

УДК 550.834(075)

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЗКИ ИМПУЛЬСНОГО НАЗЕМНОГО ИСТОЧНИКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

В.П. ПЕВЧЕВ

(Тольяттинский государственный университет)

Предложена математическая модель нагрузки импульсного наземного источника сейсмических волн, позволяющая выбирать параметры основных элементов его конструктивной схемы при воздействии на грунт с превышением предела его упругости.

Ключевые слова: сейсмоисточник, эффективность, продольные сейсмические волны, график колебаний.

Введение. Сейсморазведка является одним из основных методов поиска полезных ископаемых. Эффективность сейсморазведочных работ определяется в значительной мере характеристиками источников сейсмических сигналов. Очевидным способом генерации сейсмических волн с поверхности грунта является деформация ее источником мощных механических воздействий (импульсных или вибрационных).

В конструкциях наземных импульсных сейсмоисточников, как правило, есть помещенная на поверхность грунта плита – излучатель, – над которой расположен массивный груз. Податливость излучателя и груза значительно меньше податливости грунта. Для импульсного воздействия через плиту на грунт груз сбрасывают на нее с заданной высоты (первый способ) или в сейсмоисточнике срабатывает специальный мощный импульсный привод (в настоящее время используется в основном электромеханический), отталкивающий груз от плиты (второй способ) [1].

Большое значение при проектировании автономного импульсного сейсмоисточника с ограниченным запасом энергоносителя имеет эффективность преобразования энергии привода или падающего груза в энергию сейсмических волн. Известно, что лишь часть механической энергии, переданной излучателю, преобразуется в целевые сейсмические волны – объемные продольные или поперечные. Часть ее преобразуется в поверхностные волны, являющиеся при сейсморазведке помехами. Распределение энергии генерируемых волн у современных сейсмоисточников с перпендикулярным поверхности воздействием на грунт такое: продольные – 7-9%, поперечные – 18-25%, поверхностные – 68-75% [2, 3]. Столь нерациональное использование механической энергии в немалой степени обусловлено отсутствием возможности оптимизировать параметры воздействия сейсмоисточника на грунт на этапе проектирования, а подбор размеров излучателя изготовленного серийного сейсмоисточника экономически нецелесообразен. В сложившейся ситуации ведущие сейсморазведочные работы организации вынуждены использовать сейсмоисточники, имеющие запас по мощности и генерирующие волны в широком диапазоне частот.

Расчетные модели взаимодействия вибрационного источника с полупространством грунта, позволяющие оптимизировать параметры воздействия на грунт, описаны [4, 5], а для импульсных сейсмоисточников адекватных указанных моделей нет, что является проблемой. Моделирование и исследование процесса взаимодействия наземного импульсного сейсмоисточника с нагрузкой – грунтом – актуальны и имеют прикладную и научную значимость при постановке новых задач сейсморазведки и при проектировании сейсмоисточников.

Цель исследования – разработка простой и адекватной математической модели нагрузки импульсного наземного сейсмоисточника в соответствии с поставленными задачами сейсморазведки, пригодной для оценки соответствия параметров формируемого механического импульса (величины, формы и длительности) размерам излучателя.

Методики моделирования процесса генерирования сейсмических волн механическим воздействием. Общее решение задачи о распространении в однородном упругом полупространстве произвольного воздействия, приложенного к свободной поверхности через излучатель ограниченной площади, известно как задача Лэмба. Согласно этому решению, при импульсном воздействии на полупространство в нем возникают и распространяются волны четырех типов: объемные продольные и поперечные, поверхностные и обменные, обусловленные взаимными преобразованиями волн разного типа на границах областей их существования [4]. Эти волны распространяются от излучателя по различным секторам и с различными скоростями: самая большая скорость у продольных волн, самая маленькая – у поверхностных.

Объемная продольная волна в грунте, генерируемая расположенным на нем излучателем, распространяется в секторе, ось которого совпадает с перпендикуляром к поверхности в центре излучателя. В пределах этого сектора для математического описания процесса генерации сейсмической волны можно использовать модель «сферического источника» [4] (реализуемого взрывом в скважине либо пульсирующим в воде газовым пузырем). Эта модель дает математическую трактовку нескольких простых физических принципов, что позволяет на их основе формулировать практические рекомендации. Для объемной продольной волны характерно следующее:

- имеет на любом расстоянии от источника определяющийся характером поля смещений на границе источника так называемый «график колебаний». Характер поля смещений источника представляет собой сравнительно быстро затухающие (в течение трех-четырех периодов) колебания;

- в пределах зоны не более одной длины волны от излучателя, кроме смещений грунта колебательного характера, обусловленных прохождением волн сжатия и разрежения, присутствуют также смещения вынужденного характера – аperiodические. «График колебаний» в этой зоне содержит составляющие, пропорциональные и характеру поля смещений (с коэффициентом $1/r^2$, где r – расстояние от излучателя) и первой производной от него (с коэффициентом $1/r$) [4]. На значительном удалении от источника (более одной длины волны) из-за затухания вынужденной составляющей «график колебаний» приобретает практически неизменную форму, определяющуюся в основном первой производной от характера поля смещений (скоростью смещения). Регистрация сигналов в сейсморазведке осуществляется датчиками скорости;

- так как сила воздействия импульсного сейсмоисточника на грунт изменяется во времени, то в «графике колебаний» на значительном удалении от излучателя можно выделить две составляющие. Одна определяется размерами излучателя и волновыми свойствами грунта, а вторая – скоростью движения излучателя.

Однако в модели «сферического источника», как и во многих других математических моделях и решениях задач теории упругих колебаний, используется однородная среда. С использованием этой модели сложно установить соответствие характеристик излучаемого импульсным

сейсмоисточником сигнала параметрам механического импульса, а также размерам излучателя, так как не учитывается множество следующих важных факторов, например:

- невысокие (менее $5 \cdot 10^5$ Па) значения предела упругости в поверхностном слое грунта – в так называемой зоне малых скоростей (ЗМС) – и уменьшение модулей упругости (Юнга, Ламе) при уменьшении скорости воздействия;
- многокомпонентная неоднородная структура грунта (газ, жидкость, твердые фракции различных форм и размеров);
- свойство грунта уплотняться в ходе каждого сжатия и разрыхляться при снятии с него давления, т.е. изменчивость его структуры – «скелета» – и т. д.

Таким образом, использование структурных распределенных математических моделей нагрузки импульсного сейсмоисточника, в которых объектами исследования являются поля физических величин, ограничено. Число совместно исследуемых различных сред (число деталей, материалов, фаз агрегатного состояния) в практически используемых моделях такого уровня не может быть большим ввиду сложности вычислительного характера. Кроме того, для исследования только лишь динамических характеристик сейсмоисточника такая модель избыточна. Для этой цели может оказаться достаточной модель грунта с сосредоточенными параметрами. Для ее построения необходимо провести ранжирование свойств грунта как нагрузки сейсмоисточника и включить в ее модель наиболее значимые свойства.

Свойства поверхностного слоя грунта. Основным ограничивающим фактором процесса генерации сейсмических волн в грунте, который обязательно должен быть учтен в модели, является предел упругой деформации σ_y грунта. Зависящие от величины σ_y предельные значения параметров воздействия сейсмоисточника на грунт определяются по известным формулам:

- максимальная скорость смещения частиц грунта в продольной волне упругих деформаций, задающая предел скорости v_{\max} движения излучателя [6]:

$$v_{\max} = \sigma_y / (\rho v_p), \quad (1)$$

где ρv_p – волновое сопротивление грунта, Па·с/м; ρ – плотность грунта, кг/м³; v_p – скорость распространения продольных сейсмических волн в грунтовом полупространстве, м/с:

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}.$$

Здесь E – модуль Юнга, Па; μ – коэффициент Пуассона. При скорости движения излучателя большей v_{\max} грунт под ним подвергается пластическим деформациям;

- максимальное время действия деформаций сжатия определяется временем, после которого избыточное давление в волне напряжений в грунте, контактирующем с движущимся вниз излучателем, исчезает [7]:

$$t_{\max} = D/v_p, \quad (2)$$

где D – диаметр излучателя (для излучающей поверхности круглой формы), м:

$$D = 2\sqrt{S_A/\pi},$$

S_A – площадь излучающей поверхности, м²:

$$S_A \geq F_{\max}/\sigma_y. \quad (3)$$

Здесь F_{\max} – максимальное значение развиваемого сейсмоисточником усилия F воздействия на грунт. При превышении F_{\max} также возникают пластические деформации грунта;

– минимальное время действия деформаций [6]:

$$t_{\min} = x_{\max} / v_{\max} = x_{\max} \rho v_p / \sigma_y, \quad (4)$$

где x_{\max} – максимальное значение упругих деформаций грунта под излучателем, м. Если пренебречь неравномерностью нагрузки по площади излучающей поверхности, то получим:

$$x_{\max} \approx D \sigma_y / E,$$

$$t_{\min} = \rho v_p D / E.$$

Известно, что предел упругой деформации для неуплотненных поверхностных слоев грунта весьма мал: $\sigma_y = (2-5) \cdot 10^5$ Па, и при характерных для них значениях плотности $\rho = 1500-1800$ кг/м³, модуля $E = 10^8-10^9$ Па и скорости $v_p = 100-500$ м/с, максимально допустимая скорость вертикальных деформаций $v_{\max} = 1-2$ м/с [6]. При этом при диаметре излучателя сейсмоисточника один метр время действия деформаций лежит в диапазоне от $t_{\min} = (1-5) \cdot 10^{-3}$ с до $t_{\max} = (4-20) \cdot 10^{-3}$ с (середина диапазона $(4-7) \cdot 10^{-3}$ с), сила воздействия на грунт ограничена значением $(2-5) \cdot 10^5$ Н, а максимальное значение упругих деформаций грунта $x_{\max} = (2-4) \cdot 10^{-3}$ м.

Следовательно, лишь при малой скорости движения излучателя и малом давлении на поверхность грунта механическая энергия сейсмоисточника независимо от его размеров и мощности может использоваться эффективно, так как интенсивность генерируемых волн прямо пропорциональна величине упругих деформаций, вызвавших колебания. При более высокой скорости воздействия на грунт в зоне контакта излучателя с ним происходят пластические деформации грунта (сжатие под излучателем и сдвиг по его периметру) до глубины, на которой скорость смещения частиц грунта уменьшается до величины v_{\max} . «Избыточная» механическая энергия сейсмоисточника не участвует в создании целевых сейсмических волн, а лишь увеличивает интенсивность поверхностных волн – помех – приводит к увеличению запаса «реактивной» механической энергии в конструкции сейсмоисточника.

Максимальная длительность воздействия сейсмоисточника ограничена также тем, что его излучатель для обеспечения необходимой жесткости при заданных площади контакта с грунтом и площади, на которую воздействует импульс силы механического привода, может иметь значительную массу. Колебательная система – массивный излучатель на упругом грунте («очаг излучения» [4, 5]) – имеет частоту собственных колебаний:

$$\omega_0 = \sqrt{1/(m_1 + m_g) e_g}, \quad (5)$$

где m_1 – масса излучателя, кг; m_g – «присоединенная масса» грунта [8], кг; e_g – податливость грунта под излучателем, м/Н.

Если привод сейсмоисточника создает силу воздействия на излучатель, направленную вниз, в течение времени, большего половины периода собственных колебаний этой колебательной системы, то часть его механической энергии расходуется не на создание сейсмической волны, а на торможение движущегося вверх излучателя, т.е. неэффективно. Величина t_{\max} , соответствующая по формуле (5) длительности одного полупериода: $t_{\max} = \pi/\omega_0$, определяется также по формуле (2). Если t_{\max} , определенная по формуле (2), меньше π/ω_0 , то излучатель необходимо облегчать.

Очаг излучения играет также роль фильтра, подавляющего колебания, частота которых отличается от частоты ω_0 [4]. Поэтому изменение размеров и формы излучателя в не меньшей мере обусловлено техническими требованиями к частотным характеристикам излучаемого сейсмоисточником сигнала.

Известные модели грунта. Для нужд строительства в науке о грунтах используются модели с сосредоточенными параметрами, разработанные для определения его несущей способности, в том числе и при воздействии на него импульсных или вибрационных нагрузок. Но известные методики определения параметров этих моделей в статике для решения поставленной в исследовании задачи неприменимы. Можно воспользоваться лишь элементами структуры этих моделей. Все такие модели грунта представляют его как систему, обладающую упругими и диссипативными свойствами [9]. Некоторые модели просты: модели Кельвина – Фойгта и Максвелла (рис.1, а, б), некоторые сложнее. Например, модель Шведова (рис.1, в), которая содержит кроме элемента e_g , моделирующего упругие свойства грунта, и элемента s_v , моделирующего вязкое трение в грунте, элемент s_p , моделирующий пластические изменения грунта.

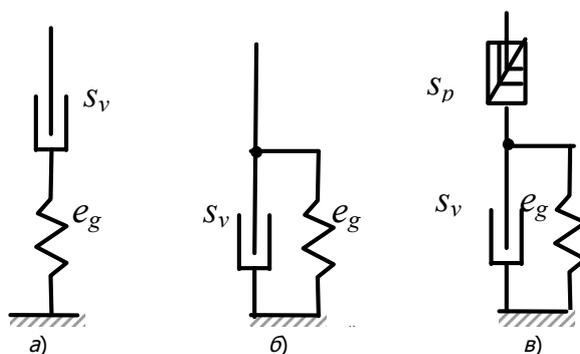


Рис.1. Статические модели грунта

Для моделирования процесса взаимодействия излучателя вибрационного сейсмоисточника с грунтом используется $m_g e_g s_g$ модель нагрузки (рис.2) [5], где m_g – масса прилегающего к излучателю грунта, колеблющегося в фазе с излучателем, кг; e_g – податливость грунта, м/Н; s_g – «сопротивление излучения», Н·с/м:

$$m_g = k_m \rho R^3 \approx 1,3 \rho R^3, \quad (6)$$

$$e_g = \frac{k_e}{\rho R v_p^2} \approx \frac{12}{\rho R v_p^2}, \quad (7)$$

$$s_g = k_s \rho R^2 v_p \approx 5 \rho R^2 v_p, \quad (8)$$

где R – радиус излучателя, м; k_m, k_e, k_s – эмпирические коэффициенты.

Ее $L_g C_g R_g$ аналог в системе электромеханических аналогий «сила $F \leftrightarrow$ напряжение U », представлен в докладе академии наук [10].

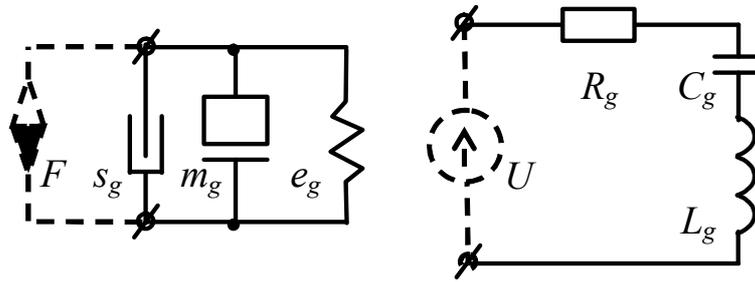


Рис.2. Линейная модель грунта под сейсмоисточником и ее электрический аналог

Линейная $m_g e_g s_g$ модель упругого полупространства применима в исследованиях сейсмоисточников лишь при соблюдении ограничений (1)-(4). Для более широкого диапазона изменения параметров воздействий на грунт определение параметров модели грунта (6)-(8) вызывает трудности. Продольная волна деформаций, инициированная вертикальным движением излучателя импульсного сейсмоисточника, при скорости смещения частиц грунта больше v_{\max} [см. формулу (1)] является в значительной мере волной пластических деформаций. Из-за них возрастает масса прилегающего к излучателю грунта m_2 и может снижаться частота ω_0 [см. формулу (5)]. Лишь после уменьшения скорости смещения частиц грунта на некотором расстоянии от излучателя до значения v_{\max} продольная волна становится волной в основном упругих деформаций.

Предлагаемая модель грунта. Для учета отмеченных свойств колебательной системы «излучатель сейсмоисточника – грунт» ее расчетную электрическую схему замещения можно составить из следующих блоков (рис.3).

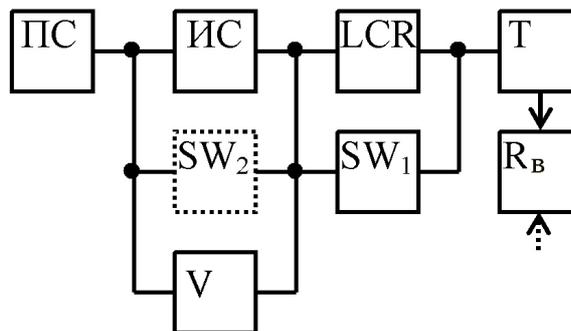


Рис.3. Структура предлагаемой модели грунта

Блок LCR выполняет функцию упругой опоры для излучателя сейсмоисточника – ИС. Это модель типа $m_g e_g s_g$ (см. рис.2), формирующая «график колебаний». Присоединенную массу m_g грунта зададим как нелинейный параметр. Пусть ее величина изменяется от нуля до рассчитанного по формуле (5) значения за время прохождения волной расстояния, равного диагонали излучателя [8]:

$$\text{при } t < \frac{2R}{v_p}: m_g = 0,65\rho v_p R^2 t.$$

Блок SW_1 моделирует с помощью управляемых электрических ключей контакт излучателя с грунтом. Излучатель при движении вверх отрывается от грунта в момент, когда сила их взаимодействия становится нулевой, и вновь соприкасается с ним, вернувшись в исходное относительно него положение. Для сейсмоисточника, привод ПС которого реализует ударный способ воздействия, добавляется показанный пунктиром блок SW_2 , моделирующий контакт и процесс частично-упругого соударения падающего груза с излучателем.

Блок V моделирует снижение напряжений в сжимаемом грунте до уровня, задаваемого пределом упругости грунта σ_y . Если скорость $v_{и}$ движения излучателя превышает рассчитанную по формуле (1) величину, то избыточная скорость «гасится» с помощью функционального источника J (тока \leftrightarrow скорости [10]). Силу тока такого источника определим функцией вида:

$$J = if(v_{и} > v_{max}, v_{и} - v_{max}, 0).$$

Выходной блок представляет собой линию задержки T , нагруженную волновым сопротивлением R_b грунта, равным ρv_p . Сигнал на линию задержки подается с резистора R_g блока LCR, т.е. является пропорциональным скорости смещений частиц грунта. Регулированием затухания в линии задержки и ее длины (времени прохождения волны) можно настроить модель на известный по результатам полевых сейсморазведочных работ на эталонном профиле случай и в последующем использовать его в качестве базы для сравнения эффективности одиночных сейсмоисточников или их групповой работы. На практике фиксация сейсмоприемниками отражений сейсмических волн с очень большой глубины недоступна из-за наличия сейсмических шумов. Следовательно, по результатам моделирования можно будет считать более эффективным тот сейсмоисточник, сигнал с выходного блока которого будет превышать заданный уровень шума по прошествии большего времени.

Моделирование групповой работы сейсмоисточников в этой модели достигается возможностью подключения к общему блоку R_b выходов линий задержки T от схем замещения нескольких сейсмоисточников.

Заключение. Предложенная модель может быть реализована как в программах численного расчета систем дифференциальных уравнений, так и с применением программных комплексов электрических схем, например, Micro-Cap, PSpice и т.д. [11]. В настоящее время продолжается сопоставление результатов, получаемых с ее использованием, с экспериментальными.

Библиографический список

1. Майоров В.В. Наземная невзрывная сейсморазведка / В.В. Майоров, М.Б. Шнеерсон. – М.: Недра, 1988. – 237 с.
2. Miller G.F. Partition of energy between elastic waves / G.F. Miller, H. Pursey // Proceedings of the Royal Society. – 1955. – A233.
3. Опарин В.Н. Геомеханические и теоретические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях / В.Н. Опарин [и др.]. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 2010. – 404 с.
4. Боганик Г.Н. Сейсмическая разведка: учебник для вузов / Г.Н. Боганик, И.И. Гурвич. – М.: Недра, 1980. – 551 с.
5. Чичинин И.С. Вибрационное излучение сейсмических волн / И.С. Чичинин. – М.: Наука, 1984. – 223 с.

6. Молоканов Г.И. Преобразование механической энергии в сейсмическую при ударе по поверхности / Г.И. Молоканов // Разведочная геофизика. – М., 1979. – Вып.65. – С.3-12.
7. Харкевич А.А. Избранные труды. В 3 т. Т.1. Теория электроакустических преобразователей. Волновые процессы / А.А. Харкевич. – М.: Наука, 1973. – 399 с.
8. Григолюк Э.И. Взаимодействие упругих конструкций с жидкостью / Э.И. Григолюк, А.Г. Горшков. – Л.: Судостроение, 1976. – 200 с.
9. Амарян Л.С. Свойства слабых грунтов и методы их изучения / Л.С. Амарян. – М.: Недра, 1990. – 220 с.
10. Гамбурцев Г.А. О составлении электромеханических аналогий / Г.А. Гамбурцев // Докл. акад. наук СССР. – 1935. – № 8-9. – С.303.
11. Певчев В.П. Использование программы Micro-Cap при моделировании процесса срабатывания импульсных электромеханических устройств / В.П. Певчев // Электротехника. – 2010. – №4. – С.55-59.

Материал поступил в редакцию 21.03.2011.

References

1. Majorov V.V. Nazemnaya nevrzry`vnaya sejsmorazvedka / V.V. Majorov, M.B. Shneerson. – М.: Nedra, 1988. – 237 s. – In Russian.
2. Miller G.F. Partition of energy between elastic waves / G.F. Miller, H. Pursey // Proceedings of the Royal Society. – 1955. – A233.
3. Oparin V.N. Geomexanicheskie i teoreticheskie osnovy` uvelicheniya nefteotdachi plastov v vibrovolnovy`x texnologiyax / V.N. Oparin [i dr.]. – Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie, 2010. – 404 s. – In Russian.
4. Boganik G.N. Sejsmicheskaya razvedka: uchebnik dlya vuzov / G.N. Boganik, I.I. Gurvich. – М.: Nedra, 1980. – 551 s. – In Russian.
5. Chichinin I.S. Vibracionnoe izluchenie sejsmicheskix voln / I.S. Chichinin. – М.: Nauka, 1984. – 223 s. – In Russian.
6. Molokanov G.I. Preobrazovanie mexanicheskoy e`nergii v sejsmicheskuyu pri udare po poverxnosti / G.I. Molokanov // Razvedochnaya geofizika. – М., 1979. – Vy`p.65. – S.3-12. – In Russian.
7. Xarkevich A.A. Izbranny`e trudy`. V 3 t. T.1. Teoriya e`lektroakusticheskix preobrazovatelej. Volnovy`e processy` / A.A. Xarkevich. – М.: Nauka, 1973. – 399 s. – In Russian.
8. Grigolyuk E`.I. Vzaimodejstvie uprugix konstrukcij s zhidkost`yu / E`.I. Grigolyuk, A.G. Gorshkov. – Л.: Sudostroenie, 1976. – 200 s. – In Russian.
9. Amaryan L.S. Svoystva slaby`x gruntov i metody` ix izucheniya / L.S. Amaryan. – М.: Nedra, 1990. – 220 s. – In Russian.
10. Gamburcev G.A. O sostavlenii e`lektromexanicheskix analogij / G.A. Gamburcev // Dokl. akad. Nauk SSSR. – 1935. – # 8-9. – S.303. – In Russian.
11. Pevchev V.P. Ispol`zovanie programmy` Micro-Cap pri modelirovanii processa sraбаты`vaniya impul`sny`x e`lektromexanicheskix ustrojstv / V.P. Pevchev // E`lektrotexnika. – 2010. – #4. – S.55-59. – In Russian.

MODELING OF THE LOAD OF GROUND IMPULSIVE ENERGY SOURCE

V.P. PEVCHEV

(Togliatti State University)

A mathematical model of the load of the ground impulsive energy source is presented. It permits to choose parameters of the basic elements of its construction diagram under the soil effect with surpassing the elastic limit.

Keywords: *seismic wave generator, efficiency, p waves, diagram of vibrations.*