



УДК 534.836.2

**Бубнов Евгений Яковлевич**, доцент, к.т.н., доцент кафедры физики ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»)

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

### ОСОБЕННОСТИ ТРАНСФОРМАЦИИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В СЕЙСМИЧЕСКИЕ

*Ключевые слова:* акустическое поле, движущийся вертолет, эффект Доплера, преломление, волновая структура сейсмического поля, скоростные характеристики сейсмических волн.

*Аннотация.* В докладе проведены экспериментальные исследования преломления низкочастотных акустических волн в грунт. В качестве акустического излучателя используется тональный инфразвуковой сигнал движущегося вертолета. Анализируются особенности волновой структуры сейсмического сигнала по сравнению с акустическим и дается физическая модель данного явления. Выводятся расчетные формулы скоростных характеристик сейсмических волн и даются оценки этих параметров для приведенного эксперимента.

В настоящем докладе проведено экспериментальное изучение преломления инфразвуковых полей, создаваемых воздушными объектами в грунт.

Актуальность экспериментальных исследований объясняется, во-первых, сложностью проведения теоретических расчетов в задачах проникновения акустических волн в слоистые твердые среды [1 - 3]. Кроме того, для практических задач важно оценить возможность применения этих полей в разведочной сейсмологии [4- 6].

По сравнению с ранними экспериментальными работами [5, 6] в настоящей статье выполнен детально анализ механизмов генерации сейсмических полей, вызванных инфразвуковым акустическим источником, проведена интерпретация их волновой структуры, а также на основе полученных формул измерены скоростные характеристики и углы полного внутреннего отражения сейсмических волн в грунте.

В данной работе в качестве источника акустического поля используется вертолет. Инфразвуковой сигнал вертолета представляет собой первую гармонику звука вращения несущего винта на частоте 16 Гц. Переменные поля давления регистрировались конденсаторным микрофоном МК - 102, в диапазоне частот 10 Гц– 20 кГц (на уровне -3 дБ), сейсмические сигналы принимались датчиком скорости смещения грунта СВ – 10Ц в диапазоне частот 10 - 100 Гц, расположенных в одной точке. Сигналы с датчиков после усиления регистрировались на аналоговом магнитографе НО-67. Последующая обработка сигналов после аналого-цифрового преобразования проводилась на персональном компьютере.

На рис. 1 приведены осциллограммы акустического и сейсмического сигналов движущегося вертолета для первой гармоники звука несущего винта (высота полета 40 м, скорость движения 200 км/ч).

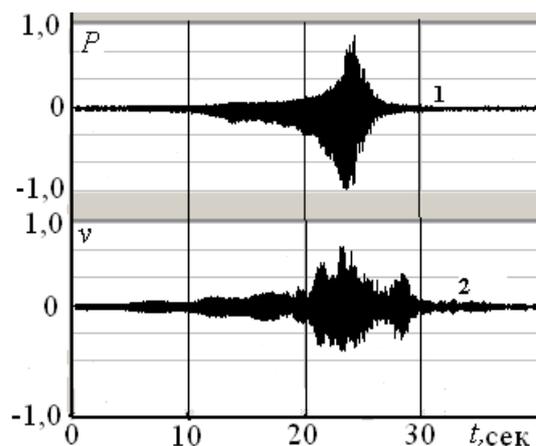


Рис.1. Осциллограммы акустического (кривая 1, давление) и сейсмического (кривая 2, скорость смещения грунта) сигналов движущегося вертолета в диапазоне 10 – 20 Гц.

Как следует из анализа кривых рис. 1, осциллограмма акустического сигнала плавно изменяется с течением времени. Для сейсмического сигнала наблюдается изрезанный характер изменения амплитуды, хотя его источником является преломленная в грунт акустическая волна. Чтобы разобраться в причине отличия сейсмического сигнала от акустического, выполнен их спектральный анализ с большим разрешением. На рис. 2 приведены соответствующие спектрограммы, которые показывают, что акустический сигнал состоит из одной дискреты, которая изменяется по частоте из-за эффекта Доплера. Текущий спектр сейсмического сигнала как при приближении, так и удалении состоит из трех дискретных составляющих, т.е. происходит расщепление исходной акустической дискреты на три гармоники. Таким образом, сейсмический сигнал представляет собой результат сложения трех гармоник, который проявляется в виде биений.

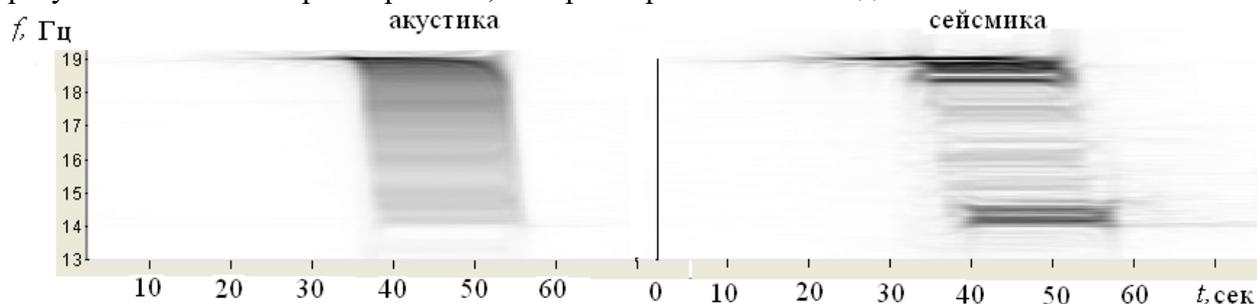


Рис.2. Спектрограммы акустического и сейсмического сигналов движущегося вертолета в диапазоне 10 – 20 Гц.

Выясним физическую причину сложной волновой структуры сейсмической волны (рис.3). Поскольку, как следует из рис. 2, для первой сейсмической дискреты 1 доплеровский сдвиг совпадает с доплеровским сдвигом акустической волны, то это означает, что данная сейсмическая волна вызвана преломлением акустической волны в точке расположения сейсмического датчика. Эта волна является неоднородной, т.е. она затухает с глубиной [1].

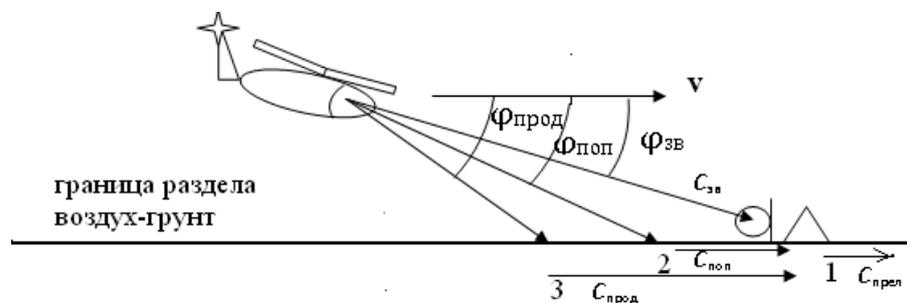


Рис.3. Объяснение явления расщепления дискрет в сейсмическом сигнале.

Появление двух других дискрет 2 и 3 в сейсмическом сигнале (см. рис. 3) может быть вызвано следующим механизмом трансформации звуковой волны в грунт. Как известно, в твердой однородной среде могут возбуждаться продольные и поперечные волны. Предположим, что скорости распространения продольной и поперечной волн в грунте больше чем скорость распространения акустической волны, что может иметь место для низких частот. Тогда направления лучей этих волн будут приближаться к дневной поверхности и при углах  $\varphi_{\text{прод}}$ ,  $\varphi_{\text{поп}}$  полного внутреннего отражения продольной и поперечной волн эти лучи будут идти параллельно поверхности, и могут быть зафиксированы сейсмическим датчиком. Эти две волны отличаются доплеровскими частотами  $f_{\text{д прод}}$ ,  $f_{\text{д поп}}$ , т.к. они вызваны акустической волной, падающей на грунт под разными углами  $\varphi_{\text{прод}}$ ,  $\varphi_{\text{поп}}$ .

$$f_{\text{д прод}} = f_0 \left( 1 + \frac{v \cos \varphi_{\text{прод}}}{c} \right)$$

$$f_{\text{д поп}} = f_0 \left( 1 + \frac{v \cos \varphi_{\text{поп}}}{c} \right), \quad (1)$$

где  $f_0$  - частота акустического источника в неподвижной системе координат,  $v$  – скорость движения источника,  $c$  – скорость распространения акустической волны в воздухе.

С другой стороны величины углов полного внутреннего отражения для каждой из указанных волн можно рассчитать по формулам [1].

$$\sin \varphi_{\text{прод}} = \frac{c}{c_{\text{прод}}}$$

$$\sin \varphi_{\text{поп}} = \frac{c}{c_{\text{поп}}}, \quad (2)$$

где  $c_{\text{прод}}$  и  $c_{\text{поп}}$  - соответственно скорости распространения продольной и поперечной волн в твердой среде. Таким образом, различие скоростей распространения продольной и поперечной волн в твердой среде приведет к различным углам полного внутреннего отражения, что в свою очередь вызовет различие в частотах доплеровского смещения для указанных волн.

Из уравнений (1), (2) можно получить формулы для расчета скоростей распространения продольной и поперечной волн в грунте.

$$c_{\text{прод}} = \frac{f_0 v}{f_{\text{д прод}} - f_0}$$

$$c_{\text{поп}} = \frac{f_0 v}{f_{\text{д поп}} - f_0} \quad (3)$$

Обработка данных эксперимента по формуле (3) показывает, что скорость преломленной волны 1 равна 350 м/с, что близко к скорости звука в воздухе. Для сейсмической волны 2 скорость распространения  $c_{\text{поп}} = 380$  м/с, а для волны 3 величина скорости распространения составляет  $c_{\text{прод}} = 460$  м/с. Оценки по формулам (2)

показывают, что для продольной волны в грунте угол полного внутреннего отражения равен  $50^{\circ}$ , а для поперечной волны составляет  $63^{\circ}$ .

Явление сложной волновой структуры сейсмического поля не наблюдается для второй (32 Гц) и более высоких гармоник звука вращения несущего винта. Этот факт можно объяснить тем, что скорости распространения продольной и поперечной волн в твердой среде на этих частотах меньше, чем скорость распространения акустической волны. Тогда явление полного внутреннего отражения волн отсутствует, так как продольная и поперечная волны в грунте уйдут вглубь твердой среды и на дневной поверхности они могут появиться только в результате отражения от нижележащих слоев.

Таким образом, построена физическая модель трансформации акустических волн в твердое пространство, объясняющая особенности проникновения низкочастотных волн в грунт в экспериментальных условиях. Получены расчетные формулы для оценки скоростных характеристик волн в твердой среде.

### Список литературы

- [1] Бреховских А.М. Волны в слоистых средах: учеб. пособие / А.М. Бреховских. – Издательство АН СССР, 1957. – 502 с.
- [2] Исакович М.А. Общая акустика : учеб. пособие / М.А. Исакович. – М.: Издательство Наука, 1973. – 496 с.
- [3 ] Разин А.В. Возбуждение упругих волн импульсным звуковым источником, действующим на границе раздела газ-твердое тело /А.В. Разин // Акустический журнал. - 1993. - т. 39. № 3.- с. 530.
- [4] Люкэ Е.И. Экспериментальное изучение зависимости энергии волны Релея от мощности и высоты взрыва в воздухе /Е.И. Люкэ // Физика Земли М.: - 1967- № 2. – С. 32 – 40.
- [5] Бубнов Е.Я. Эффект Доплера при исследовании волновой структуры сейсмического поля, возбуждаемого движущимся источником. / Е.Я. Бубнов, В.В. Гущин., В.В. Чернов // Труды Международной конференции «Информационные системы и технологии» г.Новосибирск. - 2000. - Т.3. - С. 569-572.
- [6] Бубнов Е.Я. Упругие поля, создаваемые воздушным транспортом при пролете / Е.Я. Бубнов, В.В. Гущин // Материалы 19 сессии Российского. акустического общества: в 3 т., г. Н. Новгород. – 2007. Т.3. - С. 297 – 299.

UDC 534.836.2

### TRANSFORMATION SPECIALITY OF LOW-FREQUENCY ACOUSTIC WAVES IN SEISMIC.

Evgeny Ya. Bubnov

*Key words: acoustic field, moving helicopter, Doppler effect, refraction, wave structure of seismic field, velocity characteristics of seismic waves.*

*Abstract: In the report experimental studies of the refraction of low-frequency acoustic waves into the ground were carried out. As an acoustic radiator, a tonal infrasound signal of a moving helicopter is used. The features of the seismic signal wave structure in comparison with the acoustic one are analyzed and a physical model of this phenomenon is given. The formulas for calculating the velocity characteristics of seismic waves are derived and the estimates of these parameters for the given experiment are given.*