амплитуды, которое составляет 0,6 % (рис. 3). Необходимо заметить, что на меньших амплитудах скорость волны не зависит от амплитуды, а увеличение скорости происходит только по мере достижения максимальной амплитуды. Гистерезис скоростей практически отсутствует. Повторные амплитудные кривые сдвигаются относительно друг друга. Возможная причина такого явления состоит в изменении статического давления после цикла измерений. Другая причина сдвига кривых может быть вызвана процессом релаксации. Однако точное определение механизма этого явления требует проведения дополнительных исследований.

Зависимость коэффициента поглощения α_p от амплитуды получена по той же методике, что и для скорости волны. В этом же амплитудном диапазоне наблюдается уменьшение поглощения до 18 % с

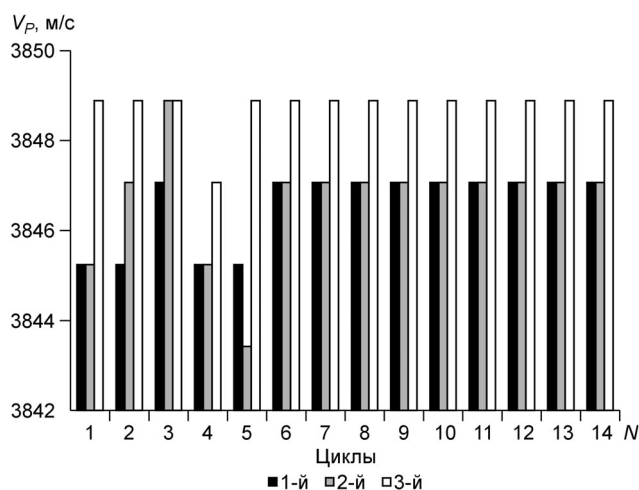


Рис. 1. Скорость продольной волны на постоянной амплитуде для 14 последовательных измерений (N) в трех дублирующих циклах.

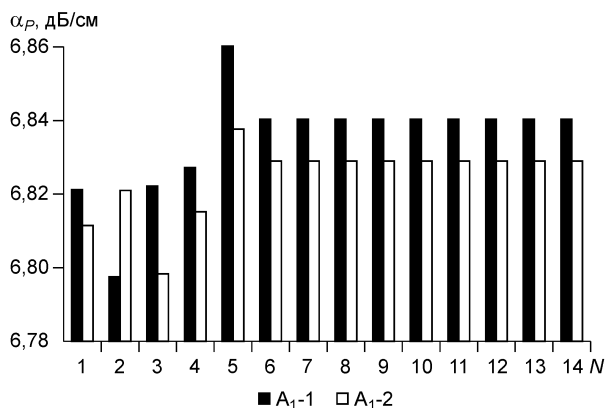


Рис. 2. Коэффициент поглощения продольной волны.

Измерения на постоянной амплитуде: 14 последовательных измерений, два дублирующих цикла.

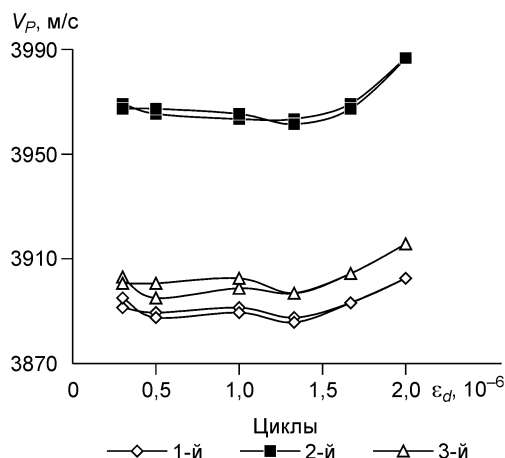


Рис. 3. Скорость продольной волны при циклическом изменении амплитуды.

Три дублирующих цикла.

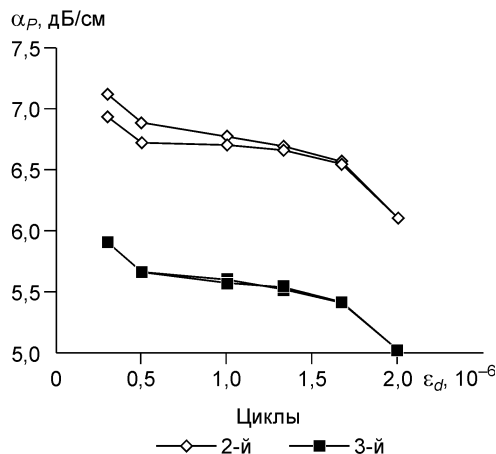


Рис. 4. Коэффициент поглощения продольной волны при циклическом изменении амплитуды.

Два дублирующих цикла при идентичных условиях, как для скорости волны на рис. 3.

увеличением амплитуды (рис. 4). Имеется качественное соответствие между амплитудными характеристиками скорости волны и коэффициента поглощения. Увеличению скорости волны с амплитудой соответствует уменьшение поглощения. Однако количественные показатели указывают на явное преимущество параметра поглощения. Гистерезис поглощения мал или отсутствует. Повторная кривая поглощения сдвигается в сторону меньшего поглощения, соответствуя тому, что скорость возрастает. Уменьшение поглощения свидетельствует о повышении жесткости породы после цикла динамического воздействия. Повышение динамического модуля упругости характерно для породы, имеющей положительную кривизну на диаграмме напряжение—деформация [6, 7].

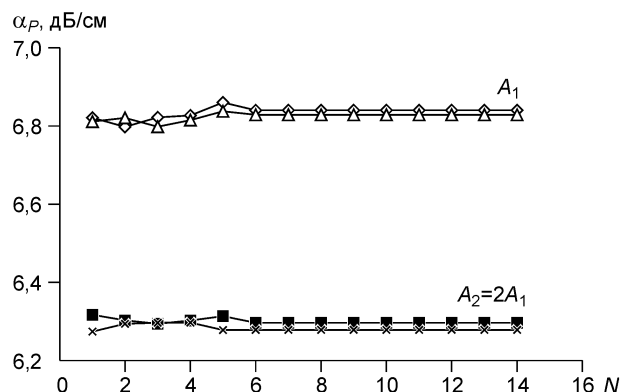
Изменение коэффициента поглощения с амплитудой можно продемонстрировать на другом примере (рис. 5). На том же песчанике в тех же условиях сначала проводилось 14 последовательных измерений α_p на амплитуде A_1 . Потом, не меняя условий, проводилось столько же измерений на амплитуде, в два раза превышающей первую: $A_2 = 2A_1$. В результате видно, что с увеличением амплитуды коэффициент поглощения уменьшился на 8%. Этот эксперимент подтверждает факт уменьшения поглощения с увеличением амплитуды, полученный ранее при циклическом изменении амплитуды.

ВЫВОДЫ, ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы. Подтвердился известный факт изменения скорости волны в зависимости от величины амплитуды распространяющегося импульса. Такая зависимость возникает на амплитудах порядка 10^{-7} — 10^{-6} . Однако существенным отличием наших результатов от известных является совершенно другой характер амплитудной зависимости скорости волны и коэффициента поглощения. Он выражается в том, что с увеличением амплитуды скорость продольной волны возрастает, а коэффициент поглощения падает. Это свидетельствует об увеличении жесткости породы и ее добротности при возрастании величины прикладываемой энергии. В используемом диапазоне амплитуд изменения параметра поглощения на порядок выше, чем изменения скорости волны. Таким образом, параметр поглощения обладает большей чувствительностью к вариациям амплитуды, чем скорость волны.

Рис. 5. Коэффициент поглощения продольной волны.

Измерения на двух амплитудах, отличающихся в два раза: 14 последовательных измерений по 2 дублирующих цикла.



Поскольку эти результаты противоречат большинству известных фактов, необходимо дать предполагаемое объяснение этому явлению. Как известно, главной теоретической компонентой в статическом и динамическом изучении является уравнение состояния (соотношение напряжение — деформация). Согласно современным теоретическим работам, реальные породы имеют кривые напряжение—деформация с отрицательной и положительной кривизной [6, 7]. Характер этих кривых определяет поведение соотношений статический модуль—напряжение и динамический модуль—напряжение. Последнее соотношение входит в уравнение движения и определяет поведение скорости волны в зависимости от напряжения и деформации. Поэтому теоретически возможно как уменьшение скорости волны с напряжением, так и ее увеличение. Что касается зависимости динамического модуля (скорости волны) от амплитуды, то здесь характер кривизны также должен играть свою роль. Динамическая кривая напряжение—деформация определяет характер зависимости скорости волны от амплитуды.

Физические причины, которые обуславливают положительную кривизну соотношения $\sigma(\epsilon)$, рассмотрены в работе [16]. Вклад неупругой компоненты в общую деформацию изменяется в ту или иную сторону в зависимости от величины амплитуды. Такое поведение характерно, по крайней мере, для микропластической компоненты. Уменьшение неупругой компоненты с амплитудой, хотя бы только за счет микропластичности, дает увеличение модуля упругости (скорости волны).

Таким образом, можно отметить два основных результата. 1. Обнаружение возрастающей амплитудной зависимости скорости продольной волны и, соответственно, падающей амплитудной зависимости коэффициента поглощения. 2. Большую амплитудную чувствительность параметра поглощения.

Эксперименты показывают сложность нелинейного поведения пород с включением „в работу“ амплитудного фактора. Мы предполагаем, что полученными данными возможности нелинейных проявлений не исчерпаны. Здесь мы почти не коснулись характеристик гистерезиса, хотя его проявления были также замечены. Это большая тема для дальнейших исследований. Другой важный аспект этой проблемы касается экспериментов с флюидонасыщением. Изучение амплитудных эффектов в насыщенной породе представляет не только фундаментальный, но и большой прикладной интерес. Таким образом, имеется большой простор деятельности в направлении, перспективном для решения задач прогнозирования геологического разреза сейсмическими методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Johnston D.H., Toksöz M.H.** Thermal cracking and amplitude dependent attenuation // *J. Geophys. Res.*, 1980, v. 85, p. 937—942.
2. **Winkler K.A., Nur A., Gladwin M.** Friction and seismic attenuation in rock // *Nature*, 1979, v. 274, p. 528—531.
3. **Xu H., Day S.M., Minster J.-B.H.** Model for nonlinear wave propagation derived from rock hysteresis measurements // *J. Geophys. Res.*, 1998, v. 103, B 12, p. 29915—29929.
4. **Машинский Э.И.** Процессы квазимикропластичности и нелинейная сейсмика // *Физика Земли*, 1994, № 2, с. 3—10.
5. **Машинский Э.И.** Нелинейность квазистатической связи напряжение—деформация: зависимость от уровня механической энергии // *Геофизика*, 2001, № 2, с. 37—41.
6. **McCall K.R., Guyer R.A.** Equation of state and wave propagation in hysteretic nonlinear elastic materials // *J. Geophys. Res.*, 1994, v. 99, B 12, p. 23887—23897.
7. **Guyer R.A., McCall K.R., Boitnott G.N.** Hysteresis, discrete memory and nonlinear wave propagation in rock: a new paradigm // *Phys. Rev. Lett.*, 1995, v. 74, № 17, p. 3491—3494.
8. **Cook N.G.W., Hodgson K.** Some detailed stress-strain curves for rock // *J. Geophys. Res.*, 1965, v. 70, № 12, p. 2883—2888.
9. **Stewart R.R., Toksöz M.N., Timur A.** Strain dependent attenuation: observations and a proposed mechanism // *J. Geophys. Res.*, 1983, v. 88, B 1, p. 546—554.
10. **Машинский Э.И., Дьяков Г.Н.** Амплитудно-зависимое затухание импульсных сигналов в горных породах // *Физика Земли*, 1999, № 11, с. 63—67.
11. **Машинский Э.И., Кокшаров В.З., Нефедкин Ю.А.** Амплитудно-зависимые эффекты в диапазоне малых сейсмических деформаций // *Геология и геофизика*, 1999, т. 40, с. 615—622.
12. **Mashinskii E.I.** The variants of the strain-amplitude dependence of elastic wave velocities in the rocks under pressure // *J. Geophys. Engin.*, 2004, v. 1, № 4, p. 295—306.
13. **Tutuncu A.N., Podio A.L., Gregory A.R., Sharma M.M.** Nonlinear viscoelastic behavior of sedimentary rocks, Part I: Effect of frequency and strain amplitude // *Geophysics*, 1998, v. 63, № 1, p. 184—194.
14. **Tutuncu A.N., Podio A.L., Sharma M.M.** Nonlinear viscoelastic behavior of sedimentary rocks, Part II: Hysteresis effect and influence of type of fluid on elastic moduli // *Geophysics*, 1998, v. 63, № 1, p. 195—203.

15. **Королев М.В., Карпельсон А.Е.** Широкополосные ультразвуковые пьезопреобразователи. М., Машиностроение, 1982, 274 с.
16. **Машинский Э.И.** Физические причины различия статических и динамических модулей упругости горных пород // Геология и геофизика, 2003, т. 44, с. 953—959.

*Рекомендована к печати 25 февраля 2005 г.
С.В. Гольдиным*

*Поступила в редакцию
27 января 2004 г.*