

УДК 550.8.08

О возможности создания роторного источника сейсмических поперечных волн с электромагнитным возбуждением

**В.А. Детков^а, В.В. Слабко^б,
Г.Я. Шайдуров^б, М.А. Копылов^а, А.С. Ципотан^{б*}**
*^а ООО «Эвенкиягеофизика»
ул. Ленинградская 66, Красноярск, Россия, 660074
^б Сибирский федеральный университет,
Россия 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79*

Received 09.06.2012, received in revised form 22.10.2012, accepted 25.02.2013

Использование поперечных волн в сейморазведке дает ряд дополнительных сведений, необходимых для повышения качества прогнозирования месторождений углеводородов. Традиционно используемые источники поперечных волн обладают рядом недостатков, связанных как с плохой воспроизводимостью воздействия, так и с преимущественным возбуждением продольных волн. В статье рассмотрен вариант роторного источника поперечных волн с электромагнитным возбуждением, свободного от указанных недостатков. Приведены оценки необходимых конструктивных параметров этого источника и сопоставление характеристик разрабатываемого источника по сравнению с другими видами аналогичных устройств.

Ключевые слова: сейморазведка, продольные и поперечные волны, геологический разрез, электромагнитный способ возбуждения сейсмических волн.

Введение

В большинстве случаев для разведки используются продольные сейсмические волны, которые позволяют в условиях достаточно простых геологических разрезов с большой степенью вероятности давать прогнозы, обосновывающие проведение детальных и дорогостоящих работ [1]. Однако более сложные геологические условия разрезов, характерные для нефтегазовых провинций Восточной Сибири, требуют появления новых методик проведения сейморазведочных работ и инструментов для их реализации [2]. Особый интерес с этой точки зрения представляет использование поперечных волн и методов их возбуждения, что дает дополнительную информацию о строении геологического разреза и позволяет повысить точность прогнозирования. Последнее возможно при соблюдении ряда дополнительных требований к источнику возбуждения поперечных сейсмических волн: воспроизводимость условий возбуждения и возможность «инверсии» воздействия, т.е. осуществление источником сдвиговых деформаций в двух противоположных направлениях. Очевидно, что взрывные методы возбуждения сейсмических

волн не могут обеспечить выполнения названных выше условий. Кроме того, можно считать также установленным фактом, что ни один из известных способов и тем более ни один источник, осуществляющий реализацию этих способов на практике, не может воспроизвести чистое воздействие типа горизонтально направленной силы, обеспечивающей возбуждение только поперечных волн [1, 3, 4]. Исключение из этого правила может составлять так называемый источник роторного типа, возбуждающий крутильные колебания в геологическом разрезе.

В данной статье рассмотрена возможность создания такого источника поперечных волн с электромагнитным возбуждением [5], обеспечивающего по крайней мере преимущественное возбуждение поперечных волн по сравнению с продольными и удовлетворяющего названным выше требованиям.

Роторный источник поверхностных волн

Принципиальные вопросы, связанные с методами возбуждения поперечных волн с помощью источников, расположенных на поверхности разреза, и инженерными методами их реализации, описаны в ряде хорошо известных публикаций [1–8]. Остановимся более подробно на рассмотрении одной из возможных модификаций так называемого роторного источника поперечных волн, в котором соотношение между амплитудами продольных и поперечных может быть значительно улучшено в сторону преимущественной генерации поперечных волн [3, 4]. Сейсмоисточник представляет собой массивный стальной ротор, на нижней поверхности которого по окружности максимально возможного радиуса жёстко закреплено несколько (обычно 8) клиновидных стальных ножей с углом раствора режущих клиньев около 45° . Возбуждение разреза осуществляется следующим образом. Ротор, закреплённый под транспортным средством на прочной стальной оси специальной конструкции, раскручивается электромотором, приводящим его во вращение посредством фрикционного сцепления пневматического действия. В заданный момент времени сжатый воздух из пневмосистемы сцепления спускается в атмосферу и освобождённый вращающийся ротор падает на поверхность грунта, где резко тормозится клиновидными ножами, внедряющимися в эту поверхность.

Если поверхность достаточно ровная и можно считать, что система равных горизонтальных сил инерции приложена во всех направлениях, перпендикулярных к радиусам на одинаковом расстоянии от оси вращения ротора, то реализуется механический эквивалент точечного центра вращения относительно оси z , нормальной к поверхности грунта. Как известно, такой источник возбуждает в разрезе практически только поперечные сейсмические волны равномерно по всем азимутам. Распределение интенсивности этих волн в произвольной плоскости нормальной к поверхности однородного грунта, определяется выражением [1, 3, 4]

$$U_{s_v} = \frac{R \sin^2 \theta}{2\pi r \beta} H(q), \quad (1)$$

где R – радиус ротора; $H(q)$ – функция, зависящая от q – формы и размеров тормозящих ножей; θ – угол, отсчитываемый от вертикальной оси z ; r – расстояние от источника возбуждения до точки наблюдения; β – величина, характеризующая свойства грунта.

Из (1) следует, что в направлении нормали к поверхности ($\theta = 0^\circ$) такие волны не распространяются (рис. 1). Таким образом, данный сейсмоисточник принципиально отличается от

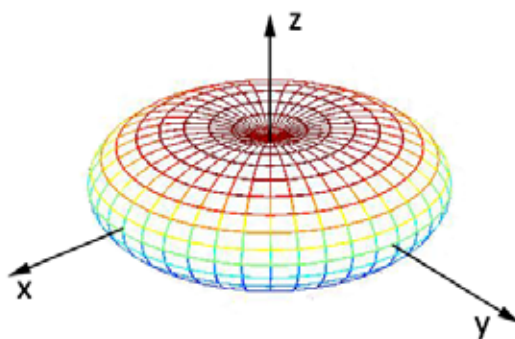


Рис. 1. Диаграмма направленности (амплитуды) поперечной сейсмической волны, возбуждаемой роторным источником

других, возбуждающих как продольные, так и поперечные волны. Его особенностью является малая интенсивность продольных волн по сравнению с интенсивностью возбуждаемых сейсмоисточниками других типов [2, 3, 5]. Источник может работать как в летних, так и в зимних условиях практически при любой толщине снежного покрова. При соответствующем подборе размеров и углов раствора клиновидных ножей сейсмоисточник способен эффективно функционировать в условиях слабых или же мёрзлых грунтов, что исключительно важно в геологических и климатических условиях Сибири.

Описанный выше источник поперечных волн обладает рядом недостатков. Действительно, повторение удара вряд ли обеспечит воспроизводимость воздействия, поскольку поверхностный слой почвы будет разрыхлен тормозящими ножами, что приведет к изменению условий возбуждения при вращении ротора как в том же направлении, так и в противоположном. Кроме того, при падении ротора значительная часть его кинетической энергии будет затрачена на возбуждение продольных волн.

В данной статье представлен роторный источник с электромагнитным возбуждением, принцип действия которого основывается на следующем (рис. 2а). Круглая платформа 1 с минимально возможной массой (моментом инерции) имеет сцепление с поверхностью земли, по возможности одинаковое по всей ее площади, за счет грунтозацепов 3, конструкция которых может быть сменной в зависимости от вида грунта. Над ней помещена подвижная платформа 2, которая может вращаться вокруг оси 4 на подшипниковых опорах 5. На платформе 3 крепятся пригрузки 6, обеспечивающие ей момент инерции, многократно превышающий момент инерции платформы 1, и электромагнитная система 7. При разряде силовой батареи конденсаторов через электромагнитную систему 7 по платформе 1 осуществляется удар по касательной и в среде создается вихревое поле напряжений (рис. 2б). Этот случай соответствует воздействию углового континуума пары сил с моментом.

Математическая модель

Рассмотрим математическую модель роторного источника поперечных волн, позволяющую оценить параметры самого источника с учетом характеристик грунта. Будем исходить из схемы, изображенной на рис. 3, в которой обозначения соответствуют рис. 2а.

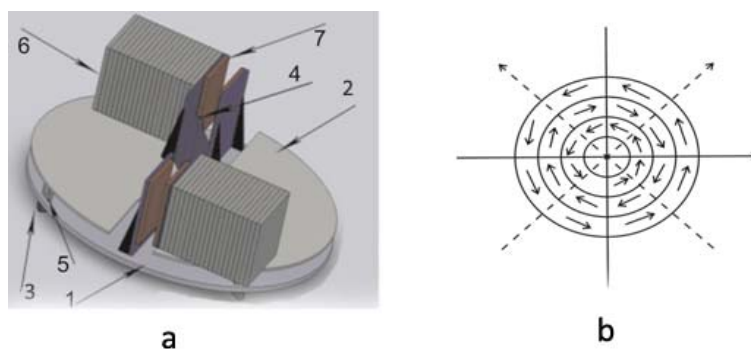


Рис. 2. Роторный электромагнитный источник поперечных волн, *a*: 1 – платформа; 2 – подвижная платформа; 3 – грунтозацепы; 4 – ось вращения; 5 – подшипниковые опоры; 6 – пригрузы; 7 – электромагнитная система; *b*: роторная волна, стрелками указаны направления смещения грунта в фиксированный момент времени

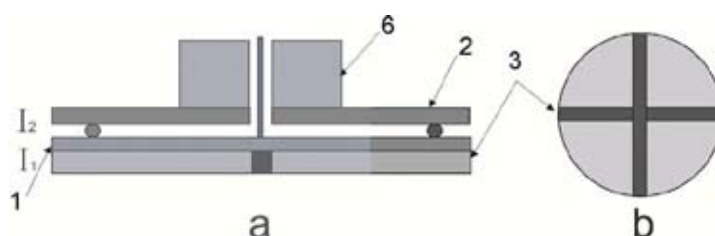


Рис. 3. Эскиз роторного источника: *a* – поперечный разрез, 1 – платформа с моментом инерции I_1 , 2 – подвижная платформа с моментом инерции I_2 , 3 – грунтозацепы, 6 – пригрузы; *b* – вид снизу

Для оценок можно воспользоваться усредненными исходными данными, взятыми из работ [8–11]: предел прочности почвы $\sigma = 30$ МПа, модуль Юнга почвы $E = 2$ МПа, критическая деформация почвы $\Delta_0 = 7\text{--}9$ см, сила, действующая на диски $F = 9,8$ кН, радиус дисков $R = 1,5$ м.

Запишем уравнение динамики совместного движения платформ 1 и 2

$$\begin{cases} \frac{d^2\varphi_2}{dt^2} I_2 = FR \\ \frac{d^2\varphi_1}{dt^2} I_1 = FR - \sum M_{\text{упр}} \end{cases}, \quad (2)$$

где φ_i – угол поворота i -го диска; I_1, I_2 – их моменты инерций; R – радиус дисков.

В области пропорциональности связь между деформацией сдвига и касательным напряжением задается соотношением

$$\sum M_{\text{упр}} = \int_{R-r_1}^R 2\pi r^2 G \gamma dr, \quad (3)$$

где γ – сдвиг верхнего слоя почвы, захваченной грунтозацепами, связанный с деформацией удлинения ε и коэффициентом Пуассона при малых углах поворота следующим соотношением: $\gamma \approx \varepsilon(1 + \mu)$.

В литературе обычно применяют отношение $\mu = c_t / c_l$, где c_t – скорость продольной и c_l – скорость поперечной волны в изотропном пространстве. Этот коэффициент не может быть больше 0,7 [1, 3]. Сдвиговая деформация поверхности почвы, заключенной между двумя грунтозацепами, связана с углом поворота нижней платформы 1: $\varepsilon \approx l - (l + \Delta_n) / l \approx \varphi / \sqrt{2}$, тогда $\gamma = \varphi(1 + \mu) / \sqrt{2}$.

Учитывая связь между модулями Юнга E и сдвига G , получим систему, описывающую совместное движение платформ 1 и 2, которая при ударе по касательной к дискам платформ с силой F на расстоянии от центра вращения R примет вид

$$\begin{cases} \frac{d^2\varphi_2}{dt^2} I_2 = FR \\ \frac{d^2\varphi_1}{dt^2} I_1 = FR - \int_{R-r_1}^R 2\pi r^2 \frac{E}{2(1+\mu)} \frac{\varphi}{\sqrt{2}} (1+\mu) dr = FR - \int_{R-r_1}^R \pi r^2 \frac{E\varphi}{\sqrt{2}} dr. \end{cases} \quad (4)$$

Оценим суммарную площадь грунтозацепов исходя из условия линейности воздействия с тем, чтобы это воздействие не превышало пределов упругости почвы. Из формулы (1) следует, что максимальное давление со стороны грунтозацепов диска на грунт создается в момент, когда раскрутка диска только начинается и упругое сопротивление почвы еще не возникло. Считая, что сила, действующая на диски, достигает своего максимального значения за очень короткий промежуток времени и $R - r_1 \approx 0$, вычислим минимальную площадь грунтозацепов: $S \approx F / \sigma = 3.27 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Таким образом, при выборе площади грунтозацепов следует исходить только из конструктивных соображений, обеспечивающих максимальное сцепление с почвой в пределах упругости.

Другим вариантом зацепления с грунтом является чисто фрикционное зацепление, при котором сила трения покоя подвижной платформы с поверхностью грунта должна превышать силу электромагнитного удара. Очевидно, что в этом случае необходимо оценить массу груза, сила тяжести которого обеспечивала бы выполнение названных выше условий. Легко показать, что с учетом цилиндрической симметрии задачи масса дополнительного груза связана с силой удара простым соотношением

$$mg = \frac{3}{f} F, \quad (5)$$

где f – коэффициент трения покоя, который в соответствии с работами [8, 9] при резиновом покрытии нижней части подвижной платформы, входящей во фрикционное зацепление с грунтом, лежит в пределах: на слежавшейся пахоте – 0,69–0,70; на стерне зерновых, целине – 0,76–0,79.

Таким образом, вес дополнительного груза должен составлять величину в пределах 3,79–4,34 от силы удара. В этом случае необходимо перемещать вместе с роторным источником груз такого веса, который обеспечит достаточно высокий коэффициент передачи энергии в поперечную волну. Возможен другой вариант, связанный с тем, что в качестве груза может использоваться транспортное средство, с помощью которого перемещается роторный источник. При этом необходимо обеспечить надежную механическую развязку между подвижной платформой и транспортным средством, предотвращающую ударное воздействие на ее механизм.

Для оценки эффективности передачи энергии от ударного механизма в поперечную волну важным параметром является соотношение масс платформ 1 и 2, поскольку энергия, запасенная в верхнем диске после удара, в последующем гасится за счет демпфирующего механизма. Для оценки соотношения масс дисков запишем уравнение сохранения моментов инерции и моментов импульсов нижнего и верхнего дисков при условии равномерного распределения массы платформ по их площади.

Для того чтобы кинетические энергии, запасенные в верхнем и нижнем дисках, отличались в n раз $T_1/T_2 = n$, необходимо, чтобы выполнялось следующее соотношение при условии равномерного распределения масс в платформах:

$$\frac{I_1 \omega_1^2}{I_2 \omega_2^2} = \frac{m_2}{m_1} = n. \quad (6)$$

Соотношение (6) может быть выполнено для n порядка 5 при общей массе пригрузов $m = 200\text{--}500$ кг. Приведенные оценки позволяют утверждать, что роторный источник поперечных волн с названными выше параметрами: $F = 9,8$ кН, радиус дисков $R = 1,5$ м, масса пригрузов $m = 200\text{--}500$ кг, может быть создан на базе имеющейся техники.

Заключение

Анализ различных способов реализаций невзрывных источников поперечных волн позволяет выделить роторный источник как источник преимущественно сдвиговых деформаций грунта, а следовательно, и поперечных волн. Использование электродинамического удара даст возможность получить ряд существенных преимуществ предлагаемого источника по сравнению с существующими аналогами роторных источников:

- возбуждение волны в отсутствие помех, обусловленных работой механических систем;
- воспроизводимость воздействия, следовательно, амплитуды и формы волн, возбуждающихся при повторении импульсов;
- возможность «инверсии» фазы поперечных волн при изменении направления удара на противоположное не только улучшает отношение сигнал/шум, но и позволяет создать кодоимпульсный излучатель со знаковым кодированием.

Оптимальным углом для сейсмического наблюдения является угол θ , лежащий в области $13\text{--}15$ градусов, при этом амплитуда волны будет составлять величину 25 % от максимальной. Эта величина оказывается сравнимой с амплитудой волны в направлении нормали к поверхности, возбуждаемой другими источниками поперечных волн (7–10 %) при равных энергиях возбуждения. По этой причине нулевое излучение в направлении к нормали выглядит не столь значительным недостатком, поскольку роторный источник возбуждает преимущественно поперечные волны, в то время как большая часть энергии возбуждения других источников расходуется на возбуждение продольных волн.

Представляется целесообразной разработка действующего образца роторного источника поперечных волн с электромагнитным способом возбуждения для проведения экспериментальных исследований его возможностей на полигоне.

Работа выполнена при финансовой поддержке комплексного проекта П218.

Список литературы

- [1] Куликов В.А., Куликов В.М., Подбережный М.Ю. Многоволновая сейсморазведка: Курс лекций. НГУ, Новосибирск, 2006. С.100.
- [2] Детков В.А., Щадин П.Ю. // Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Новосибирск, 2006. С. 263.
- [3] Пузырёв Н.Н., Тригубов А.В., Бродов Л.Ю. и др. Сейсмическая разведка методом поперечных и обменных волн. М.: Недра, 1985. С. 277.
- [4] Пузырёв Н.Н. Методы и объекты сейсмических исследований. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. С. 302.
- [5] Детков В.А., Ивашин В.В., Федотов И.Г., Шайдуров Г.Я. Пат. РФ № 2372629 (2009).
- [6] Уайт Дж. Возбуждение и распространение сейсмических волн. М.: Недра, 1986. С. 264.
- [7] Шнеерсон М.Б., Майоров В.В. Наземная невзрывная сейсморазведка. М.: Недра, 1988. С. 205.
- [8] Носов С.В., Перегудов Н.Е., Киндюхов Ю.Ю. Пат. РФ № 2366944 (2009) // Б.И. 2009. № 25.
- [9] Горин Г.С. // ВЕСЦІ НАЦЫЯНАЛЬНАЙ АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ. 2009. № 1. С. 91-98.
- [10] Александров К.С., Провайвода Т.Т. Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.
- [11] Кучин В.А., Ульянов В.Л. Упругие и неупругие свойства кристаллов. М.: Энергоатомиздат, 1986.

The Possibility of Creation of Rotary-Type Source of Seismic Transverse Waves with Electromagnetic Excitation

**Vladimir A. Detkov^a,
Vitali V. Slabko^b, Georgy Ya. Shaidurov^b,
Michael A. Kopylov^a and Alex S. Tsipotan^b**

^a *Evenkiageofizika*

66 Leningradskaya st. Krasnoyarsk, 660074 Russia

^b *Siberian Federal University*

79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041 Russia

Use of transverse waves in exploration seismology provides some additional information needed to improve prediction of hydrocarbon deposits. Traditional sources of transverse waves have a number of disadvantages associated with bad reproducibility of influence, and the predominant excitation of longitudinal waves. In this work a variant of a rotary-type source of transverse waves with electromagnetic excitation which free from these disadvantages has been considered. Assessment of the required design parameters of this source and comparison the characteristics of the developed source in comparison with other similar devices are presented.

Keywords: exploration seismology, longitudinal and transverse waves, geologic profile, electromagnetic method of excitation of seismic waves.
