
ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ

В.И. Курец, Э.Н. Таракановский, Г.П. Филатов, А.Ю. Юшков

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОНАБИВНЫХ СВАЙ

*НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете,
пр. Ленина, 2А, г. Томск, 634050, Россия*

Использование свайных фундаментов в строительстве определяется их высокой несущей способностью, технологичностью и экономической эффективностью. Наиболее широко применяются забивные сваи, которые изготавливаются на предприятиях стройиндустрии и погружаются в грунт различными способами. Однако применение забивных свай в ряде случаев нецелесообразно или практически невозможно. К таким случаям относятся сооружение фундаментов на площадках со сложными геотехническими условиями строительства вблизи существующих зданий и сооружений, в которых могут возникнуть недопустимые деформации элементов несущих конструкций, или при различных ремонтных работах в стесненных по высоте помещениях. Особо следует отметить работы по укреплению фундаментов при реконструкции и ремонте зданий и сооружений, где использование забивных свай практически невозможно, например, при реконструкции ветхого жилого фонда, общая доля которого в стране значительна. В указанных случаях используют набивные сваи, которые изготавливают непосредственно на строительной площадке. Все виды таких свай (буронабивные, набивные, инъекционные и др.) имеют основной недостаток, который связан с их качеством. Учитывая постоянный рост объема использования набивных свай в строительстве, разработка методов улучшения их качества является актуальной проблемой. Одним из наиболее перспективных методов улучшения качества набивных свай является электрогидравлический [1], который позволяет формировать геометрию сваи (уширение ее в основании и по длине, уплотнение грунта под пятой сваи и по боковой поверхности) и соответственно значительно увеличивать ее несущую способность. Сваи, изготовленные таким способом, получили название электронабивных и обладают повышенной несущей способностью, высокой технологичностью процесса и лучшими экономическими показателями расхода бетона по сравнению со сваями, изготавливаемыми традиционными способами.

Основной проблемой электрогидравлического способа создания набивных свай является формирование сквозного локального канала импульсного электрического разряда в бетонном растворе с относительно высокой удельной электропроводностью ($\sigma \sim 10^{-3} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$). В настоящее время практически все установки для создания электронабивных свай обеспечивают «тепловую» форму пробоя рабочего промежутка, характеризуемую образованием парогазового пузыря или цепочки пузырей в межэлектродном промежутке, перекрывающих по мере их роста основную или всю часть промежутка. Впоследствии происходит электрический пробой парогазовой системы с образованием локального канала разряда. При этом большая часть энергии импульса затрачивается на образование парогазового чехла. Кроме того, наличие газовой фазы в растворе приводит к значительной диссипации энергии ударной волны и импульсов давления от парогазовой полости, в которую вырождается канал разряда после окончания в нем электрических процессов. Для компенсации потерь, связанных с образованием парогазовой системы, энергию приложенного импульса увеличивают до 100 кДж. Вместе с тем высокий уровень энергии в импульсе приводит к соответствующему увеличению массогабаритных характеристик источника импульсов, а также к резкому сокращению срока службы электродных систем. Особенно это относится к изолятору по-

тенциального электрода, находящемуся в условиях совместного воздействия высокого напряжения и мощных ударных нагрузок. Недостатки способа производства электронабивных свай могут быть устранены при переходе от «теплого» способа формирования локального канала разряда к «электротепловому». Это позволяет существенно уменьшить непроизводительные потери энергии при изготовлении свай и соответственно на порядок снизить запасаемую энергию в источнике импульсов.

Ключевым моментом для организации «электротеплого» пробоя разрядного промежутка является выбор требуемых параметров генератора импульсов и размеров рабочего промежутка, которые обеспечивали бы уменьшение потерь в предпробивной стадии развития разряда при сохранении необходимых ударных нагрузок в бетонном растворе и в окружающем грунте. Основными параметрами, определяющими процессы в электрогидравлической технологии, являются: амплитуда импульса напряжения U_0 , энергия запасаемая в генераторе W_0 , индуктивность L и разрядная емкость C рабочего контура, а также длина рабочего промежутка между потенциальным и заземленным электродами l_0 . Амплитуда высоковольтного импульса U_0 определяется условием обеспечения «электротеплого» характера пробоя рабочего промежутка, а ее максимально допустимая величина ограничена надежностью работы изоляции вблизи разрядного промежутка. Известно [2], что минимальный уровень напряжения, обеспечивающий «электротепловой» характер пробоя жидкостей при известных характерных размерах диаметра свай, составляет 30 кВ. Таким образом, рекомендуемый уровень амплитуды высоковольтного импульса следует выбирать равным этому значению.

Наиболее эффективной конфигурацией электродной системы является стержень – плоскость. Расчет оптимальной длины рабочего промежутка такой электродной системы при известной амплитуде напряжения можно осуществить с использованием выражения [3]:

$$l_0 = 0,04 \cdot \frac{U_0}{\sqrt{A}} \cdot \sqrt[4]{LC}, \text{ [м]}, \quad (1)$$

где U_0 – амплитуда напряжения [В], $A = 2,5 \cdot 10^4$ [В²·с/м] – искровая постоянная [2], L [Гн], C [Ф] – индуктивность и емкость разрядного контура. При $U_0 = 30$ кВ, $L = 15$ мкГн, $C = 10$ мкФ оптимальное значение l_0 составляет ~ 30 мм. Указанная длина рабочего промежутка является оптимальной, поскольку обеспечивает как необходимую напряженность поля у потенциального электрода, при которой реализуется «электротепловой» характер пробоя бетонного раствора, так и деление энергии импульса между энергией ударной волны и парогазовой полости (ПГП) в пропорции 1:1. Здесь следует отметить, что хотя соотношение вкладов ударных волн и давления при расширении ПГП в процессе увеличения диаметра скважины однозначно не определено [4, 5], авторы придерживаются модели, в которой роль этих двух процессов одинаково важна. По нашим представлениям, ударная волна создает в окружающем скважину грунте напряженное состояние, приводящее к разрушению его структуры, а давление от ПГП обеспечивает заполнение бетоном ослабленную зону.

Для выбора оптимальной энергии единичного импульса необходимо установить связь между параметрами импульса и давлением в канале разряда P_m , которое определяет все динамические характеристики в рассматриваемой системе. Величину P_m можно приблизительно определить согласно выражению [3]:

$$P_m = \frac{2}{\tau} \cdot \sqrt{\frac{\rho(\gamma - 1)}{\pi l_0}} \cdot (W_0 - W_n) \cdot \eta, \quad (2)$$

где ρ – плотность бетонного раствора; γ – показатель адиабаты (для бетона $\gamma \geq 1,26$); $\tau \sim 2\pi \sqrt{LC}$ – длительность периода колебаний разрядного тока в контуре, W_n – потери энергии на стадии формирования локального канала разряда, η – КПД разрядной цепи. Величина емкости C определяется необходимой энергией импульса, а индуктивность L – конструкцией генератора, индуктивностью конденсаторов и длиной передающего импульс тракта. В условиях создания электронабивных свай длиной до 10 м возможно добиться значения $L \approx (10 - 15)$ мкГн.

По величине давления в канале разряда P_m при известных акустических характеристиках бетонного раствора и грунта и известном расстоянии от канала разряда R_i можно определить временную зависимость давления на фронте ударной волны $P_\phi(t)$ в этой точке [6]:

$$P_\phi(t) \approx 0,06 P_m \cdot \left(\frac{l_0}{R_i}\right)^2 \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right) \cdot \sigma \cdot [T - t], \quad (3)$$

где $t = R_i / a_0$ – текущее время, a_0 – скорость звука в бетонном растворе (приблизительно 1500 м/с), θ – характерное время уменьшения функции $P_\phi(t)$ в e – раз, $\sigma [T - t]$ – разрывная функция, определяющая бросок давления при подходе фронта ударной волны к точке R_i . На границе раздела сред бетонный раствор–грунт ударная волна разделяется на две составляющие: отраженную и преломленную. Амплитуду давления в преломленной волне можно оценить как [6]:

$$P_{\phi_2} \sim P_{\phi_1} \cdot \frac{2\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}, \quad (4)$$

где λ_1 – акустическая жесткость бетонного раствора; λ_2 – акустическая жесткость грунта.

Динамика ПГП и поле давлений в окружающей среде применительно к несжимаемым средам достаточно хорошо изучены [7]. Распределение давления P_{Ri} в зависимости от расстояния определяется выражением:

$$P_{Ri} = \frac{r}{R_i} \cdot \left[P_m \cdot \left(\frac{r_0}{r} \right)^{3\gamma} + \frac{1}{2} \cdot P_m \right] - P_0 - P_{cm.б}, \quad (5)$$

где P_0 – атмосферное давление, $P_{cm.б}$ – гидростатическое давление столба бетонного раствора, r – средний радиус ПГП на стадии расширения, P_m – максимальное начальное давление в ПГП, R_i – текущий радиус, r_0 – радиус канала разряда перед его расширением за счет испарений стенки канала разряда. Принимая $r = 0,1$ мм, а $r/r_0 \approx 0,2 - 0,25$, выражение (5) можно представить в виде

$$P_{Ri} = \frac{0,2}{2R_i} \cdot P_m - P_0 - P_{im.д}. \quad (6)$$

Система уравнений (2)–(4), (6) позволяет рассчитать величины давлений как функции параметров контура, энергии импульса и текущего расстояния. Для оценки увеличения диаметра скважины можно воспользоваться выражением для модуля сжимаемости грунта E , которое используется при испытании грунтов методом штампа [8]:

$$E = (1 - \mu^2) \cdot \omega \cdot d \cdot \frac{\Delta P}{\Delta h}, \quad (7)$$

где μ – коэффициент Пуассона ($\mu \sim 0,3$); ω – безразмерный коэффициент, принимаемый 0,8; d – диаметр штампа, см; ΔP – приращение давления на прямолинейном участке зависимости осадки грунта от нагрузки, Па; Δh – глубина осадки грунта, см. В рассматриваемом случае поверхность «штампа» представляет собой цилиндр с высотой, равной длине канала разряда l_0 , и радиусом, определяемым как расстояние от канала разряда до границы «бетон – грунт» R_i , который дискретно изменяется после подачи импульса по мере расширения ствола скважины за счет приложенных ударных нагрузок. При таком подходе поверхность «штампа» после приложения к разрядному промежутку i -го импульса составит $S_i = 2\pi \cdot R_i \cdot l_0$, а после $(i + 1)$ импульса – $S_{i+1} = 2\pi \cdot (R_i + \Delta R_i) \cdot l_0$, где ΔR_i – увеличение текущего радиуса скважины под действием давления от ПГП, которое можно определить из выражения (6), считая, что $(rP_m/2R_i) \gg P_0^*$, где r – радиус канала разряда. В этом случае выражение (7) можно представить в виде

$$E = \frac{0,5 \cdot (1 - \mu^2) \cdot \omega \cdot 2\pi \cdot R_i \cdot l \cdot r \cdot P_m}{2\pi \cdot l \cdot R_i \cdot \Delta R_i} = \frac{(1 - \mu^2) \cdot \omega \cdot P_m \cdot r}{\Delta R_i}. \quad (8)$$

С учетом всех численных коэффициентов увеличение радиуса скважины от i -го импульса можно оценить как

$$\Delta R_i = \frac{0,7 \cdot P_m \cdot r}{E^* \cdot N_i}, \quad (9)$$

где N_i – порядковый номер приложенного импульса.

Общее изменение радиуса скважины при приложении N_i импульсов может быть рассчитано как сумма последовательных изменений от каждого импульса:

$$\sum_1^n \Delta R_i = \sum_1^n \frac{0,7 \cdot P_m \cdot r}{E^* \cdot N_i}. \quad (10)$$

Использование выражения (10) при известном давлении в канале разряда возможно при определении модуля сжимаемости грунта E^* , то есть с учетом предварительного разрушения скелета грунта за счет ударной волны. Следует отметить, что вопрос выбора модуля сжимаемости требует отдельного рассмотрения, так как глубина и предварительное разупрочнение скелета грунта ударной волной изменяют его значение. Для песков с влажностью (7–10)% можно принять $E^* \approx 1,5 \cdot 10^7$ Па [8]. Таким образом, задав требуемое изменение радиуса скважины, свойства грунта и используя практически не изменяемые параметры разрядного контура (U_0, L, l_0), можно определить величину P_m , а затем по выражению (2) определить необходимую энергию импульса.

Расчеты для песчаного неводонасыщенного грунта показали, что возможно изменение радиуса скважины диаметром 10 см в два раза на глубине (6–7) м при подаче 6 импульсов с энергией 4,5–5,0 кДж. Расчетные значения увеличения ΔR_i при указанных выше параметрах представлены в табл. 1.

Таблица 1.

N_i	1	2	3	4	5	6
$\Delta R_i, \text{ см}$	1,86	0,93	0,62	0,46	0,37	0,31

Для проверки корректности предложенной выше методики расчета были проведены эксперименты по созданию электронабивных свай на специальном стенде, который был оборудован датчиками давления для имитации глубины погружения сваи и маркерами, позволяющими оценивать изменение диаметра скважины. Генератором импульсов являлся генератор импульсных токов с выходным напряжением импульса 30 кВ и энергией в импульсе 4,5 кДж. В качестве грунта использовался песок влажностью 9%, который утрамбовывался послойно, а сверху прикладывалось давление, имитирующее глубину скважины 7 м. Бетонную смесь изготавливали из цемента, воды, песка и гелеобразующей добавки для связывания воды. В качестве вяжущего использовали цемент Топкинского завода (Россия) марки М400. Водоцементное соотношение составляло 0,7, количество добавки для связывания воды – 0,02% от объема бетонного раствора, соотношения цемент–песок достигало 1/3.

Эксперименты проводились в следующей последовательности: в подготовленный грунт с отверстием, имитирующим скважину, заливалась бетонная смесь и опускался рабочий снаряд, на который подавался импульс, затем по положению маркеров определялось изменение формы бетонного столба, добавлялся бетонный раствор и процесс повторялся. Результаты эксперимента и расчета по изменению формы бетонного столба от числа поданных импульсов представлены на рис. 1. После обработки полученная свая затвердевала в течение семи суток, затем извлекалась из грунта. Фотографии контрольного образца сваи и сваи, полученной после обработки электрическими разрядами, представлены на рис. 2.

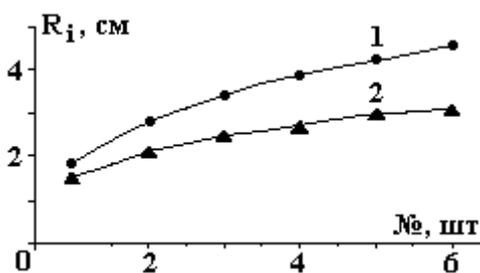


Рис. 1. Зависимость приращения радиуса сваи от числа импульсов.
1 – расчетные, 2 – экспериментальные данные

Как следует из представленных результатов, электронабивная свая в зоне обработки увеличилась в диаметре приблизительно в два раза по сравнению с контрольной, что должно несомненно привести к увеличению ее несущей способности. Следует отметить удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений изменения радиуса скважины при ее обработке электрическими разрядами, что является подтверждением корректности использования предложенной методики проведения расчета параметров генератора импульсов для оценок изменения диаметра электронабивных свай в процессе их изготовления.

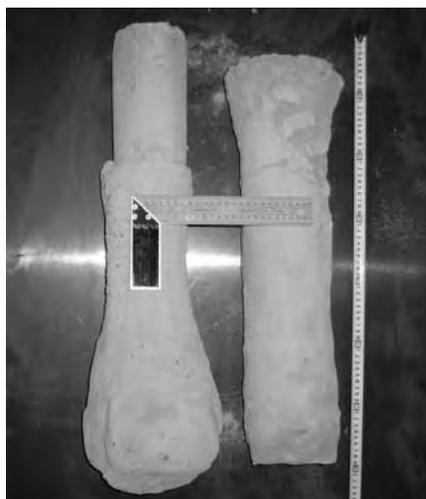


Рис. 2. Набивные сваи (слева – электронабивная, справа – контрольная)

В качестве заключения можно отметить следующее.

Предложены методика расчета параметров импульса и результаты воздействия ударных нагрузок на грунт и бетонный раствор при электрогидравлическом способе изготовления свай. Результаты расчетов удовлетворительно совпадают с данными, полученными экспериментально. Методика расчета может быть применена для оценок воздействия в других электрогидравлических процессах с использованием разрядов в несжимаемых жидких средах.

В результате оптимизации параметров электрогидравлической установки возможно существенное уменьшение энергии в приложенном к разрядному промежутку импульсе по сравнению с энергией в импульсе в используемых установках для создания электронабивных свай при сохранении тех же несущих характеристиках свай.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балохин Б.В., Джантимиров Х.А. Новые электроразрядные технологии в геотехническом строительстве // ОФМГ. 1998. № 4, 5. С. 47–52.
2. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. Киев, 1986.
3. Круглицкий Н.Н., Горovenko Г.Г., Малюшевский П.П. Физико-химическая механика дисперсных систем в сильных импульсных полях. Киев, 1983.
4. Семушкина А.А. Экспериментальное обоснование основных параметров технологического процесса импульсного уплотнения водонасыщенных грунтов при строительстве: Дис. канд. техн. наук: М., 1968.
5. Хлюпина Л.П. Физические процессы в песчаных водонасыщенных грунтах при высоковольтных разрядах: Дис. канд. техн. наук: М., 1967.
6. Яковлев Ю.С. Гидродинамика взрыва. Л., 1961.
7. Наугольных К.А., Рой М.А. Электрический разряд в воде. М., 1971.
8. Метелюк Н.С., Шишко А.Б., Соловьева А.Б., Грузинцев В.В. Сваи и свайные фундаменты. Киев, 1977.

Поступила 07.05.04

Summary

The paper presents the procedure of pulse parameters estimation according to given ground characteristic and data of the increase of a pile diameter as an effect of electrical discharge action. It was shown the considerable decrease of the required pulse energy in comparison with installations used nowadays for producing piles by electro-discharge stuffing.