

УДК 550.34.016

Д.В. Шмурак¹

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА ПОГЛОЩЕНИЯ ПРИ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ В СКВАЖИНАХ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ИСКУССТВЕННЫХ ГРУНТАХ

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

Контроль качества скрытых работ в искусственных грунтах — актуальная проблема в строительстве. Сейсмоакустические методы получили широкое распространение при ее решении. Данные сейсмоакустического каротажа в искусственных грунтах (выполненных по технологии струйной цементации) подвергнуты автором обработке с целью извлечения дополнительной информации о распределении неоднородностей в искусственном грунте. Для оценки параметра поглощения были применены метод спектральных отношений и метод сдвига центральной частоты.

Ключевые слова: сейсмоакустика, искусственные грунты, струйная цементация, контроль качества, сейсмическое поглощение, Q -фактор.

Quality control in geotechnical engineering is becoming an important issue, especially when products are buried underground. Seismoacoustic methods are widely used for investigations in such structures. In this article seismoacoustic well logs from hidden structures (made by jet grouting technology) are being processed with the goal of obtaining additional information about distribution of heterogeneities in improves grounds. Two methods of estimation Q -factor are used: frequency shift method and amplitude ratios method.

Key words: seismoacoustics, ground improvement, jet grouting, quality control, seismic attenuation, quality factor.

Введение. В центре внимания находились так называемые искусственные грунты, в последнее время применяемые в строительстве все чаще. Технология струйной цементации заключается в разрушении исходного природного грунта высоконапорной струей цементного раствора с одновременным его перемешиванием и частичным замещением грунта цементным раствором. В результате в грунтовом массиве образуются колонны из композитного материала — цемента-грунта, обладающего высокими прочностными и деформационными характеристиками.

Получающиеся в результате грунтоцементные сваи широко применяются при решении ряда геотехнических задач в подземном строительстве, таких, как устройство противофильтрационных конструкций, ограждающих и несущих конструкций, свай и свайных оснований и др. При решении задач такого рода встает вопрос о контроле качества цементации. Качественно выполненную грунтоцементную конструкцию можно считать однородной, поэтому при исследовании геофизическими методами решается задача выявления существенных неоднородностей, которые можно считать дефектами. Таким образом, автором пред-

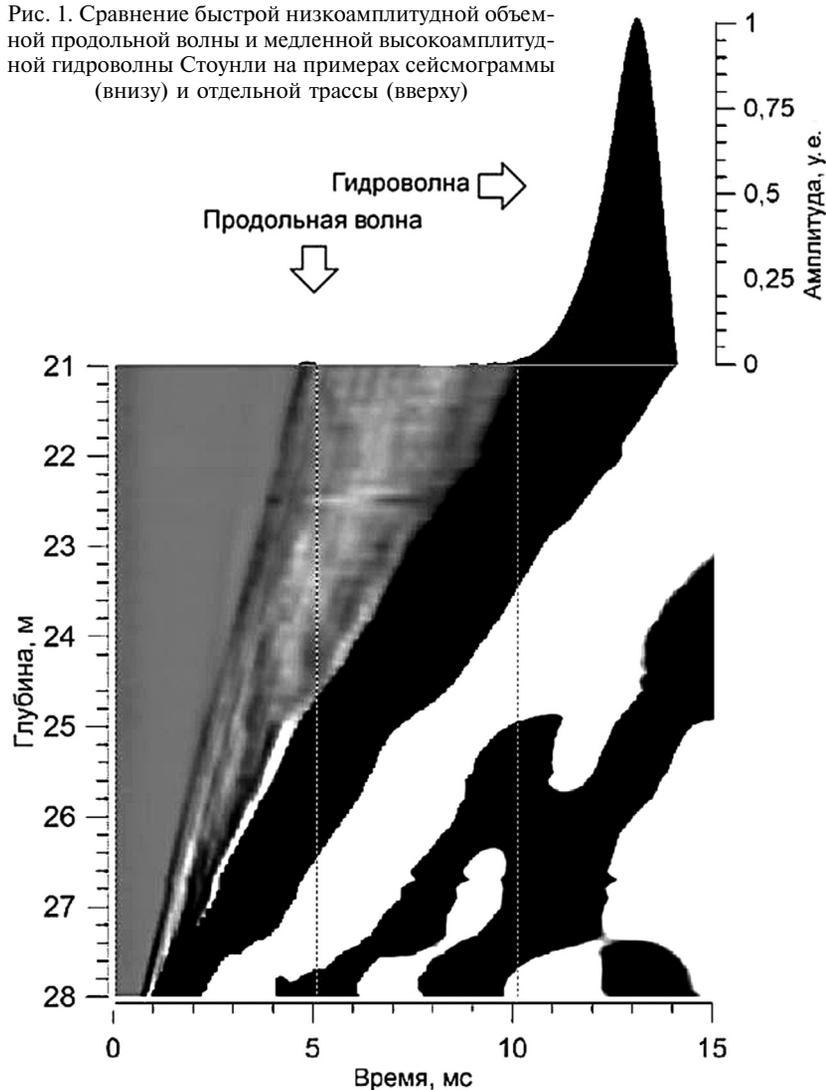
принята попытка определить степень неоднородности массива с целью выявления дефектов.

Для получения информации о строении и свойствах грунтов в массивах, залегающих на значительной глубине, успешно используется вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП) в одиночных скважинах с импульсными источниками возбуждения колебаний. Скважинные сейсмоакустические исследования дополняются измерением значений скорости упругих волн на образцах керна. Физическая основа использования сейсмических методов в инженерной геологии основана на зависимости скорости распространения упругих волн в грунтах от их строения, литологического состава и прочности структурных связей.

Установленные закономерности распространения упругих волн в массиве грунтов позволяют выделять неоднородности строения, а на основе установленных корреляционных зависимостей между геофизическими и геотехническими параметрами оценивать деформационные и прочностные характеристики грунтов в массиве, что часто применяется в строительстве. Строительство — важная составляющая хозяйственной деятельности человека, поэтому повышение эффективности сейсмиче-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, аспирант; e-mail: shmouraque@gmail.co

Рис. 1. Сравнение быстрой низкоамплитудной объемной продольной волны и медленной высокоамплитудной гидроволны Стоунли на примерах сейсмограммы (внизу) и отдельной трассы (вверху)



ся в некоторой точке пространства, а приемник (или гирлянда приемников) перемещается вдоль ствола скважины с некоторым шагом. При этом регистрируется волновая картина, содержащая большой набор волн разных типов, анализируя которые можно получить различную информацию о среде.

Как показали практические исследования, выполняемые на протяжении многих лет, существенно улучшить качество материала, повысить точность выдаваемой информации, а также получить дополнительные сведения можно, применив другие типы источников и приемников, а именно электроискровой спаркер и датчик давления.

Электроискровой спаркер позволяет поднять частоту сигнала от 30–100 до 500–1500 Гц, а датчик давления в водонаполненной скважине позволяет их зарегистрировать. Это кардинально меняет разрешающую способность метода. Надежно выделяются отражения от слоев мощностью от 0,5 м и более [Владов, Ошкин, 2008].

Два целевых типа волн, регистрируемых при применении этой методики, — высокочастотная продольная объемная волна и низкочастотная поверхностная гидроволна Стоунли, распространяющаяся вдоль

стенки водонаполненной скважины (рис. 1).

ских методов, применяющихся при строительных работах, весьма актуально.

Скважинные исследования в инженерной геофизике — достаточно редкий вид изысканий, технологией выполнения которых владеет немного специалистов и организаций. Поэтому, возможно, сейсмокаротаж (СК) и вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП) в неглубоких скважинах на данный момент фактически находятся на той же стадии развития, что и 30–40 лет назад [Ошкин, Хуснуллина, 2015]. Между тем в нефтяной сейсморазведке уровень развития акустических и сейсмических методов исследования скважин позволяет получать множество сведений как о свойствах горных пород, так и о строении среды. При таком положении дел перенос технологий из нефтяной сейсморазведки в инженерную представляется наиболее логичным и перспективным способом развития. Однако в силу большого количества особенностей малоуглубинных исследований выполнить этот перенос методом точного копирования практически никогда не получается.

При вертикальном сейсмическом профилировании в большинстве случаев источник фиксирует-

стенки водонаполненной скважины (рис. 1).

Расчет параметра поглощения. Описанная выше методика позволяет определять скорость поперечных волн в среде, не прижимая датчик к стенке скважины, через скорость гидроволны благодаря связи, описанной Уайтом (при выполнении исследований в необсаженных скважинах в малопроницаемых породах):

$$v_s = \sqrt{\frac{f}{\rho \left(\frac{1}{v_{st}^2} - \frac{1}{v_f^2} \right)}}$$

где f — плотность скважинного флюида, ρ — плотность породы, v_{st} — скорость гидроволны, v_f — скорость звука в скважинном флюиде.

С учетом того, что параметры скважинного флюида легко определяются, а плотность породы находится под знаком радикала, а значит, высокая точность ее определения не столь важна, определение значений скорости поперечных волн не вызывает больших затруднений.

Другая модификация сейсмоакустических исследований скважин — сейсмоакустический

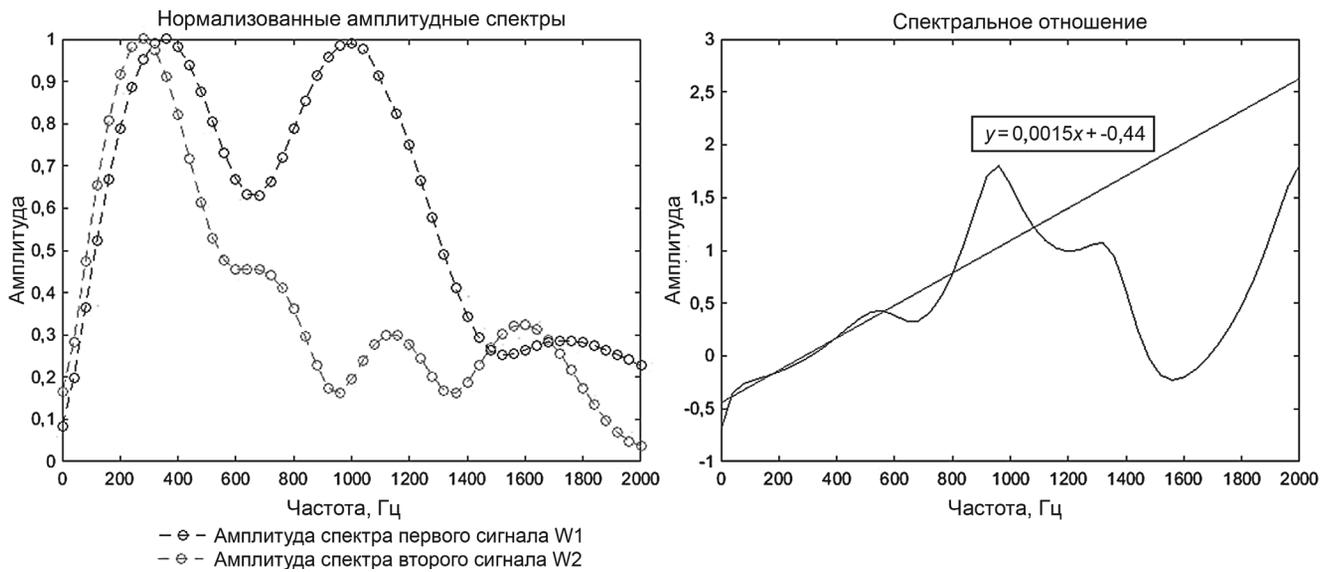


Рис. 2. Пример расчета Q -фактора. В диапазоне частот 100–500 Гц график логарифма отношения спектров можно аппроксимировать прямой

каротаж. Эта методика предполагает использование тех же спаркера и приемника, только в данном случае расстояние между источником и приемником жестко фиксируется. Это позволяет получить несколько иную форму представления данных и дополнить информацию, полученную методом ВСП. Использование постоянной базы значительно упрощает вид волновой картины. В таком виде ее может интерпретировать неспециалист, так как время прихода волны здесь обратно пропорционально скорости волны.

Однако помимо исследования кинематических характеристик (время прихода и скорости) волнового поля, принимаются во внимание также динамические характеристики записей. Использование динамических атрибутов для решения задач определения сплошности грунтового массива и его прочностных характеристик выглядит перспективным ввиду того, что в динамике сейсмических трасс содержится дополнительная информация о среде.

Сейсмические волны, проходящие через неупругую среду, испытывают поглощение — ослабление и дисперсию их скорости из-за неупругости и неоднородности среды [Aki, Richards, 1980]. Вопросы исследования возможностей использования динамики в сейсморазведке на настоящий момент остаются открытыми; особенно это касается инженерной сейсморазведки. Таким образом, необходимо повысить эффективность сейсмических методов при исследованиях искусственных и естественных грунтов, которые все чаще применяются по мере увеличения объема строительства. Для описания степени поглощения в среде используются такие свойства, как добротность среды (Quality factor — Q) и параметр поглощения β_0 , связанные между собой соотношением $\beta_0 = 1/(2QV)$.

В явлении сейсмического поглощения выделяются две составляющие: рассеивание и непосредственно само поглощение (внутреннее). Рассеивание вызвано объемными неоднородностями, которые много меньше длины волны; внутреннее поглощение вызывается трением между зёрнами в матрице породы, а также связано с движением порового флюида в твердом скелете. Считается, что внутреннее трение и поток флюида напрямую связаны с пористостью породы, типом флюида и насыщенностью в пустотном пространстве.

Методы для оценки значений Q для наземных условий регистрации сейсмических данных развиты достаточно широко. В частности, опубликованы некоторые исследования относительно оценки Q -фактора для вертикального сейсмического профилирования (ВСП) и наблюдений в скважинах [Тонн, 1991]. Среди большого числа опубликованных алгоритмов оценки добротности особо выделяется метод спектральных отношений, разработанный Т. Спенсером [Spencer, 1982]. С помощью сравнения амплитудных спектров на двух временах прихода волн t_1 и t_2 соответственно можно представить отношение двух амплитудных спектров следующим образом:

$$\frac{B(f, t_2)}{B(f, t_1)} = \frac{B(f) e^{-\frac{\pi f t_2}{Q}}}{B(f) e^{-\frac{\pi f t_1}{Q}}}$$

Взяв логарифм от этого выражения, получим:

$$\ln \left[\frac{B(f, t_2)}{B(f, t_1)} \right] = -\frac{\pi(t_2 - t_1)}{Q} f$$

Изобразив график логарифма спектрального отношения как функцию от частоты, можно аппроксимировать график этой функции линейной

зависимостью на конечном диапазоне частот. С помощью получаемого таким образом коэффициента наклона аппроксимирующей прямой p параметр Q можно рассчитать следующим образом:

$$Q = -\frac{\pi(t_2 - t_1)}{Q}$$

Метод спектрального отношения достаточно прост, однако на практике определение значения Q -фактора осложнено наличием интерференции, возможных шумов и помех на записях. Кроме того, линейный тренд часто весьма неочевиден, и в таких случаях требуется коррекция наблюдаемых значений для приведения описываемой функции к линейному виду. Пример расчетов Q -фактора приведен на рис. 2.

В работе [Quan, Harris, 1997] представлен другой метод для оценки сейсмического поглощения, который основан на сдвиге доминантной частоты, наблюдаемой на данных ВСП с глубиной. Авторы указанной работы выявили связь между фактором Q и доминантными частотами в спектрах сигналов до и после прохождения некоторого расстояния в среде, обусловленную сдвигом доминантной частоты спектра сигнала влево во время прохождения через вязкоупругую среду. В основе метода лежит идея о том, что амплитудный спектр сигнала источника может быть достаточно хорошо аппроксимирован неким аналитическим выражением. Например, первый лепесток спектра аппроксимируется спектром импульса Рикера. Спектр последнего может быть задан по следующей формуле, где f_m — доминантная или пиковая частота:

$$B(f) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{f^2}{f_m^2} e^{-f^2/f_m^2}$$

Путем несложных расчетов можно вывести выражение для Q -фактора:

$$Q = \frac{\pi(t_2 - t_1) f_{p_2} f_{p_1}^2}{2(f_{p_1}^2 - f_{p_2}^2)}$$

В представленном выражении за основу принимается амплитудный спектр импульса Рикера. В зависимости от сходства с наблюдаемыми амплитудными спектрами на реальных данных можно применять другие модели сигналов, например Гауссовский спектр дисперсии.

Серьезное преимущество метода сдвига доминантной частоты по отношению к методу спектральных отношений заключается в значительном снижении требований к качеству исходного сигнала, которое достигается за счет принятия новых допущений о сигнале, а именно — первый лепесток спектра сигнала можно аппроксимировать аналитическим выражением. Это становится особенно важно в случае, когда данные сильно

зашумлены, и увидеть целый импульс не представляется возможным, что достаточно часто происходит на практике.

Чтобы определить, насколько корректно описывать реальные спектры аналитическими функциями, можно применить следующий подход. На первом этапе проводится подготовка реальных данных — для одной из скважин, в которой выполнялся сейсмоакустический каротаж в грунтоцементном массиве (который, за исключением дефектов, можно считать однородной средой), потрассно рассчитываются спектры отдельно для гидроволн и для объемных продольных волн. Затем к каждому спектру (с точки зрения метода наименьших квадратов) приближается аналитическое выражение спектров Рикера и Гаусса и рассчитывается невязка — в качестве метрики можно выбрать среднюю абсолютную ошибку (mean absolute error):

$$MAE = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l |a(x_i) - y_i|$$

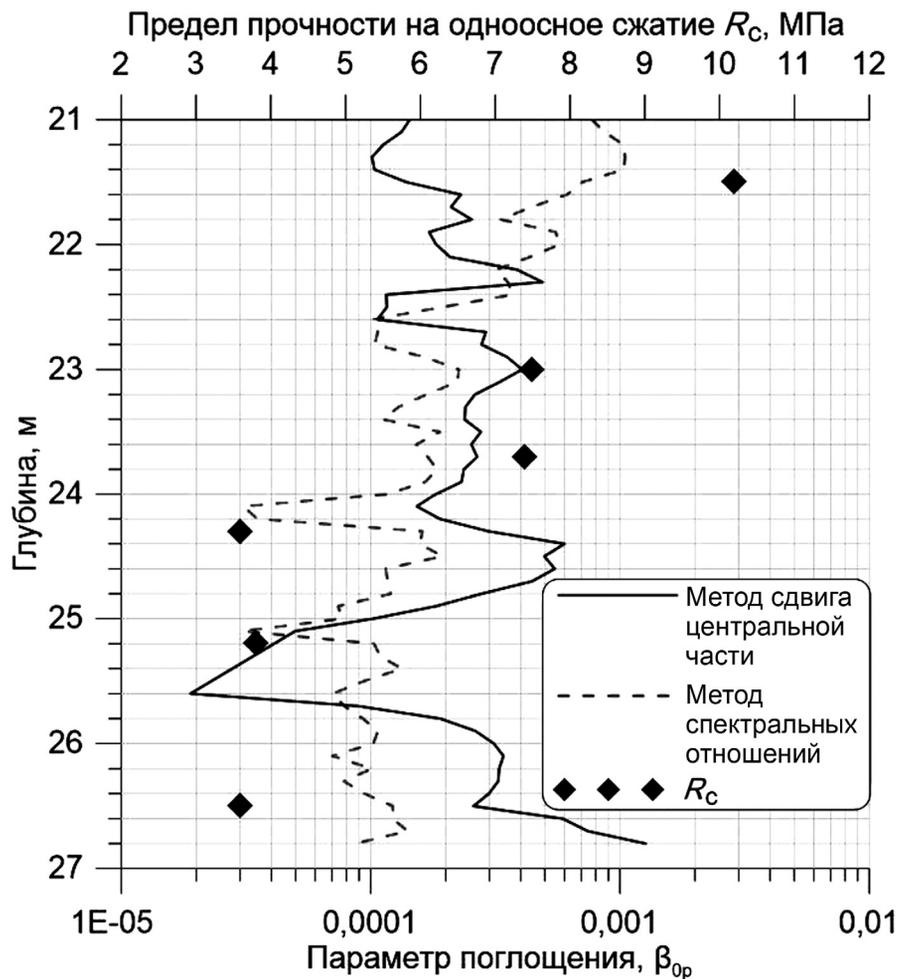
Выбрав допустимый порог ошибок, можно без труда рассчитать Q -фактор для соответствующих участков разреза. Кроме того, графики ошибок могут оказаться полезны сами по себе, так как большие ошибки свидетельствуют о том, что и спектр соответствующего сигнала имеет сложную форму.

Пример расчета параметра поглощения β_{0p} двумя разными методами, описанными выше, приведен на рис. 3. В задаче выделения существенных неоднородностей в искусственно созданном массиве параметр поглощения становится более удобным из-за того, что при интерпретации уже не так важно, с чем именно связано изменение его значений, а важно само наличие неоднородностей, свидетельствующих о качестве цементации; при этом параметр поглощения представляет собой гораздо более чувствительную характеристику грунта по сравнению с кинематическими характеристиками, такими, как значения скорости и связанные с ними атрибуты, так как параметр поглощения изменяется на несколько порядков, а не в несколько раз, как значения скорости.

Приведенный пример также позволяет наглядно продемонстрировать преимущества сейсмоакустики по отношению к натурным инженерным испытаниям, предоставляющим информацию о свойствах исследуемого массива со значительно меньшей детальностью.

Заключение. Акустические записи, получаемые в ходе выполнения каротажа, позволяют получить физические параметры среды. Помимо кинематических характеристик, с помощью которых можно рассчитать значения скорости и динамические модули, есть возможность определять параметр поглощения, особенно информативный при исследованиях искусственных грунтов.

Рис. 3. Пример расчета параметра поглощения методами сдвига центральной частоты и спектральных отношений в сравнении с независимыми испытаниями на образцах



Эти выводы справедливы для линейной модели среды, линейной теории распространения волн (малых напряжений и деформаций), в то время как расположение источника и приемника с большими энергиями разряда на малом расстоянии нуждается в дополнительном исследовании.

Богатый арсенал инструментов, применяемых для расчета поглощения, отнюдь не исчерпывается

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Владов М.Л., Ошкин А.Н. Опыт использования сейсмоакустических исследований водонаполненных скважин в составе инженерно-геологических изысканий // Тез. докл. СПб., 2008, 3-я Междунар. геол.-геофиз. выставка. СПб., 2008.

Ошкин А.Н., Хуснуллина Г.Ф. Возможности и перспективы сейсмоакустических исследований скважин // Технологии сейсморазведки. 2015. № 1. С. 92–98.

Aki K., Richards P.G. Quantitative seismology-theory and methods. San Francisco: W.H. Freeman, 1980.

приведенными примерами, но и описанных методов вполне достаточно, чтобы проиллюстрировать возможность использования динамических характеристик сейсмических записей в инженерной сейсморазведке для получения дополнительной информации о среде.

Quan Y., Harris J.M. Seismic attenuation tomography using the frequency shift method // Geophysics. 1997. Vol. 62. P. 895–905.

Spencer T.W., Sonnad J.R., Butler T.M. Seismic Qstratigraphy or dissipation // Geophysics. 1982. Vol. 47. P. 16–24.

Tonn R. The determination of the seismic quality factor Q from VSP data: a comparison of different computational methods // Geophys. Prospec. 1991. Vol. 39. P. 1–27.

Поступила в редакцию 09.10.2019

Поступила с доработки 26.02.2020

Принята к публикации 26.02.2020