

Поводом к написанию этих заметок послужило письмо, полученное мною от известного специалиста по конструированию сейсмических вибраторов В.В.Циммермана:

"Почему два вибратора излучают волну с амплитудой в два раза больше, чем один? Парадокс видится в том, что при увеличении мощности излучения на поверхности в 2 раза, мощность излучаемой волны увеличивается в 4 раза. Вопрос висит с 80-х годов. В известных мне теориях поверхностного излучения ответа не нашёл".

На другой парадоксальный факт обратил внимание профессор Г.А.Шехтман. Известно, что при импульсном возбуждении поперечных волн успешно используется способ вычитания двух разнонаправленных боковых ударов. Почему при вибрационном возбуждении с помощью горизонтального вибратора этот способ не работает?

У меня тоже накопилось несколько фактов, которые на первый взгляд противоречат общепринятым представлениям. Некоторые из них почерпнуты из известных публикаций. Другие часто звучат в устных дискуссиях об особенностях вибросейсмического метода.

1. Нарушение "амплитудно-энергетического принципа" (АЭП) при группировании вибраторов

Физически очевидно, что энергия, затрачиваемая на генерацию колебаний, пропорциональна числу работающих вибраторов. Если вибраторы работают синхронно, то амплитуда вибросигнала в дальней зоне (во всяком случае, в падающей волне) также пропорциональна их числу. Это бесспорный многократно проверенный факт. Но также физически очевидно, что мощность принятого вибросигнала пропорциональна квадрату его амплитуды. Однако амплитуда сигнала и его мощность должны быть связаны квадратичной зависимостью, причем как на поверхности, так и в дальней зоне. То есть, либо мощность на поверхности при группировании должна возрастать квадратично, либо амплитуда в дальней зоне должна возрастать как корень из числа вибраторов. Назовем этот закон "амплитудно-энергетическим принципом" (АЭП). В простейшем случае двух вибраторов АЭП формулируется как "удвоение амплитуды равнозначно учетверению мощности". Парадокс состоит в том, что на поверхности, то есть применительно к источникам колебаний, АЭП не справедлив: здесь мощность пропорциональна числу источников.

Ответ подсказывает простейший эксперимент, доступный любому оператору вибратора. Включите только один из вибраторов в группе, измерьте амплитуду пассивных колебаний платформы соседнего неработающего вибратора и сравните ее с амплитудой колебаний платформы активного вибратора. Вы получите отношение не более 10%, а, скорее всего, значительно меньше. Но ведь амплитудно-энергетический принцип справедлив только в случае полного (стопроцентного) механического взаимодействия виброплатформ через грунт. Подчеркнем последние слова: именно через грунт. Другими словами, для выполнения АЭП на поверхности все источники в группе должны синхронно работать на одно и то же общее для них сопротивление грунта (сопротивление излучения), что в большинстве

случаев физически невозможно. Даже чисто конструктивное механическое соединение излучающих платформ не приведет к выполнению АЭП, поскольку площадь контакта с грунтом, а, значит, и сопротивление излучения также увеличится. Добиться выполнения АЭП применительно к вибратору можно, если водрузить на одну и ту же жесткую излучающую плиту дополнительные возбудители. В этом случае площадь контакта с грунтом не изменится, но этот вариант уже является не группированием, а усилением (умощнением) возбудителя колебаний.

Мысленно можно представить еще и такой случай выполнения АЭП, это когда жесткость грунта значительно превышает жесткость платформы, например, грунт представляет собой скальный монолит, а платформы всех вибраторов к нему монолитно приморожены и, значит, колеблются как единое целое. Но в этом случае говорить о конструктивной площади платформы бессмысленно, поскольку роль общей платформы для всех вибраторов выполняет этот монолитный скальный массив. Тем самым, мы приходим к упомянутому варианту работы нескольких возбудителей на общей виброплатформе.

Впрочем, даже эти два последних чисто гипотетических случая выполнения АЭП при практической реализации, скорее всего, не приведут к ожидаемому эффекту, во всяком случае в приложении к гидравлическим вибраторам. Непреодолимым препятствием послужит их низкий гидромеханический КПД, на что указывает тот факт, что рабочая жидкость в системе требует, как известно, интенсивного охлаждения, то есть, отвода энергии. А ведь к АЭП имеет отношение только полезная составляющая энергии, которая полностью переходит в сейсмическую волну.

Можно наглядно пояснить вышерассмотренные случаи справедливости и несправедливости АЭП на электрических моделях. Отобразим преобразование колебаний одиночного вибратора U в сигнал сейсмоприемника u с помощью простого делителя напряжения (рис.1а), где $R \gg r$. Эта цепь физически моделирует тот факт, что источник "не чувствует" наличия или отсутствия приемника. Соотношение сигналов между источником и приемником отобразится по закону Ома как

$$u_1 \approx \frac{r}{R} U_1, \quad (1)$$

и, стало быть, мощность излучения будет равна

$$W_1 \approx \frac{U_1^2}{R}, \quad (2)$$

Группирование вибраторов на реальном грунте представим электрической цепью, изображенной на рис.1б, где каждый из источников группы фактически нагружен на свое собственное сопротивление нагрузки R , никак не связанное с другими источниками и их нагрузками. На сейсмоприемнике дальней зоны все эти сигналы просуммируются как в схеме сложения токов, в результате чего уровень принятого сигнала возрастет в n раз:

$$u_n \approx n u_1 = n \frac{r}{R} U_1, \quad (3)$$

его мощность, соответственно, возрастет в n^2 раз, а вот затраты мощности на излучение, как простая сумма энергетических затрат не связанных между собой источников, очевидно, возрастет только в n раз. Это и есть случай невыполнения АЭП, характерный для большинства практических ситуаций с группированием вибраторов.

Теперь посмотрим, как должна бы выглядеть электрическая схема, моделирующая гипотетическое группирование при условии соблюдения АЭП и на входе и на выходе. Она изображена на рис.1в и отвечает требованию работы всех источников на общее сопротивление нагрузки R , что возможно только при последовательном соединении генераторов электродвижущих сил. Легко видеть – выходной сигнал в этом случае будет также пропорционален числу источников (3), а мощность, затраченная на генерацию, пропорциональна квадрату их числа:

$$W_n \approx \frac{(nU_1)^2}{R} = n^2 W_1, \quad (4)$$

Таким нам представляется разрешение амплитудно-энергетического парадокса группирования вибраторов даже без учета особенностей строения верхней части разреза и различных нелинейных эффектов.

Однако! Казалось бы, энергетический парадокс благополучно разрешился, но что-то мешает успокоиться, поскольку имеются факты, не объяснимые вышеназванной моделью. Автор несколько лет проводил эксперименты с мощными стационарными дебалансными вибраторами. Их конструктивное отличие от сейсморазведочных:

– использование в качестве реактивной массы, создающей вынуждающую силу, вращающихся дебалансов, приводимых в движение электродвигателями;

– большая по площади примерно в 5-10 и по массе – в 50-100 раз платформа, отчего их иногда называют "сверхтяжелыми";

– отсутствие дополнительной (прижимной) массы, роль которой в сейсморазведочных вибраторах обычно выполняет масса транспортно-средства.

Эффективный частотный диапазон стационарных "сверхтяжелых" вибраторов составляет 5-12 Гц и, как видим, совпадает с низкочастотной стороной рабочего диапазона современных гидравлических сейсморазведочных вибраторов 20-30-тонного класса. Энергетическая установка сверхтяжелого вибратора составляет всего 200 кВт, а реально потребляемая во время работы мощность не превышает 60-70 кВт. Для сравнения, энергоустановка силовой гидросистемы только одного сейсморазведочного вибратора достигает 400 кВт (какая при этом мощность расходуется фактически, у нас нет данных). Между тем, "сверхтяжелый" вибратор в своем частотном диапазоне в несколько раз "дальнейше" эквивалентной по суммарной силе группы сейсморазведочных. Так, прокоррелированные сейсмограммы высокого качества от вибратора ЦВ-100, содержащие волны от подошвы коры и верхов мантии, регистрируются на удаленных до 350 км при суммарной длительности свип-сигнала не более 1 часа, а его колебания на фиксированных частотах выделяются на непрерывной 10-минутной записи с помощью Фурье-анализа на удаленных до 1000 км. В то же время, нам известны лишь неудачные попытки применения групп

гидравлических вибраторов для аналогичных экспериментов.

В результате, возникает вопрос:

2. Почему стационарный 40-100-тонный вибратор значительно превосходит по глубинности и дальности, группу сейсморазведочных вибраторов, эквивалентную по суммарной силе?

У нас нет однозначного ответа. Есть только несколько предполагаемых причин, важная из которых заключается в следующем. Рабочий частотный диапазон сверхтяжелых вибраторов составляет 5–12 Гц. При этом большая масса платформы обеспечивает весьма низкочастотный (6-7 Гц) резонанс с грунтом (это экспериментальный факт), тогда как у сейсморазведочных вибраторов грунтово-платформенный резонанс лежит в области средних частот 20-25 Гц. Поэтому фактическая мощность генерации сейсмических колебаний в низкочастотной области у сверхтяжелого вибратора на порядки выше, чем у сейсморазведочного на этих же частотах. Диапазон же средних частот, где излучение сейсморазведочных источников наиболее интенсивно, столь же интенсивно поглощается в среде и на большие дальности и глубины не проходит, затухая до уровня невозможности оптимального приема сигналов.

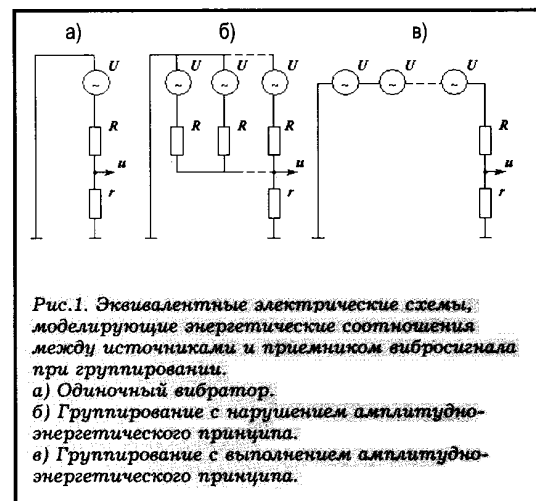
3. Генерирование поперечных волн

Как известно, методика импульсного возбуждения поперечных волн основана на использовании двух противоположных по знаку горизонтальных воздействий, разностная сейсмограмма от которых дает сравнительно чистые записи поперечных волн. Это происходит потому, что при смене знака горизонтального удара сдвиговые колебания меняют знак на обратный, тогда как колебания сжатия-разрежения сохраняют тот же самый знак воздействия.

Казалось бы, при вибративном возбуждении горизонтальных колебаний следует поступать аналогично. Но это не так.

Как и горизонтальный удар по внедренной в грунт платформе или стенке траншеи, горизонтальный вибратор генерирует сложные колебания, содержащие как вертикальные, так и горизонтальные компоненты. Если проанализировать спектральный состав виброграммы поперечных волн горизонтального вибратора, а еще лучше, прокоррелировать ее на удвоенной частоте свип-сигнала, то выяснится значительный вклад колебаний удвоенной частоты, причем в большей степени на вертикальных приборах.

Условимся опорным сигналом называть сигнал, идущий на корреляцию, а управляющим



— поступающий на управление колебаниями вибратора. Обычно эти сигналы можно считать тождественными. Прокоррелированная сейсмограмма представляет собой ФВК виброграммы и опорного сигнала. Казалось бы, чтобы "сменить" знак вибрационного воздействия можно инвертировать сигнал, управляющий виброисточником, а опорный сигнал коррелятора, генерируемый свип-генератором, оставить прежним.

На наш взгляд, физически очевидно, что вся виброграмма при этом просто инвертируется, независимо от того, какова природа присутствующих в ней волн. Такого же точно эффекта можно достичь простым инвертированием опорного сигнала при корреляции, не меняя управляющий сигнал вибратора. Таким образом, оба эти способа "инверсии" просто инвертируют уже имеющуюся коррелограмму первого воздействия, не давая никакой новой информации, кроме некоррелированного шума, при повторном воздействии.

Такая аппаратная инверсия не равноценна разнополярным боковым ударам. Хотя, как сказано, это и очевидно, попробуем пояснить подробнее. Дело в том, что та компонента Р-волн, которые неизбежно возбуждаются при горизонтальном воздействии (как при импульсном, так и при вибрационном), при вибрационном воздействии возникает дважды за каждый период колебания вибратора и, следовательно, всегда имеет удвоенную частоту по сравнению с текущей рабочей частотой свип-сигнала. Можно сказать, один период колебаний вибратора уже эквивалентен двум противоположно направленным ударам импульсного источника, каждый из которых генерирует Р-компоненту той же фазы сжатия. Эта Р-компонента с удвоенной частотой затем полностью подавляется в процессе корреляции. Другими словами, то, что при импульсном воздействии выполняет процедура вычитания, при вибрационном делает процедура корреляции. Никакая дополнительная аппаратная инверсия вибровоздействия, в том числе и чисто горизонтального, не позволит разрешить поперечные волны от продольных лучше, чем это делает корреляция. Исключением может быть только инверсия физическая, о чем подробнее скажем ниже.

Спрашивается, почему на вибрационных сейсмограммах поперечных волн все же заметен фон продольных? Дело в том, что кроме компоненты с двойной частотой, горизонтальный вибратор может возбуждать и компрессионные колебания с основной частотой. Такой горизонтальный вибратор мы будем условно называть "грязным". Его работа характеризуется тем, что при движении платформы в одну сторону он возбуждает большую амплитуду полуволны сжатия, чем при возвратном движении. Обычно это происходит, когда горизонтальный вибратор стоит с наклоном или на не выровненной площадке. Подобный случай упоминается в работе [2]. К аналогичному эффекту, по-видимому, может приводить и сложное строение ВЧР в непосредственной близости к месту установки вибратора (устное сообщение Г.А. Шехтмана). Третий случай — это дефект или особенность конструкции вибратора, при которой асимметрия воздействия рождается непосредственно на платформе: например, если двигатели дебалансного возбуждателя плохо сфазированы. Работа "грязного" вибратора поперечных волн эквивалентна работе асимметричного импульсного источника, когда удар, скажем, вправо дает большую амплитуду продольной волны, чем противоположный.

Сейсмограммы поперечных волн, полученные с помощью "грязного" вибратора, не меняя

установки последнего, нельзя очистить от фона продольных никакими ухищрениями вычитаний. Однако, если причина "грязи" от продольных волн заключена в асимметрии силовой характеристики горизонтального вибровозбудителя, а не в сложном строении зоны малых скоростей, инверсия может дать очищающий эффект. Но только инверсия физическая, при которой виброплатформа переустанавливается на то же место с разворотом на 180° .

Попутно заметим, если возникает необходимость возбуждения продольных волн горизонтальным вибратором, то самый простой и достаточно эффективный путь — выполнить коррелирующий виброграмм Z-приборов на удвоенной частоте управляющего свип-сигнала. А вот "обратная" задача — генерирования поперечных волн двумя продольными вибраторами, работающими в противофазе (так называемый "метод Шовер"), — безнадежно неэффективная затея. Автор проводил такой эксперимент, располагая двумя универсальными продольно-поперечными вибраторами, имея возможность сравнить уровень поля поперечных волн от двух "продольников", работающих в противофазе, и одного "поперечника" той же силы [1]. Разница в пользу поперечного вибратора — на порядок. Причина видится в том же самом нарушении АЭП, а именно в том, что оба вибратора работают каждый на свою независимую нагрузку (см. рис. 1б). Платформы, не связанные общей нагрузкой, не рожают сдвиговых колебаний. А Р-сигнал в дальней зоне эти же противофазные платформы взаимно уничтожают.

4. О нелинейных искажениях вибрационных колебаний

Одно из распространенных ошибочных представлений связано с проблемой нелинейных искажений вибросигналов. Утверждается, например [2], что основным источником нелинейных искажений является контакт виброплатформы с грунтом. В обоснование сравниваются спектры сигналов акселерометров, установленных на платформе и на реактивной массе, из которых видно, что относительный уровень высших гармоник на платформе значительно выше, чем на реактивной массе.

Однако физическими величинами, определяющими как энергию механических колебаний виброплатформы, так и энергию сейсмической волны в упругой среде, являются сила (или механическое напряжение) и колебательная скорость, точнее произведение этих величин. Сила, действующая на платформу, действительно определяется ускорением реактивной массы, а вот колебательное ускорение платформы, то есть фактически грунта, надо предварительно проинтегрировать по времени, превратив в скорость, и только после этого можно корректно сопоставлять с ускорением реактивной массы. Кстати, естественным образом эту процедуру интегрирования выполняют сейсмоприемники и корректно было бы сравнивать нелинейные искажения ускорения реактивной массы и сигнал колебательной скорости, вырабатываемый сейсмоприемником в грунте. Даже графики спектров, приведенные в упомянутой работе [2], с учетом дополнительного интегрирования сигнала платформы, подтверждают сказанное.

Еще одним косвенным подтверждением справедливости изложенного подхода является прямое сопоставление нелинейных искажений в грунте в одних и тех же физических единицах для гидравлических и дебалансных вибраторов одного и того же энергетического класса. Отличительная черта последних с точки зрения нелинейных искажений состоит в том, что вынуждающая сила

в них идеально синусоидальна, а экспериментальный факт состоит в том, что нелинейные искажения в виброграммах дебалансных вибраторов (при условии отсутствия люфтов в конструкции платформы и безотрывной работы) на порядок меньше, чем у гидравлических источников. Особенно ярко это различие проявляется на низких частотах. В противном случае, то есть если бы главным виновником была платформа, искажения у гидравлических и дебалансных вибраторов должны были бы быть одинаковы.

Из сказанного не следует, что дебалансные вибраторы свободны от нелинейных искажений. Но эти искажения, если исключить дефекты конструкции, обусловлены обычно нарушением сплошности контакта с грунтом, к чему мы и переходим.

5. Как, где и почему рождаются субгармоники вибросигнала?

К предыдущему спорному вопросу тесно примыкает другой — о природе субгармоник вибросигнала (половинно-частотной, треть-частотной и т.д.).

Явление нарушения контакта с грунтом знакомо всем операторам. Как правило, оно сопровождается появлением всех высших гармоник. Вибратор с гладкой "подошвой" может "поплыть" в сторону, а может даже нарушиться и режим управления частотой и фазой. Считается, что такое возникает, когда вынуждающая сила превышает силу статического прижима. Однако следующие факты заставляют усомниться в этом объяснении. Здесь мы опять вынуждены обратиться к экспериментам с дебалансными вибраторами по той причине, что они не имеют обратной связи по амплитуде, как электрогидравлические, и поэтому "честно" генерируют одну и ту же силу, "не обращая внимания" на реакцию грунта. Так, например, на мягком грунте вибратор устойчиво работает, но вот ночью случился мороз, и грунт стал жестким. Все! При тех же параметрах вынуждающей силы появились признаки нарушения контакта, нелинейные искажения в виброграмме, но самое главное, вдруг, с какого-то момента, вибратор начинает "прыгать" не в такт возбудителю. Значит сила прижима — не главное. Все-таки удивительно полезный прибор для экспериментов — дебалансный вибратор с электромотором постоянного тока! Амперметр и вольтметр показывают, что на жестком грунте, пока вибратор не оторвался от грунта впервые, резко упала потребляемая мощность. А КПД-то электромотора около 90%. Значит упала энергия, уходящая в грунт, точнее, упала активная компонента энергии. Напомним, что по закону сохранения активная компонента механической энергии колебательной системы может расходоваться либо на бегущие сейсмические волны, либо на тепловые потери внутри системы и во внешней среде. Поскольку конструктивные характеристики системы не изменились, остается внешняя среда, то есть грунт. В формальной модели колебательной системы вибратор-грунт (масса, демпфер, пружина) активная компонента энергии поглощается демпфером. Если демпфирование снизилось, подводимая колебательная энергия накапливается в реактивных элементах (пружина, масса) и при приближении к резонансу происходит отрыв платформы от грунта. При этом колебательная система переходит из модели линейного колебательного контура в "модель прыгающего мяча", которая по своей реакции на внешние воздействия похожа на колебательный контур, но имеет и существенные отличия. Внешне наблюдаемое отличие — "резонансная" частота, зависит от амплитуды: чем больше амплитуда, тем ниже частота. Но принципиальное параметрическое

отличие — в момент отрыва система из режима, близкого к "холостому ходу", переходит в режим "короткого замыкания", при котором потери внутри активатора (двигателей с дебалансами) резко возрастают. Это подтверждают и резко возросшие токи электромоторов. Здесь полная аналогия с электротехникой — короткое замыкание сжигает генератор. В результате этого отрыва накопленная в реактивных элементах энергия рассеивается на внутреннем сопротивлении источника питания (в обмотках и проводах электрических машин) и вибратор вновь входит в контакт с грунтом до следующего накопления критического количества реактивной энергии и неизбежного отрыва, который обычно происходит через период. Внешне это выглядит, как будто вибратор "стучит через раз", еще, бывает, раскачивается с боку на бок. Отсюда и "половинные" частоты в виброграмме, называемые субгармониками. Обычно режим генерации субгармоник возникает во время постепенного повышения частоты лавинообразно, начинаясь с внезапного срыва, и не прекращается, даже если обратить развертку частоты вспять. Изредка возникает режим устойчивой работы вибратора "со стуком через два периода", но чаще в такой сверхкритической ситуации начинаются просто беспорядочные скачки.

Таким образом, проблема субгармоник, это проблема не геофизика, а инженера, и не нужно приписывать ей какое-то геофизическое значение, связывая с нелинейными эффектами в геологической среде.

Заключение

Разумеется перечень "непонятностей" и спорных положений вокруг физики вибросейсмического метода этим не исчерпывается. Автор готов выслушать критику в свой адрес, а также предлагает коллегам высказаться по таким вопросам.

1. Почему на практике не удается достичь высокого теоретически достижимого динамического диапазона коррелограмм, хотя бы на уровне 80-90 дБ?

2. Почему использование в качестве опорного сигнала коррелятора датчика на плите вибратора (а также на грунте под плитой) не является (или является?) лучшим способом корреляции, или какой сигнал наилучшим образом отображает форму волны, уходящую в среду?

3. Принято считать, что грунт под плитой вибратора это колебательная система из пружины, демпфера и присоединенной массы. Если это так, то каковы типичные значения этих параметров? Автор, например, полагает, что присоединенная масса грунта много меньше массы плиты и практически может не учитываться. Есть возражения?

4. Момент воздействия в вибрационной сейсмо-разведке теоретически определяется максимумом ФАК. Означает ли это, что время прихода надо определять по максимуму ФВК, а не, скажем, по первому, видимому на коррелограмме, движению, как при взрывной сейсмо-разведке?

5. Корреляционная функция имеет размерность мощности сигнала. Какую размерность имеет прокоррелированная вибрационная сейсмограмма?

7. Можно ли, и при каких условиях, добиться практически полной идентичности импульсной и вибрационной сейсмограмм?

Литература.

1. Юшин В.И. Об излучении поперечных волн вибрационным источником через влажный снег // Методы расширения частотного диапазона вибросейсмических колебаний: Сб. науч. трудов. Институт геологии и геофизики СО РАН - Новосибирск, 1987. - С. 48-57
2. Шнейерсон М.Б., Жуков А.П., Ченборисова Р.З. Нелинейные и фазовые искажения вибрационных сигналов и способы их коррекции. Геофизика, 1997, №3, 27-33.