

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ВДОЛЬ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СЛОЯ НА ГОДОГРАФЫ МЕТОДА ОБЩЕЙ ГЛУБИННОЙ ТОЧКИ

А.А. Хоменко, В.П. Солдатенко, Национальный технический университет «Днепровская политехника», Украина

Рассмотрен случай среды с изменением скорости по синусоидальному закону в слое в методе общей глубинной точки. Найдены параметрические уравнения пути волны для среды с изменением скорости по синусоидальному закону. Найдена формула годографа отраженной волны для среды с изменением скорости по синусоидальному закону. Рассчитаны годографы отраженной волны для горизонтальной среды со средней скоростью по горизонтали и для среды с изменением скорости по синусоидальному закону с помощью моделирования.

Введение. Стандартным методом нахождения залежей углеводорода является метод общей глубинной точки (ОГТ), который направлен в первую очередь на изучение толстослоистых осадочных толщ, определение формы и степени прослеживаемости отражающих границ, но в меньшей мере позволяет изучать особенности изменений скорости и других упругих характеристик по латерали.

При обработке полученной геофизической информации о исследуемом участке для облегчения процесса интерпретации результатов применяются эффективные модели, которые в зависимости от сложности строения покрывающей среды, необходимо усложнять. Представляет интерес изучение годографов отраженных волн для моделей сред, которые учитывают не только вертикальное изменение скорости с глубиной, но и горизонтальные изменения скорости в покрывающей толще.

Актуальным является изучение распределения скорости по латерали при поисках и изучении ловушек углеводородов нестратиграфического типа. При стандартной обработке временных разрезов по методу ОГТ происходит осреднение и сглаживание отражающих границ, что в первую очередь приводит к потере скоростных характеристик в слое и как следствие недоучете горизонтальных неоднородностей.

При изучении распространения сейсмической волны в среде изучение направленно на изучение скорости в слое, которая либо постоянная, либо изменяется по линейному закону. На данном этапе изучения этого вопроса выведены формулы годографов отраженных волн для среды с линейным изменением скорости в горизонтально-слоистой среде, а также для среды с линейным изменением скорости по горизонтали и вертикали для криволинейной границы раздела.

Но скорость по горизонтали в слое не может всегда только лишь убывать или увеличиваться, в реальной геологической среде скорость колеблется в каких-то пределах. Одной из таких функций, которая то убывает, то увеличивается является синусоида. Таким образом, представляется интерес рассмотреть поведение годографа отраженных волн для среды, в которой скорость в слое изменяется по синусоидальному закону.

Целью данной работы является изучить влияние изменения скорости в слое по горизонтали по синусоидальному закону на поведение годографа отраженной волны в методе ОГТ.

Изложение основного материала. Для решения поставленной задачи найдем формулу уравнение годографа отраженной волны для скорости, изменяющейся по синусоидальному закону.

В неоднородной изотропной среде время прихода волны от источника может быть найдено как результат решения нелинейного дифференциального уравнения эйконала:

$$\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial z}\right)^2 = \frac{1}{V^2(x, y, z)}$$

Введем систему координат xOz , где x – горизонтальная ось, направленная вдоль дневной поверхности, z – ось, направленная вертикально вниз. Скорость распространения волн равняется:

$$v = v_0(1 + \alpha x + \beta z)$$

где, v_0 — значение скорости в точке $O(0, 0)$; α и β — коэффициенты, характеризующие изменения скорости по осям x и z .

Изучение скорости по латерали начинается с предположения, что граница раздела является плоской, покрытой однородной средой с постоянной скоростью распространения продольных упругих волн.

Н.Н. Пузырев в своей работе рассмотрел линейное изменение скорости в горизонтальном направлении. Он основывался на методе средних скоростей. Был сделан вывод, что значение эффективной скорости $v_{эф}$ независимо от направления изменения скорости оказываться заниженным по сравнению со значением средней скорости в средней точке взрывного интервала.

А.К. Урупов в своей книге продолжает исследовать вопрос линейного изменения скорости по горизонтали. В работе используются вычисления годографа по точной и приближенной формуле способами суммирования и встречных годографов.

Уравнение годографа отраженной волны для горизонтального однородного слоя имеет вид:

$$t = \frac{\sqrt{x^2 + 4h^2}}{v}$$

где, h – мощность слоя; v – средняя скорость.

А.К. Урупов показывает, что линейное изменение скорости по горизонтали, которое изменяется по закону: $v_{cp} = v_0 - K_x x$, описывается следующей формулой годографа отраженной волны:

$$t = \frac{1}{K_x} \operatorname{arcch} \left[\frac{4h^2 + K_x^2 x^2}{2v_0(v_0 - K_x x)} + 1 \right]$$

где v_0 – скорость в начале профиля, K_x – коэффициент, равен горизонтальному градиенту скорости по латерали, h – мощность слоя.

В этих двух случаях, если вычисления производятся по встречным годографам, значение эффективной скорости $v_{эф}$ практически совпадает.

В большинство работ изучение изменения скорости по латерали направленно на изучение скорости, которая изменяется по линейному закону (горизонтальный градиент скорости). Этим вопросом занимались А. Е. Шуткин, М. И. Еремеев, Е. К. Королев, Ю. П. Стародуб.

А. Е. Шуткин, М. И. Еремеев, Е. К. Королев выводят формулу годографа отраженной волны с линейным изменением скорости по горизонтали и вертикали для криволинейной границы:

$$t = \frac{1}{v_0} \left\{ \operatorname{arch} \left[1 + \frac{\gamma^2 (x_n'^2 + z_n'^2)}{2(1 + \gamma x_n')} \right] + \operatorname{arch} \left[1 + \frac{\gamma^2 \left[(x_n' - x_l')^2 + (z_n' - z_l')^2 \right]}{2(1 + \gamma x_n')(1 + \gamma x_l')} \right] \right\}$$

где v_0 — значение скорости в точке $O(0, 0)$, волна проходит от точки $O(0,0)$ до точки отражения $N(x_n, z_n)$ и выходит на поверхность наблюдения в точку $L(x_l, z_l)$. Более детально можно посмотреть в источнике [5].

Далее Е. К. Королев, А. Е. Шуткин выводят формулу для модели среды, когда градиент скорости направлен вдоль плоской отражающей границы $z = h + x \operatorname{tg} \varphi$.

$$t = \frac{1}{v_0} \operatorname{arch} \left\{ 1 + \frac{\gamma^2 \left[l^2 + 4h^2 \cos^2 \varphi \left(1 + \frac{l}{h} \operatorname{tg} \varphi \right) \right]}{2(1 + \gamma \cos \varphi)} \right\}$$

где, l – расстояние взрыв – прибор. Более детально можно посмотреть в источнике [6].

Предположим, что истинная скорость в пределах одного слоя изменяется по синусоидальному закону, найдем путь волны, распространяющейся в такой среде, который определяется с помощью двух интегральных уравнений.

Для вывода этих уравнений предположим, что среда разделена на множество тонких пластов, в каждом из которых скорость постоянна; допуская, что число пластов стремится к бесконечности, получаем, что мощность каждого пласта становится величиной бесконечно малой и распределение скорости выражается непрерывной функцией длины наблюдения географа. Схематически изобразим такое изменение скорости в слое на рис. 1.

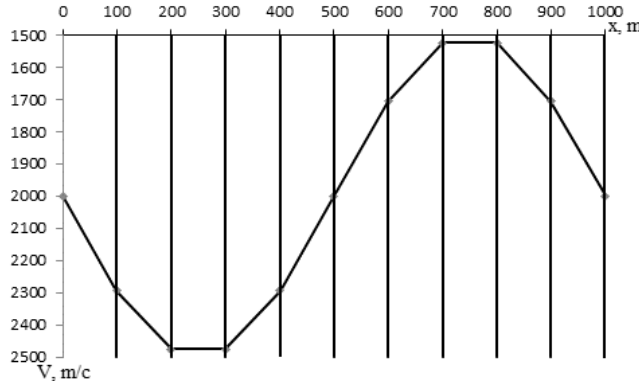


Рисунок 1. Схематическое изменение скорости в слое при изменении скорости по синусоидальному закону.

Для n -го пласта горизонтального слоя параметр луча равен:

$$P = \frac{\sin \alpha_0}{V_0} = \frac{\sin \alpha}{V_n}$$

Скорость изменяется вдоль x :

$$V_n = V_n(x)$$

Тогда:

$$\Delta z = \Delta x \operatorname{tg}(90 - \alpha) = \Delta x \operatorname{ctg} \alpha$$

$$\Delta x = \frac{\Delta z}{\operatorname{ctg} \alpha}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta z}{\sin(90 - \alpha)V_n} = \frac{\Delta x}{\cos(90 - \alpha)V_n}$$

Параметр сейсмического луча p величина постоянная, зависящая от направления, по которому этот луч отходит от пункта взрыва, другими словами, он зависит от параметра α_0 .

В пределе, если n становится бесконечным:

$$\frac{\sin \alpha}{V} = \frac{\sin \alpha_0}{V_0} = p, \quad V = V(x)$$

$$\frac{\Delta z}{\Delta x} = \operatorname{tg}(90 - \alpha) = \operatorname{ctg} \alpha$$

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{1}{\cos \alpha V_n}$$

Найдем данные значения:

$$z = \int_0^x \frac{dx}{\operatorname{ctg} \alpha} = \int_0^x \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} dx = \int_0^x \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha}}{\sin \alpha} dx$$

Окончательно находим z:

$$z = \int_0^x \frac{\sqrt{1 - (pV)^2}}{pV} dx$$

Найдем соотношение:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{1}{\cos \alpha V_n}$$

$$t = \int_0^x \frac{dx}{\cos \alpha V_n} = \int_0^x \frac{dx}{V_n \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}}$$

Окончательно находим t:

$$t = \int_0^x \frac{dx}{V_n \sqrt{1 - (pV_n)^2}}$$

Полученные интегральные выражения показывают связь t и z в соответствии с изменением скорости по горизонтали в слое. Данные уравнения можно решить численным методом, если задать закон изменения скорости.

Проверим возможность нахождения точной формулы уравнения годографа отраженной волны для скорости, изменяющейся по синусоидальному закону. В случае изменения скорости по горизонтали (по оси x) в слое $\beta = 0$, примем, что скорость в слое изменяется по закону:

$$v = v_0 + K_x \sin\left(\frac{x\pi}{0.5x_{\max}}\right)$$

где, v_0 — значение скорости в точке $0(0, 0)$; K_x — коэффициент разбросанности скорости; x_{\max} — длина наблюдения годографа.

Найдем интеграл от t для скорости, которая изменяется по синусоидальному закону подставим закон скорости в конечную формулу t , выполнив преобразования получим, которое вычисляется в пределах от 0 до x :

$$t = \lg \left| \operatorname{tg} \left(\frac{x}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right| + c$$

Используя эту формулу, вычислим годограф отраженной волны для среды с толщиной слоя 1000 метров, длиной годографа 1000 метров в двух случаях:

- 1) Для слоя с постоянной скоростью по известным формулам;
- 2) Для слоя со скоростью, которая изменяется по синусоидальному закону, в случае, когда начальная скорость равна 2000 м/с (рис. 2).

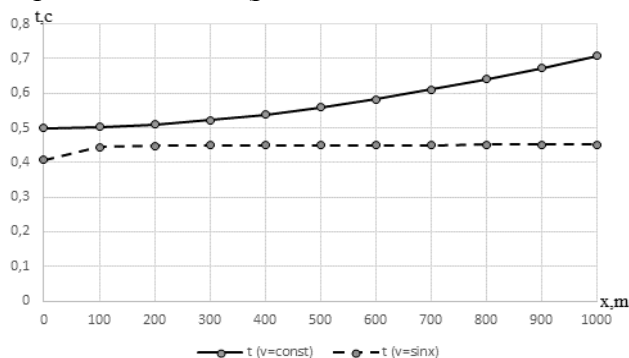


Рисунок 2 – Годограф отраженной волны для модели с постоянной скоростью (сплошная линия) и скоростью, изменяющейся по синусоидальному закону (пунктирная линия)

На рисунке видно существенное отличие поведения годографа отраженной волны со средней скоростью в слое от поведения годографа отраженной волны со сложным законом изменения скорости. Это указывает на необходимость дальнейшего исследования данного вопроса и возможном недоучете латеральных неоднородностей верхней части разреза.

Выполнено моделирование среды с горизонтальной отражающей границей раздела для двух случаев: для слоя с постоянной скоростью и для слоя со скоростью, которая изменяется по синусоидальному закону, в случае, когда начальная скорость равна 2000 м/с (рис. 3).

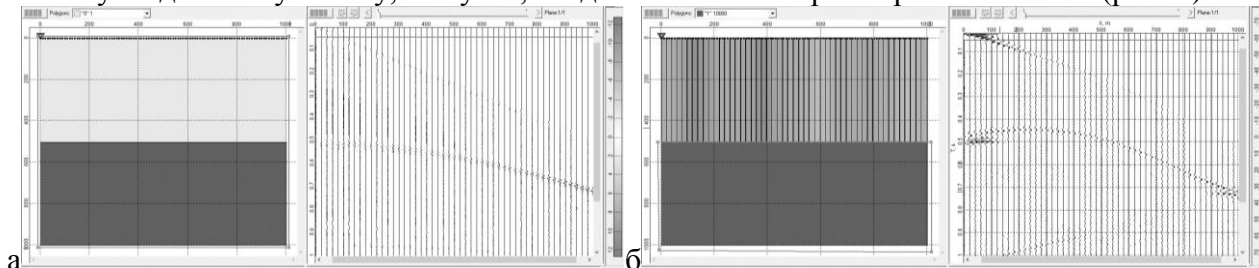


Рисунок 3. Модель среды и соответствующая ей сейсмограмма отраженной границы: а – для слоя с постоянной скоростью; б – для слоя со скоростью, которая изменяется по синусоидальному закону

На рисунке видно существенное отличие между сейсмограммой отраженной границы для модели среды со средней скоростью от модели, в которой скорость изменяется по синусоидальному закону. Наблюдается изменение поведения отраженной границы с увеличением изгиба гиперболы с наличием дифрагированности в начале и в конце профиля.

Выводы. Таким образом, найдены параметрические уравнения пути волны для среды с изменением скорости по синусоидальному закону, которое показывает связь t и z в соответствии с изменением скорости по горизонтали в слое. Найдена формула годографа отраженной волны для среды с изменением скорости по синусоидальному закону. Построен годограф отраженной волны для горизонтальной среды со средней скоростью по горизонтали и для среды с изменением скорости по синусоидальному закону и получен годограф для этих же сред с помощью моделирования. Существенное отличие годографов приведенных сред указывает на недоучет неоднородностей верхней части разреза.

Представляется интерес изучить поведения годографа отраженных волн в случае криволинейной границы раздела при изменении скорости по синусоидальному закону. В случае существенного отличия от годографа со средней скоростью и возможности такого нахождения, вывести точную формулу.

Список литературы

1. Пузырев Н.Н. Интерпретация данных сейсморазведки методом отраженных волн / Н.Н. Пузырев; Гостонтехиздат, 1959. – 452 с.
2. Изучение скоростей в сейсморазведке / А.К. Урупов; Издательство Недр, Москва, 1966. – 224 с.
3. Гурвич И.И. Сейсмическая разведка / И.И. Гурвич, Г.Н. Боганик; 3-е изд., переработанное; Москва, Недр, 1980. – 551 с.
4. Бляс Э.А. Новый взгляд на скорости ОГТ в слоистых латерально-неоднородных средах: аналитическое и численное исследование / Э.А. Бляс; Технологии сейсморазведки, 2005. № 3. С. 7–25.
5. Шуткин А.Е. Годограф отраженных волн для неоднородной среды с линейным изменением скорости по горизонтали и наклонной границей раздела / А.Е. Шуткин, М.И. Еремеев, Е.К. Королев; В кн.: Прикладная геофизика, вып. 75. – М.: «Недра», 1974. – С. 92-96.
6. Королев Е.К. Годограф отраженных волн для среды с криволинейной границей раздела при постоянном градиенте скорости в покрывающей толще и его интерпретация / Е. К. Королев, А. Е. Шуткин; В кн.: Прикладная геофизика, вып. – М.: «Недра», 1961. – С. 53-62.
7. Хоменко А.А. К вопросу учета изменений скорости по латерали в методе отраженных волн / Хоменко А.А.; Матеріали IV Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Молодь: наука та інновації» Том 8, 2017. – С. 7-(10-11).