

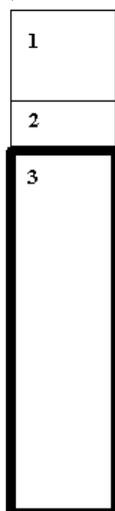
А.П. Малюшевская, П.П. Малюшевский

### РАСЧЕТ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО ГЕНЕРАТОРА УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ ПОГРУЖЕНИЯ СВАЙ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский, 43 А, г. Николаев, 54018, Украина*

Разрядно-импульсные технологии (РИТ) широко применяются в ряде областей геотехнического строительства: буронабивные и буроинъекционные сваи [1], постоянные и временные грунто-вые анкеры, нагельное крепление откосов, цементация стен и фундаментов зданий и сооружений, цементация грунтов, глубинное уплотнение песчаных грунтов [1], то есть они достаточно хорошо освоены в современной строительной индустрии. При реконструкции уникальных зданий, архитектурных и исторических памятников, при стабилизации незатухающих деформаций сооружений РИТ зачастую оказывается единственно возможным способом строительства. Преимущество электроразрядной технологии подтвердил многолетний опыт ее использования в слабых водонасыщенных грунтах и в условиях плотной застройки. Но именно в последнем случае, например при возведении из свай конструкций, подобных "стена в грунте", с минимальной элевацией грунта в процессе ее изготовления; при устройстве грунтовых анкеров (временных и постоянных) длиной до 30 м с несущей способностью до 150 т; при устройстве ограждений котлованов (в том числе с возможностью восприятия ими не только горизонтальных, но и вертикальных нагрузок), возникает необходимость погружения свай методом вдавливания.

**Постановка задачи.** Один из вариантов нагружения сваи для ее вдавливания заключается в том, что она "охватывается" подвижной платформой, балластным грузом. Этот груз (суммарным весом до 300 т) по частям укладывается на платформе в стесненных условиях плотной застройки. Затем с помощью, например, гидравлической оснастки он "навешивается" на сваю, статически вдавливая ее в заданном месте стройплощадки. После постановки сваи платформу хотя бы частично разгружают, перемещают на следующую позицию, и цикл догрузки балласта с последующим "навешиванием" и вдавливанием повторяется для следующей сваи. Очевидно, что здесь вспомогательное время загрузки–разгрузки платформы очень велико. Его можно изменить за счет уменьшения на порядок величины веса балласта и перевода статического режима вдавливания в динамический, используя электроразрядный генератор упругих колебаний (ЭРГУК) [2], работающий с высокой частотой посылок импульсов (до 50 Гц). В таком случае необходимо оценить, достаточно ли мощности ЭРГУК при энергии в импульсе менее 500 Дж, чтобы «раскачать» сваю с пригрузом до 30 т и перевести режим вдавливания в динамический.



*Расчетная схема нагружения стержня (сваи):  
1 – пригруз; 2 – электроразрядный генератор  
упругих колебаний; 3 – свая*

На рисунке представлена расчетная схема вышеназванной системы вдавливания сваи, которая рассматривается как стержень, нагружаемый со стороны свободного конца импульсной нагрузкой, образующейся за счет груза и электрического разряда в ЭРГУК, заполненном жидкостью.

Как известно из теории упругости, деформация в упругом стержне (теле) распространяется двумя характерными скоростями – скоростью распространения объемной деформации  $C_v$  и сдвига  $C_\gamma$ . Волны обоих типов возникают при динамическом воздействии на стержень.

В процессе распространения эти волны многократно отражаются от боковых поверхностей стержня и интерферируют. В результате на некотором расстоянии от источника возмущения формируются новые волны [3].

Рассмотрим случай распространения волн продольных деформаций в стержне конечной длины, расчетная схема которого представлена на рисунке. При рассмотрении продольных колебаний стержня постоянного сечения, пренебрегая поперечными движениями частиц стержня, будем основываться на гипотезе плоских сечений Бернулли. В этом случае положение каждого поперечного сечения в процессе движения характеризуется его продольным смещением  $x$ , а нормальная сила в сечении  $N$  оказывается связанной с продольной деформацией  $\varepsilon = \partial x / \partial z$  законом Гука

$$N = E \cdot F \cdot \frac{\partial x}{\partial z}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $F$  – площадь сечения стержня.

Уравнение движения элемента  $dz$  стержня имеет вид

$$m_0 dz \cdot \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \frac{\partial N}{\partial z} dz$$

или, учитывая уравнение (1), получим

$$\frac{\partial^2 x}{\partial z^2} - \frac{1}{a^2} \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = 0, \quad (2)$$

где  $a = (EF/m_0)^{1/2}$ .

Для однородного стержня  $m_0 = \rho \cdot F$  (здесь  $\rho$  – плотность материала), тогда  $a = (E/\rho)^{1/2}$ .

Общее решение уравнения (2) имеет вид

$$x = f(at - z) + \varphi(at + z). \quad (3)$$

Если стержень конечной длины, то волны отражаются от второго его конца и в общем решении уравнения (3) функции  $f$  и  $\varphi$  будут отличны от нуля. Пусть после соударения ударяющее тело (пригруз) и стержень (свая) представляют одно целое до тех пор, пока усилие их взаимодействия остается сжимающим. Помещая начало координат в точку удара, получаем для закрепленного конца стержня ( $z = L$ , где  $L$  – длина стержня) граничные условия  $x_{z=L} = 0$ . Тогда подставляя в уравнение (3), получаем:

$$f(at - L) + \varphi(at + L) = 0. \quad (4)$$

Если произвести соответствующую замену в выражении (2), то

$$x(z, t) = f(at - z) - f(at + z - 2L). \quad (5)$$

Считая, что пригруз движется вместе с концом стержня ( $z = 0$ ), находим его силу инерции  $m(\partial^2 x / \partial t^2)_{z=0}$ , которая уравновешивается силой на конце стержня  $EF(\partial x / \partial z)_{z=0}$ .

Тогда уравнение движения груза имеет вид

$$\left( -m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + E \cdot F \cdot \frac{\partial x}{\partial z} \right)_{z=0} = 0.$$

Учитывая, что  $E = a^2\rho$ , получаем

$$\left( \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} - \frac{\rho FL}{m} \cdot \frac{a^2}{L} \cdot \frac{\partial x}{\partial z} \right)_{z=0} = 0. \quad (6)$$

Подставив в уравнение (6) значение  $x$  из (5) и заменив отношение массы стержня к массе груза через  $k = \rho FL/m$ , выведем

$$f''(at) - f''(at - 2L) + (k/L)[f'(at) + f'(at - 2L)] = 0,$$

где штрихи означают дифференцирование по аргументу. Отсюда

$$f''(at) + (k/L) \cdot f'(at) = f''(at - 2L) - (k/L) \cdot f'(at - 2L). \quad (7)$$

Последнее уравнение связывает значение  $f(at)$  со значением аргумента меньшего на  $2L$ . Используя выражение (7) и начальные условия, можно последовательно построить  $f(at)$ . До соприкосновения пригруза со сваей  $t < 0$  для всех точек стержня смещение равно нулю, то есть при  $at < 0$ ,  $f(at) = 0$ , поэтому для интервала  $0 < at < 2L$

$$f''(at) + (k/L)f(at) = 0.$$

Интегрируя это выражение, находим, что при  $0 < at < 2L$

$$f'(at) = C \cdot e^{-(k/L) \cdot (at/L)}.$$

Постоянная  $C$  находится из условия, что при  $t = 0$  скорость конца стержня ( $z = 0$ ) равна скорости ударяющего груза  $v_0$ :

$$\left( \frac{\partial x}{\partial t} \right)_{z=0, t=0} = v_0.$$

Подставляя (5), получаем:  $a[f'(0) - f'(-2L)] = v_0$ .

Учитывая, что  $f'(-2L) = 0$ ,  $C = f'(0) = v_0/a$ . Таким образом, при  $0 < at < 2L$

$$f(at) = \frac{v_0}{a} e^{-\frac{k}{L} \cdot \frac{at}{L}}. \quad (8)$$

Зная  $f(at)$  для  $at < 2L$ , можно исследовать изменение усилий и скоростей в любом сечении стержня вплоть до момента, когда до данного сечения не дойдет отраженная от опоры волна деформации, то есть когда  $at < (2L - z)$ . В этом случае  $f(at + z - 2L) = 0$  и уравнение (5) примет вид  $x = f(at - z)$ .

Скорость и деформация в любом сечении:

$$v = \frac{\partial x}{\partial t} = af'(at - z),$$

$$\varepsilon = \frac{\partial x}{\partial z} = -f'(at - z).$$

Подставляя значение  $f$  в уравнение (8), находим, что при  $t < at < (2L - z)$

$$v = v_0 \cdot e^{-\frac{k}{L}(at-z)},$$

$$\varepsilon = \frac{v_0}{a} \cdot e^{-\frac{k}{L}(at-z)}. \quad (9)$$

Если волна деформации еще не дошла до опоры, то скорость и деформация в любом сечении связаны простым соотношением  $v = -\varepsilon \cdot a$ .

Следовательно, деформация сжатия, возникающая в момент удара, не зависит от массы ударяющего груза, а только от скорости удара и связанного с ней давления на стержень.

**Расчет параметров волны сжатия.** Поскольку источником возбуждения колебаний при электровзрывном нагружении сваи является ударная волна в жидкости ЭРГУК, а деформация стержня, как указывалось выше, зависит от давления, необходимо определить амплитуду давления в прошедшей ударной волне.

С учетом ограничений по массе и габаритам реальный генератор импульсных токов может генерировать импульсы тока при следующих параметрах разрядного контура: напряжение  $U_0 = 40-45$  кВ; емкость конденсаторной батареи  $C = 0,4$  мкФ; индуктивность  $L = 3,6$  мкГ; длина разрядного промежутка  $l_p = 4$  мм.

Доля энергии накопителя, выделившаяся в течение первого полупериода тока разряда [4]:

$$\eta = \left( \frac{0,9 \cdot 10^5 \cdot l_p^2}{U_0^2 \cdot \sqrt{L \cdot C}} \right)^{1/3} = 0,1.$$

Максимальная мощность

$$N_{\max} = 1,1 U_0^2 \cdot \left( \frac{C}{L} \right)^{1/2} \cdot \eta^2 (1 - 0,8\eta) = 60 \cdot 10^5 \text{ Вт.}$$

Давление на фронте волны давления

$$p_{\max} = \frac{5,4}{\sqrt{r}} \left[ \frac{N_{\max}^5}{l_p^5 (\eta + 1) \pi \sqrt{L \cdot C}} \right]^{1/8} = 27,1 \text{ МПа.}$$

Здесь  $r = 0,25 \nu$  – расстояние от канала разряда до торца стержня, где можно измерить давление. Амплитуда давления прошедшей волны давления  $p_{\text{пр}}$  связана с давлением на фронте  $p_{\max}$  соотношением  $p_{\text{пр}}/p_{\max} = 0,175$  [4], тогда  $p_{\text{пр}} = 0,175 p_{\max} = 4,71$  МПа.

Однако выбранная по конструктивным соображениям длина разрядного промежутка  $l_p = 4$  мм явно занижена по отношению к требованию для обеспечения согласованного режима разряда в разрядном контуре. Расчеты, приведенные ниже, показывают, что применение расчетных параметров (оптимизированных) повысит долю энергии, выделяющейся в течение первого полупериода тока разряда, а следовательно, и эффективность установки:

$$l_{\text{опт}} = 1,14 U_0 \cdot \sqrt[4]{L \cdot C} \cdot 10^{-3} = 53 \text{ мм.}$$

Коэффициент 1,14, согласно данным экспериментальных исследований [5], применим при удельном сопротивлении рабочей среды (воды) до  $5 \cdot 10^5$  Ом·м. Тогда с учетом учитывая  $l_{\text{опт}}$  доля энергии, выделившейся в течение первого полупериода тока разряда,

$$\eta = \left( \frac{0,9 \cdot 10^5 \cdot l_p^2}{U_0^2 \sqrt{L \cdot C}} \right)^{1/3} = 0,49.$$

Максимальная мощность

$$N_{\max} = 1,1 U_0^2 (C / L)^{1/2} \cdot \eta^2 (1 - 0,8\eta) = 945 \cdot 10^5 \text{ Вт.}$$

Давление на фронте волны давления

$$p_{\max} = \frac{5,4}{\sqrt{r}} \left[ \frac{N_{\max}^5}{l_p^5 (\eta + 1) \cdot \pi \sqrt{L \cdot C}} \right]^{1/8} = 28,9 \text{ МПа.}$$

Тогда амплитуда прошедшей волны давления

$$p_{\text{пр}} = 0,175p_{\text{max}} = 5,05 \text{ МПа.}$$

При таком давлении между стержнем-свайей с площадью сечения  $\sim 1000 \text{ см}^2$  и пригрузом ЭРГУК развивает усилие более 50 тонн на очень короткое время разряда (около 30 мкс), что полностью снимает статическое усилие 30 тонн, а затем в режиме удара обрушивает на оголовок сваи. Это динамическое воздействие повторяется с частотой следования разрядов. С учетом того, что при динамическом воздействии на стержень возникают волны объёмной деформации  $C_v$  и сдвига  $C_\gamma$ , а затем многократно отражаются от боковых поверхностей стержня и интерферируют, боковые поверхности сваи неизбежно вибрируют. Это также переводит статическое трение боковых поверхностей сваи о грунт в динамическое.

Таким образом, существуют вполне умеренные режимы работы электроразрядного генератора упругих колебаний, которые позволяют заменить статическое вдавливание свай в грунт динамическим погружением. При этом вспомогательное время загрузки–разгрузки платформы резко уменьшается, примерно в 10 раз.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Малюшевский П.П., Горовенко Г.Г., Ляпис Д.Н. и др. Электровзрывное кондиционирование бетонов буронабивных скважин // Электронная обработка материалов. 2004. № 4. С. 91–95.
2. Малюшевский П.П., Горелик А.Я., Купный В.И. и др. Разрядно-импульсная технология извлечения топливосодержащих масс из объекта «Укрытие». Часть III (Электроразрядный генератор упругих колебаний. II вариант) // Электронная обработка материалов. 2002. № 4. С. 68–75.
3. Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний. М., 1972.
4. Гулый Г.А., Малюшевский П.П., Кривицкий Е.В. и др. Оборудование и технологические Процессы с использованием электрогидравлического эффекта. М., 1977.
5. Гаманович В.И. Исследование упругих деформаций преграды под действием импульсного высоковольтного разряда в жидкости // Электронная обработка материалов. 1973. № 4. С. 41–43.

*Поступила 27.05.05*

### Summary

The analysis of principle scheme of pillar's electrodischarge plunge in soil (with energy level in electrodischarge pulse less then 500 joule and with additional weight 30 ton) was made. There is an example of electrodischarge equipment for pillar's plunge power and electrical characteristics calculation.