

Невзрывные сейсмические источники с широким частотным спектром

Часть I - Постановка задачи на примере гидравлических вибраторов

■ Чичинин И.С., Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Сагайдачная О.М. ГФУП СНИИГИМС, г. Новосибирск.

Развитие высокоразрешающей сейсморазведки возможно с использованием технологий полевых работ, при которой, согласно работе Г.Н. Гогоненкова [1.3], волны, отражённые от целевых границ, имели бы спектр в частотном диапазоне $7\div 120$ Гц.

В настоящей статье утверждается, что невзрывные источники (падающий груз, гидравлические и дебалансные вибраторы, импульсные источники «Енисей») могут быть описаны при помощи одной и той же функциональной схемы на основе электро-механических аналогий Г.А. Гамбурцева. Поскольку самыми популярными среди этих источников являются гидравлические вибраторы, поэтому с него и начинается описание теории и способов реализации источников. Функциональная схема гидравлического вибратора практически не изменилась с 1953 г. Цель первой части статьи состоит в том, чтобы рассмотреть возможность создания гидравлических источников с широкополосным частотным спектром ($7\div 120$ Гц).

Введение.

Для высокоразрешающей сейсморазведки нефтегазовых месторождений необходима такая технология, при которой волны, отражённые от целевых границ и принятые на дневной поверхности, имели бы частотный спектр в диапазоне $7\div 120$ Гц. Высокие требования предъявляются и к отношению сигнал/помеха. Например, при решении обратной динамической задачи по выделению тонких пластов и построению детальной петрофизической модели среды отношение максимальной амплитуды полезного сигнала относительно помех должно быть не меньше 10 на временном (глубинном) разрезе в интервале записи целевой волны и не меньше 1 на первичных записях [1.3].

При распространении сейсмических волн от источника к приемнику происходит ослабление их амплитуд с расстоянием – в первую очередь за счет поглощения, которое тем больше, чем выше частота колебаний. Поэтому, чтобы обеспечить частоты до 120 Гц при регистрации (в приемнике), требуется поднять энергетический уровень возбуждаемых

источником колебаний на высоких частотах.

Цель данной статьи состоит в том, чтобы рассмотреть возможности решения поставленной задачи – создания источников сигналов с широкополосными спектрами ($7\div 120$ Гц). Существующие сейсмические источники, такие как "падающий груз", эксцентриковый (дебалансный) вибратор, гидравлический вибратор системы Вибросейс™, импульсный источник "Енисей", в первом приближении могут быть описаны при помощи одной и той же функциональной схемы. Поскольку самым популярным среди них является гидравлический вибратор системы Вибросейс™, то приведем описание функциональной схемы этого источника.

Функциональная схема гидравлического вибратора. Сведения о гидравлических вибраторах и их характеристиках содержатся во множестве публикаций, из которых назовем работу Ю.П. Кострыгина [1.5]. Рассмотрим функциональную схему гидравлического вибратора. На рисунке 1 она представлена как схема

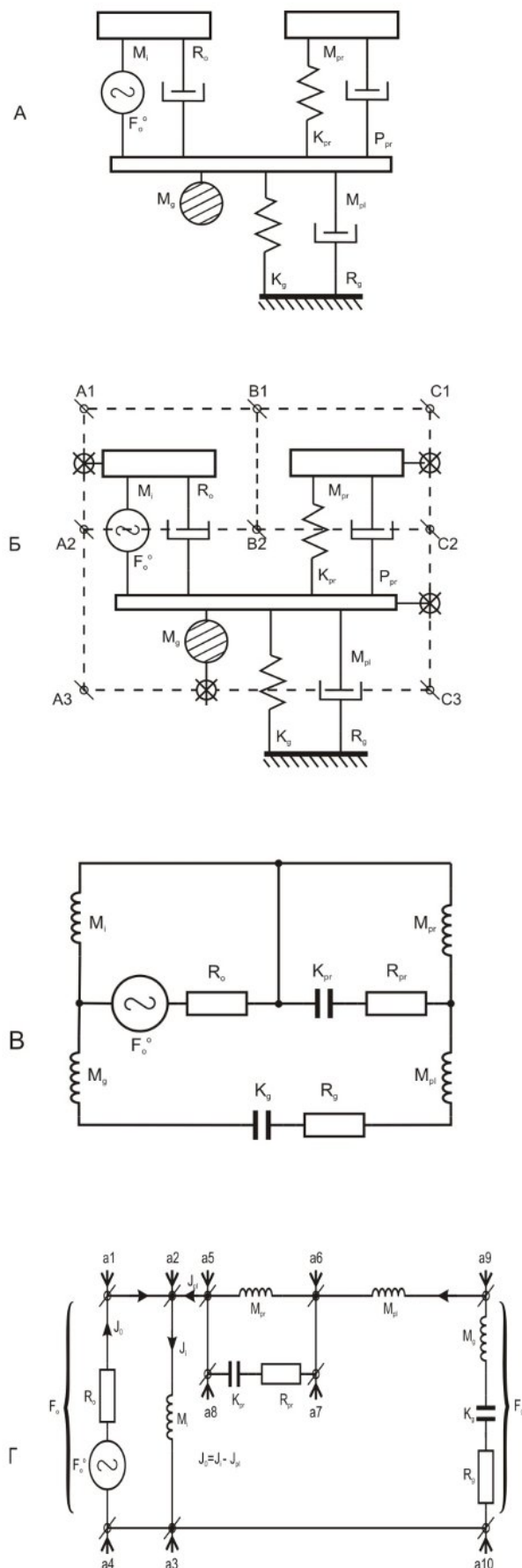
механических узлов вибрационного источника (А, Б) и как ее электрический аналог (В, Г), построенный по методу электромеханических аналогий [1.1]. На приведённой механической схеме (А) сила F_0^0 вибратора рождается внутри цилиндра, поршень которого опирается на виброплатформу, где R_0 – «внутреннее сопротивление» системы поршень - цилиндр. Внутреннее сопротивление R_0 не может быть равным нулю, так как в этом случае источник силы F_0^0 при отсутствии нагрузки (в режиме «короткого замыкания») выдавал бы безграничную энергию. Этого не может быть.

Масса цилиндра M_i выполняет роль инертной (реактивной) массы. Сила F_0^0 действует между массой платформы M_{pl} и массой . Прижимная масса M_{pr} своим весом прижимает платформу с массой к грунту через мягкую пружину с жесткостью K_{pr} . Эта пружина развязывает прижимную массу M от вибрации, R_{pr} – демпфер пружины. Грунт представлен в виде трёх элементов: "присоединённой массы" M_g , «пружины» K_g и «демпфера» R_g .

Теперь переключимся на «электрический язык».

"Пружина" и «демпфер» – двухполюсные элементы. Их нижние концы, полюсы, присоединены к «абсолютно неподвижной точке» а10. Электрический аналог механических схем Г.А. Гамбурцев придумал из деловой необходимости. Тогда электронные (усилительные) лампы были дефицитными. Поэтому сейсмические колебания записывали без предварительного усиления, то есть они усиливались в механике сейсмоприёмника.

Заметим, что сейсмоприёмник весил 10÷15 кг. Сейсмические волны возбуждали путем взрыва разных зарядов в скважине на глубине 15÷25 м. "Видимая



▲ Рис. 1. Функциональная схема гидравлического вибратора

частота" (максимум амплитудного спектра) на сейсмограммах была на частоте около 50 Гц.

Для уменьшения веса сейсмоприёмника тогда предлагалось много идей (изобретений). Каждый изобретатель считал, что его конструкция лучше всех. Чтобы разобраться в этом потоке изобретений, Г.А. Гамбурцев, получивший в 1931÷37 гг. 7 авторских свидетельств на свои изобретения в области сейсморазведочной аппаратуры, в том числе по вопросам, касающимся электромеханических аналогий, предложил метод перевода механических схем в их электрический аналог. Споры изобретателей утихли, так как по электрической схеме нетрудно было разобраться, чьё изобретение лучше или хуже.

В настоящее время проблема уменьшения веса сейсмоприёмника стала неактуальной. Однако проблема с разработками сейсмоисточников подобна ситуации, какая была ранее с сейсмоприёмниками: предлагается множество различных конструкций источников. Попробуй доказать, что твоя конструкция лучше. Поэтому вспомнить, как решались подобные проблемы раньше, является не лишним. Заметим, что в 30-х годах, когда А.Г. Гамбурцев придумывал свой метод, в США [2] и Германии было известно, что механические схемы можно описывать методами, которые используются в электротехнике. Но как механическую схему преобразовать в электрическую схему, детального описания метода (процедуры) не было и до сих пор нет. (Во всяком случае автор их не видел). Поэтому здесь дальше на процедуре «перевода» механической схемы в электрическую остановимся детально.

Для построения электрического аналога механической схемы сначала делается вспомогательный чертёж (рис. 1.Б).

Для этого копируют механическую схему и к каждой массе в этой копии пририсовывают «шапочку» $\otimes$, и все «шапочки» соединяют с «абсолютно неподвижной точкой» a_{10} . «Пружина» K_g и «демпфер» R_g – двухполюсные элементы. Их нижние концы, полюсы, присоединены к «абсолютно неподвижной точке» a_{10} . После этого наносят пунктирные линии – «разрезы Гамбурцева». Пунктирные линии рассекают «шапочки» и проходят между полюсами элементов механической схемы, которые присутствуют на рисунке 1.А. Это можно сделать единственным образом.

Далее на пунктирной линии, проведенной на рисунке 1.Б, отмечают «угловые» (узловые) точки: $A_1, B_1, C_1; A_2, B_2, C_2; A_3, B_3, C_3$. Используя эти точки, делают копию пунктирного чертежа. Например, пунктирная линия $A_2 - B_2 - C_2$ (см. рис. 1.Б) проходит через элементы ${}_{{\infty}}F, {}_{{\infty}}R, {}_{pr}K, {}_{pr}R$ механической схемы. Этим элементам даём «новые названия»: источник силы называем источником электрического напряжения, сопротивления трения, называем омическими сопротивлениями, пружина с жёсткостью превращается в конденсатор ёмкостью (рисунок 1.В).

Второй пример. Пунктирная линия $A_1 - A_2 - A_3$ (рисунок 1.Б) пересекает «шапочку» массы ${}_iM$. На месте этого пересечения показываем на рисунке 1.В индуктивность ${}_iM$ с тем же названием. Пунктирная линия $C_1 - C_2 - C_3$ пересекает «шапочки» ${}_{pr}M$ и ${}_{pl}M$. На местах этих пересечения рисуем индуктивности ${}_{pr}M$ и ${}_{pl}M$. Далее, пунктирная линия $C_3 - A_3$ пересекает демпфер ${}_gR$, жёсткость ${}_gK$ и шапочку ${}_gM$. На местах этих пересечений рисуем сопротивление ${}_gR$, ёмкость ${}_gK$ и индуктивность ${}_gM$.

Таким образом, электрический аналог механической схемы получили в виде

рисунка 1.В, однако эта схема на рисунке 1.Б имеет нестандартный вид. В электротехнике замкнутые контуры типа A1B1B2A2 представляют изолированно, например, как a1a2a3a4 (рис. 1.Г). Точно так же контур B1C1C2B2 прижимной системы рисуют в виде a5,a6,a7,a8 (рис.1.Г). В результате, на рисунке 1.Г получаем окончательную электрическую схему – аналог механической схемы гидравлического вибратора. В этой схеме F_o означает электрическое напряжение в точке a2, то есть силу F_o , порождённую за счёт движения инертной массы; J_i – ток, протекающий через индуктивность M_i , или, что то же самое, скорость перемещения инертной массы M_i . Скорость перемещения виброплатформы на рисунке Г фигурирует как ток J_{pl} . Поскольку предполагаем, что виброплатформа не отрывается от грунта, скорость перемещения J_g в точках контакта с платформой J_{pl} .

гидравлического вибратора. Напишем формулу для силы F_o , рождающейся внутри цилиндра из эвристических соображений, то есть путём наводящих вопросов.

Скорость движения массы M_i мы обозначили буквой J_i , массы M_{pl} платформы – буквой J_{pl} . Ключевым мотивом эвристических рассуждений является утверждение $F_o \sim (J_i - J_{pl})$. Если $J_i - J_{pl} = 0$, иначе, если цилиндр и поршень ходят «верх – вниз» одинаково, то это означает, что внутри цилиндра никакая «новая» сила не рождается, $F_o = 0$. Допустим, что $F_o = C \cdot (J_i - J_{pl})$, где C – некоторый постоянный множитель. Как видим, параметр $J_i - J_{pl} = J_o$ очень важный. Поэтому введём его в наши формулы. Подставим $J_i = J_o + J_{pl}$ в формулу (1.2):

$$-(J_o + J_{pl})M_i - J_{pl}(pM_{pl} + Z_{pr} + Z_g) = 0, \quad J_{pl} = -J_o(pM_i) / (pM_i + pM_{pl} + Z_{pr} + Z_g).$$

Примечательно то, что при $J_o = 0$ токи J_i и J_{pl} равны нулю по отдельности.

Прижимная система состоит из элементов R_{pr} , K_{pr} , M_{pr} . Они образуют параллельный контур, общее сопротивление которого определяют по формуле:

$$\frac{1}{Z_{pr}} = \frac{1}{pM_{pr}} + \frac{1}{R_{pr} + (1/p)K_{pr}},$$

$$Z_{pr} = \frac{pM_{pr} \cdot [R_{pr} + (1/p)K_{pr}]}{M_{pr} + R_{pr} + (1/p)K_{pr}}.$$

Почему только схемы на рис.1(А – Г) соответствуют здравому смыслу? Если вместо K_{pr} поставим недеформируемый поршень ($K_{pr} = \infty$), то это будет то же самое, как если бы прижимная масса M_{pr} была бесконечно большой. В этом случае M_{pl} платформы. В этом случае предположение о том, что поршень не отрывается от грунта, соответствует случаю, когда цепь поршня и платформы оборвана и сопротивление K_{pr} равно бесконечности. В этом случае леммами a_2 и a_9 стало

Другой крайний случай: пружина K_{pr} очень мягкая, то есть сопротивление между клеммами a_7 и a_8 стремится к нулю, то есть $(1/p) \cdot K_{pr} + R_{pr} \approx 0$. В этом случае клеммы a_7 и a_6 просто соединены друг с другом и прижимная система M_{pr} , K_{pr} , R_{pr} никакого влияния на работу вибратора не оказывает, так что эту систему можем просто выкинуть из рассмотрения. Так и делаем дальше, чтобы упростить расчётные формулы (это соответствует требованию к конструкции источника в том, что оператор (шофёр) сидит на массе M_{pr} и его тряссти нельзя!).

Когда сопротивление Z_{pr} выкинем, тогда уравнение (1.2) напряжений приобретает вид

$$\begin{aligned} -J_i p M_i - J_{pl} [p M_{pl} + Z_g] &= 0, \\ -J_i p M_i - (J_{pl} p M_{pl} + F_g) &= 0, \end{aligned}$$

где $F_g = J_{pl} Z_g$ – сила, действующая на грунт.

Из электрической схемы видно, что напряжение, рождённое элементом F_o , тратится на преодоление внутреннего сопротивления R_o и дальше разветвляется, то есть действует на параллельное сопротивление Z_η , то есть $F_o = Z_\eta J_o$. Параллельное сопротивление Z_η определяется по формуле:

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z_\eta} &= \frac{1}{p M_i} + \frac{1}{p M_{pl} + Z_g}, \\ Z_\eta &= \frac{p M_i (p M_{pl} + Z_g)}{p M_i + p M_{pl} + Z_g} = \frac{p^2 M_i (p M_{pl} + Z_g)}{K P_{gsnam}}, \end{aligned}$$

так как знаменатель этого выражения можно записать так:

$$\begin{aligned} p M_i + p M_{pl} + p M_g + R_g + (1/p) K_g &\equiv \\ \equiv (1/p) K_g [p^2 M_i / K_g + p R_g / K_g + 1] &= \\ = (1/p) K_g \cdot P_{gsnam}^o & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{gsnam}^o &\equiv (p^2 M_i / K_g + p (R_g) / K_g + 1), \\ M_{ipg} &= M_i + M_{pl} + M_g. \end{aligned}$$

Здесь так же можно ввести обиходные на практике обозначения:

$$\Omega_{ipg}^2 \equiv K_g / M_{ipg}, \quad \Omega_{ipg} = 2\pi f_{ipg}, \quad (1.4)$$

где f_{ipg} – частота резонанса массы $M_i + M_{pl} + M_g$, подвешенной или установленной на пружине с жёсткостью K_g .

Безразмерное слагаемое $p R_g K_g / K_g$ запишем в виде:

$$[(p R_g) / K_g] \cdot [\Omega_{ipg} / \Omega_{ipg}] = (p / \Omega_{ipg}) \cdot (R_g \Omega_{ipg}) / K_g$$

Множитель $[R_g \cdot \Omega_{ipg} / K_g]$ безразмерный, так как (K_g / Ω_{ipg}) имеет размерность сопротивления. Безразмерный параметр $Q_g \equiv q_g$ совпадает с понятием «добротность» контура M_{ipg} , R_g , K_g . Заметим, что в литературе по сейсмоприёмникам принято параметр $h \equiv (1/2) \Omega_{ipg} \cdot Q_g^{-1}$ называть "коэффициентом затухания".

Напряжение в точке a_2 , то есть F_o , что то же самое, напряжение F_{pl} , падающее от точки a_2 до точки a_{10} , можем определять по формулам:

$$F_o = J_{pl} (p M_{pl} + Z_g), \quad F_o = J_i p M_i, \quad F_o = J_o Z_\eta$$

Входящие и выходящие из точки a_2 токи даются равенством $J_o = J_i - J_{pl}$. Подставим в предыдущие формулы выражение:

$$F_o = J_o Z_\eta = J_o \cdot [p^2 M_i (p M_{pl} + Z_g)] / (K_g P_{gsnam}).$$

С другой стороны $F_o = J_{pl} (p M_{pl} + Z_g)$. Поэтому $J_{pl} = J_o p^2 M_i / [K_g P_{gsnam}]$.

Все три выражения для F_o верны, так как из точки a_2 выходят три ветви. Отсюда сила, действующая на грунт, будет равна:

$$\begin{aligned} F_g &= Z_g J_{pl} = J_o p M_i \cdot [Z_g^o / P_{gsnam}], \\ J_o p M_i &= U_o p^2 M_i \equiv F_\otimes, \quad U_o \equiv U_i - U_{pl}, \end{aligned}$$

Здесь резонанс наступает при выполнения условия:

$$[p^2 (M_i + M_{pl} + M_g) / K_g] + 1 = 0$$

У нас имеются три формулы, определяющие силу F_o , рождающуюся внутри

цилиндра гидравлического вибратора. Они очевидны из электрической схемы (см. рисунок 1.Г).

Сила F_{pl} , действующая на виброплатформу, равна

$$F_{pl} = J_{pl}(pM_{pl} + Z_g) = F_o.$$

Отсюда $J_{pl} = F_o / (pM_{pl} + Z_g)$,

$$pM_{pl} + Z_g \equiv pM_{pl} + pM_g + R_g + (1/p)K_g = \\ = (1/p)K_g [p^2(M_g + M_{pl})/K_g + R_g/K_g + 1].$$

Здесь резонанс наступает при выполнении условия:

$$[p^2(M_{pl} + M_g)/K_g] + 1 = 0,$$

то есть на частоте, равной:

$$\Omega_{pg}^2 = K_g / (M_{pl} + M_g); \Omega_{pg} = 2\pi \cdot f_{pg}$$

А при использовании предыдущего выражения резонанс Ω_{pg} имеет место, если:

$$[p^2(M_i + M_{pl} + M_g)/K_g] + 1 = 0,$$

то есть при $p^2 / \Omega_{pg}^2 = 1$, $f_{pg}^2 = (1/(2\pi)^2) \Omega_{pg}^2$.

Частоты f_{pg} , f_{ipg} существенно разные, но чтобы получить численные значения, надо сначала «оживить» грунт. Для этого переведем эти формулы на «сейсморазведочный язык».

Сопротивление грунта определяется по формуле:

$$Z_g = pM_g + R_g + (1/p)K_g.$$

Одиночный круглый штамп имеет [1.6, 1.7]

$$M_g^{\otimes} = (1-\gamma^2) \rho_g r_o^3, \quad R_g^{\otimes} = 7(1-\gamma^2) \rho_g V_s r_o^2, \\ K_g^{\otimes} = 8(1-\gamma^2) \rho_g V_s^2 r_o,$$

где $M_g^{\otimes}$ - присоединенная масса, $R_g^{\otimes}$ - демпфер, $K_g^{\otimes}$ - жесткость грунта, V_s - скорость поперечной волны.

Но, разумеется, эти формулы можно «перевести» на «древний» (классический) язык. Из классики имеем:

модуль сдвига $\mu = \rho_g V_s^2 = E_{ju} / [2(1+\nu)]$, где E_{ju} - модуль Юнга; формулу

$$2(1-\gamma^2) = 1 / (1-\nu), \quad \gamma^2 \equiv V_s^2 / V_p^2.$$

Из этой формулы при $\gamma^2 = 1/3$ имеем $\nu = 1/4$. Такой грунт называют «средой Пуассона».

В работе [1.5] считают $E_{ju} = 5 \cdot 10^7$.

При $\rho_g = 1.6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\nu = 1/4$ это означает, что $V_s^2 = 5 \cdot 10^7 / [2 \cdot 1.25 \cdot 1.6] = (5/4) \cdot 10^4$,

$$V_s = 112 \text{ m/sec}.$$

В качестве примера рассмотрим американский вибратор "X-Vib" [1.5], у которого $M_i = 3500$ кг, $M_{pl} = 1600$ кг, платформа имеет прямоугольную форму длиной $L = 2.5$ м, шириной $B = 1.25$ м. Параметры других американских вибраторов близки к приведенным цифрам.

Как определить величину "присоединенной массы" M_g ? На платформе с размером $2,5 \cdot 1,25 \text{ m}^2$ поместятся два круглых источника. Присоединенная масса для одного такого источника, стоящего на грунте с плотностью $\rho_g = 1.6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, будет иметь площадь

$$S_1 = (1/2) \cdot 2,5 \cdot 1,25 = \pi r_o^2 = 1.56 \text{ m}^2,$$

$$r_o^2 = 1.56 / 3.14 = 0.5 \text{ m}^2, \quad r_o = 0,7.$$

Отсюда масса

$$M_{g1} = (2/3) \cdot 1.6 \cdot 10^3 \cdot 0.7^3 = (2/3) \cdot 1,6 \cdot 10^3 \cdot r_o^3 = 10^3 \cdot r_o^3 = 366 \text{ кг}.$$

Два таких круглых источника будут иметь $M_g = 732 \text{ kg}$.

Итого

$$M_{ipg} \approx (3,5 + 1,6 + 0.732) \cdot 10^3 = M_i + M_{pl} + M_g = 5832 \text{ kg}.$$

Определим жесткость грунта для одиночного штампа

$$K_g^{\otimes} = 8(1-\gamma^2) \rho_g V_s^2 r_o, \quad \rho_g = 1,6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3, \\ r_o = 0.7 \text{ m},$$

$$K_g^{\otimes} = 8 \cdot (2/3) \cdot 1,6 \cdot 10^3 \cdot V_s^2 \cdot 0.7 = 6 \cdot 10^3 \cdot V_s^2$$

Два штампа будут иметь

$$K_g^{\otimes\otimes} = 2K_g^{\otimes} = 1,2 \cdot 10^4 \cdot V_s^2$$

Заметим, что для вибратора, работающего на дневной поверхности, решающее значение имеют характеристики грунта ($\rho_g V_s^2$) на глубинах до 0.5 – 1 м. Измерить величину V_s на такой короткой базе (0.5 – 1 м) затруднительно. Испол-

зовать аппаратуру для ультразвукового акустического моделирования бесполезно, так как эти волны в почвенных грунтах очень быстро затухают. Эксперименты автора и его коллег показывают, что в почвенном грунте $V_s \approx 50-70 \text{ m/sec}$. На «утоптанной» просёлочной дороге $V_s \approx 100 \text{ m/sec}$. При $V_s \approx 100 \text{ m/sec}$ будем иметь:

$$\begin{aligned}\Omega_{ipg}^2 &\equiv K_g^{\otimes\otimes} / M_{ipg} = 1,2 \cdot 10^8 / 5846 = \\ &= (12 / 5.846) \cdot 10^4 \approx 2.05 \cdot 10^4, \\ \Omega_{ipg} &= 143, f_{ipg} = 22.8 \text{ Гц}.\end{aligned}$$

Приводимая ниже таблица рассчитывалась по формуле:

$$\begin{aligned}F_g &= Z_g J_{pl} = F_g^{\otimes} Z_g^{\circ} Z_{ob}^{\circ}, F_g^{\otimes} \equiv p^2 U_o M_i, U_o \equiv U_i - U_{pl}, \\ Z_g^{\circ} &\equiv p^2 M_g / K_g + (p / \Omega_{ipg}) q_g^{-1} + 1 = \\ &= 1 - (M_g / M_{ipg}) x^2 + jx / q, \\ Z_{ob}^{\circ} &\equiv p^2 (M_{ipg} / K_g) + 2hp + 1 = 1 - x^2 + jx / q; \\ x &= f / f_{ipg}, 2h \equiv R_g / K_g = 1 / (q_g \Omega_{ipg}).\end{aligned}$$

► Табл.1

$x = f / f_{ipg}$	$q_g = 1/4;$ $c=10$	$q_g = 1/2$	$q_g = 3/4$	$q_g = 1.0$	$q_g = 2.0$ $c=10$	$q_g = 2.0$ $c=100$
0.25	1.029	1.047	1.054	1.057	1.06	1.066
0.5	1.048	1.118	1.179	1.218	1.27	1.304
0.75	1.038	1.136	1.263	1.392	1.77	1.185
0.85	1.034	1.126	1.258	1.412	2.02	2.14
1.0	1.025	1.098	1.221	1.351	2.073	2.23
1.5	0.988	0.955	0.912	0.869	0.745	0.86
2	0.939	0.810	0.683	0.582	0.37	0.45
3.0	0.832	0.620	0.448	0.352	0.186	0.22
4.0	0.73	0.47	0.336	0.259	0.136	0.15
5.0	0.641	0.391	0.275	0.213	0.117	0.11

Таблица рассчитывалась в точках $x = f / f_{ipg} = 0.25; 0.5; 0.75; 0.85; 1; 1.5; 2; 3; 4; 5$ в предположении, что грунт "типичный", $K_g^{\otimes\otimes} = 2K_g^{\otimes} = 1,2 \cdot 10^8$, что в диапазоне частот $x = 0.25 \leftrightarrow 5$ величина $F_g^{\otimes} \equiv p^2 U_o M_i = \text{const}$. Расчёты выполнялись при добротностях $q_g \leq 2$, $q_g \equiv Q_g$. Почему? А просто, в первых моделях вибраторов системы Вибро-сейс™ эти вибраторы настраивались так, чтобы выполнялось условие $F_g / (g_o \sum M) \leq 0.8$, где $g_o \sum M$ - сила тяжести всех масс,

вовлекаемых для прижима виброплатформы к грунту. При нарушении этого требования вибратор выдавал брак (можно сказать - "врождённый недостаток" гидравлических вибраторов). При $q_g \approx 2$, как видно из таблицы, вышеуказанное условие было бы нарушено. С вибраторами, настроенными согласно требованию $F_{g,\max} \leq 0.8 \cdot g_o \sum M$, было отработано много тысяч пог. км сейсмических профилей. Это означает, что на этих профилях имело место $q_g \leq 1$. Упомянутый выше вибратор имеет $g_o \sum M = 39.56$ тонн, $F_{g,\max} = 27.5$ тонн, $f_{ipg} \approx 20$ Гц.
 $\beta = F_g / F_{\oplus}$, $c \equiv M_{pg} / M_g$, q_g - добротность грунта.

Отсюда видно, что при увеличении частоты в 2 раза ($x=2$, $q_g=1$) сила F_g уменьшается в ≈ 2 раза, что вполне стыкуется с экспериментальными графиками из работы [1.5].

Главный вывод из приведённых формул и расчётов состоит в следующем.

На частотах $x=0 \div 1$ сила F_g , действующая на грунт, приблизительно равна силе $F_g^{\otimes} \equiv p^2 U_o M_i$. Величину $F_g^{\otimes} \equiv p^2 U_o M_i$ пытаются, обычно, сохранить постоянной в рабочем диапазоне частот. Резкий спад силы F_g имеет место на частотах $f > f_{ipg}$.

Из-за существования острого низкочастотного (15÷20 Гц) резонанса появляется проблема избыточности низкочас-

тотных и дефицита высокочастотных составляющих. Обеспечение широкополосности сигнала (частотного диапазона 7÷120 Гц) можно выполнить за счёт увеличения длительности вибрационного воздействия T_v . Из таблицы 1 видно, что амплитуду сигналов на частотах 100÷120 Гц надо поднять не меньше, чем в 10 раз. Известно, что отношение сигнал/помеха растёт как $\approx T_v^{1/2}$. Если, например, диапазон частот 15÷30 Гц (одна октава) вибратором отрабатывается за $T_{1v}=5$ с, то чтобы получить такое же отношение сигнал/помеха при отработке октавы 60÷120 Гц понадобится $T_v=100 \square T_{1v}=500$ с. Ничего страшного в этом нет, была бы воля геофизика-интерпретатора. Заметим, что к увеличению длительности вибрации на высоких частотах призывает также Ю.П. Кострыгин [1.5], но только он призывает увеличивать длительность вибрационного воздействия не в 100 раз, а гораздо скромнее.

Далее вопрос поставим так: какова должна быть инертная масса M_i или величина $M_i \cdot L$, чтобы в диапазоне от 7,5 до 240 Гц "паспортная" амплитуда силы $F_0 = \omega^2 L M_i$ была бы равна 50 тонн. Для конкретности возьмём амплитуду колебаний инертной массы равной $0.1L =$ м. На частоте 7.5 Гц силу $F_0 = \omega^2 L M_i = 50$ тонн $= 5 \cdot 10^5$ будем иметь при $M_{i(1)} = 5 \cdot 10^5 / (0.1 \omega^2) = 5 \cdot 10^5 / (0.1 \cdot 40 \cdot 7.5^2) = 5 \cdot 10^5 / (4 \cdot 7.5^2) = 5 \cdot 10^5 / 225 = 2222$ кг.

На частоте 15 Гц силу 50 тонн получим при $M_{i(2)} = M_{i(1)} / 4 = 2222 / 4 = 555$ кг.

И на частотах 30–60–120 Гц будем иметь $M_{i(3)} = M_{i(2)} / 4 = 555 / 4 = 138.875$ кг, $M_{i(4)} = M_{i(3)} / 4 = 138.875 / 4 = 34.72$ кг, $M_{i(5)} = 8.68$ кг, $M_{i(6)} = 2.17$ кг.

И так, первый член этого ряда $M_{i(1)} = 2.22 \cdot 10^3$ кг, а шестой член $- M_{i(6)} = 2.17$ кг. Отсюда видно, что совместить величины $M_{i(1)} = 2.22 \cdot 10^3$ кг и $M_{i(6)} = 2.17$ кг в одной установке - дело трудное. Ясно, что эту задачу надо облегчить. Поэтому автор предлагает диапазон 7,5 - 240 Гц разделить на участки, например, на 5 октав:

$f = 7.5-15, 15-30, 30-60, 60-120, 120-240$ Гц.

В дебалансных вибраторах это делает-

ся довольно просто (см. 2-ю часть статьи). Выше было сказано, что в гидравлических вибраторах величину $F_0 = p^2 U_0 M_i$ стараются сохранить постоянной. Если же «не пытаться» это делать, то силу на частотах $f > f_{\text{ипг}}$ можно поднять за счёт множителя до необходимого уровня.

Заключение

Автор рекомендует частотный диапазон 7÷240 Гц разделить на 5 октав (7.5÷15, 15÷30, 30÷60, 60÷120, 120÷240 Гц) и на каждой октаве использовать свой отдельный (автономный) вибратор, имеющие резонанс на верхней частоте октавы и амплитуду силы 50 (25) тонн в пределах одной (каждой) октавы. Можно ли это сделать при помощи гидравлики? Почему бы нет. Для этого понадобятся 5 гидравлических силовых камер.

Литература.

- 1.1. Гамбурцев Г.А. О составлении электромеханических аналогий / Докл. АН СССР. Т.4. 8/9. 1935.
- 1.2. Гарднер М.Ф., Бернс Дж.Л. Переходные процессы в линейных системах с сосредоточенными постоянными. - М.: Изд.-во физ.-мат. лит., 1961.
- 1.3. Гогоненков Г.Н. Изучение детального строения осадочных толщ сейсморазведкой. - М.: Недра, 1987. - 221 с.
- 1.4. Косте Ж., Санглер Г. Механика грунтов. М.: Стройиздат, 1981. - 455 с.
- 1.5. Кострыгин Ю.П. Сейсморазведка на сложных сигналах. Тверь: Изд.-во ГЕРС, 2002. - 416 с.
- 1.6. Чичинин И.С. Вибрационное излучение сейсмических волн. М.: Недра, 1984. - 224 с.
- 1.7. Чичинин И.С. Механизм формирования сейсмических волн при вибрационном воздействии на грунт. Глава в монографии "Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками" под ред. Цибульчика Г.М. Новосибирск: Изд.-во. СО РАН, 2004. - 386 с.
- 1.8. Сагайдачная О.М. Современные технологии вибросейсмических исследований. Учебное пособие. Новосибирск: Изд.-во Новосиб. гос. университет, 2007. - 132 с.
- 1.9. Alekseev A.S., Chichinin I.S., Korneev V.A. Powerful Low-Frequency Vibrators for Active Seismology. Journal of Geophysical Research. V. XXXX, 2003.
- 1.10. Жуков А.П., Колесов С.В., Шехтман Г.А., Шнеерсон М.Б. Сейсморазведка с вибрационными источниками. - Тверь, ООО "Издательство ГЕРС", 2011. - 412 с.