

УДК 624.15

ПРОИЗВОДСТВО НАБИВНЫХ СВАЙ И АНКЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДОВ

В.И. Курец, А.Ю. Юшков

НИИ высоких напряжений Томского политехнического университета,

E-mail: kuretz@hvd.tpu.ru

Изложена методика расчета параметров импульса и результатов воздействия ударных нагрузок на грунт и бетонный раствор при электрогидравлическом способе изготовления свай. Результаты расчетов удовлетворительно совпадают с данными, полученными экспериментально.

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 не целесообразно 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 и др. Особенно надо 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 способ [1], который позволяет формировать геометрию свай (уширение ее в основании и по длине, уплотнение грунта под пятой свай и по боковой поверхности) и, соответственно, значительно увеличивать ее несущую способность. Сваи, изготовленные таким способом, получили название электронабивных свай.

Основной проблемой электрогидравлического способа создания набивных свай является формирование сквозного локального канала 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 с образованием парогазового чехла в межэлектродном промежутке. Далее происходит электрический пробой парогазовой си-

стемы 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 электрических процессов в нем. Для компенсации потерь, связанных с образованием парогазовой системы, энергию приложенного импульса увеличивают до уровня $\sim 100 \text{ кДж}$. Высокий уровень энергии в импульсе приводит к соответствующему увеличению массогабаритных характеристик источника импульсов, а также к резкому сокращению срока службы электродных систем. В особенности это относится к изолятору потенциального электрода, находящемуся в условиях совместного воздействия высокого напряжения и мощных ударных нагрузок. Указанные 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 в источнике импульсов энергию.

Ключевым моментом для организации «электротеплового» 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, является: 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 «электротеплового» характера пробоя рабочего промежутка, а ее максимально допустимая величина ограничена надежностью работы изоляции вблизи разрядного промежутка. Известно [2], что минимальный уровень напряжения, обеспечивающий «электротепловую» характер пробоя жидкостей при известных характерных размерах диаметра свай, составляет $\sim 30 \text{ кВ}$. Та-

ким образом, рекомендуемый уровень амплитуды высоковольтного импульса следует выбирать равным этому значению амплитуды импульса.

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]:

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

где U_o – 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 $U_o=30$ кВ, $L=15$ мкГн, $C=10$ мкФ оптимальное значение l_o составляет величину приблизительно равную 30 мм. Указанное значение длины рабочего промежутка является оптимальным, 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 энергией парогазовой полости (ПГП) в пропорции 1:1. Здесь следует отметить, что несмотря на то, что в настоящее время, соотношение вкладов ударных волн и давления при расширении ПГП в процесс увеличения диаметра скважины, однозначно не определены [4, 5], мы придерживаемся модели, в которой роль этих двух процессов одинаково важны. По нашим представлениям, ударная волна создает в окружающем скважину грунте напряженное состояние, приводящее к разрушению его структуры, а давление от ПГП обеспечивает заполнение бетоном ослабленной зоны.

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]:

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

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 $L \approx 10 \dots 15$ мкГн.

По величине максимального давления в канале разряда P_m и известном расстоянии от канала разряда R_i до конкретной точки можно определить амплитуду давления на фронте ударной волны $P_\phi(t)$ в этой точке [6]:

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

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 жидкой среде достаточно хорошо изучена [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 $r/r_0 \approx 0,2 \dots 0,25$, выражение (5) можно представить в виде:

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

Система уравнений (2–4, 6) позволяет рассчитать величины давлений на стенках скважины 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_o , 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 ППП, 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:

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

Тогда, 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^*), т.е. с учетом предварительного разрушения скелета грунта за счет ударной волны. Следует отметить, что вопрос выбора модуля сжимаемости требует отдельного рассмотрения, т.к. 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), возможно определить величину P_m , а затем по выражению (2), определить необходимую энергию импульса.

Расчеты для песчаного не водонасыщенного грунта показали, что возможно изменение радиуса скважины диаметром 10 см на глубине 6...7 м в два раза при подаче 6 импульсов с энергией 4,5...5 кДж. Расчетные значения увеличения ΔR_i при указанных выше параметрах представлены в таблице.

Таблица. Расчетные значения изменения ΔR_i от числа импульсов

N_i	1	2	3	4	5	6
ΔR_i , 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. Стенд был оборудован датчиками давле-

ния для имитации глубины погружения свай 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 с влажностью 9 %, который утрамбовывался послойно, а сверху прикладывалось давление, имитирующее глубину скважины в 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 0,6...0,7, количество добавки для связывания воды составляло 0,02 % от объема бетонного раствора, соотношения цемент песок составляло 1/3.

Экспериментальные проводились в следующей последовательности: в подготовленный грунт с отверстием, имитирующем 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. После обработки, полученная свая затвердевала в течении семи суток, затем извлекалась из грунта.

Как следует из представленных результатов, электронабивная свая в зоне обработки увеличилась в диаметре приблизительно в 2 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 в настоящей статье методики проведения расчета параметров генератора импульсов для оценок изменения диаметра электронабивных свай в процессе их изготовления.

В качестве заключения к настоящей статье можно сделать следующие выводы:

1. Предложена методика расчета параметров импульса и результатов 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.
2. В результате оптимизации параметров электрогидравлической установки возможно существенное уменьшение энергии импульса по сравнению со значением энергии в импульсе, в используемых в настоящее время установках для создания электронабивных свай, при сохранении тех же несущих характеристиках свай.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балехин Б.В., Джантимиров Х.А. Новые электроразрядные технологии в геотехническом строительстве // Основания, фундаменты и механика грунта. – 1998. – № 4, 5. – С. 47–52.
2. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. – Киев: Наукова думка, 1986. – 206 с.
3. Круглицкий Н.Н., Горовенко Г.Г., Малюшевский П.П. Физико-химическая механика дисперсных систем в сильных импульсных полях. – Киев: Наукова думка, 1983. – 192 с.
4. Семушкина А.А. Экспериментальное обоснование основных параметров технологического процесса импульсного уплотнения водонасыщенных грунтов при строительстве. Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1968. – 151 с.
5. Хлюпина Л.П. Физические процессы в песчаных водонасыщенных грунтах при высоковольтных разрядах. Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1967. – 163 с.
6. Яковлев Ю.С. Гидродинамика взрыва. – Л.: Госсудиздат, 1961. – 313 с.
7. Наугольных К.А., Рой М.А. Электрический разряд в воде. – М.: Наука, 1971. – 155 с.
8. Метелюк Н.С., Шишко А.Б., Соловьева А.Б., Грузинцев В.В. Сваи и свайные фундаменты. – Киев: Будевельник, 1977. – 256 с.

УДК 537.52

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД ПО ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ДИЭЛЕКТРИКА. 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛЬНОТОЧНОГО КОММУТАТОРА

А.Н. Григорьев^{1,2}, А.В. Павленко², А.П. Ильин¹, Е.И. Карнаухов²¹НИИ высоких напряжений Томского политехнического университета

E-mail: alex_nick@mail.ru

²РФЯЦ – Всероссийский НИИ технической физики им. акад. Е.И. Забабахина, г. Снежинск

Экспериментально исследовались влияние зарядного напряжения и индуктивности нагрузки на характеристики коммутатора, работающего на принципе пробоя по поверхности диэлектрика. Измерены импеданс, активное сопротивление и индуктивность при различных режимах работы коммутатора. Обнаружено, что для времени 5...18 мкс имеет место квазистационарная стадия разряда, когда индуктивность и активное сопротивление коммутатора постоянны.

Введение

При разработке современных электрофизических установок возникает необходимость проведения их предварительного исследования, учитывающего физические процессы, которые протекают в накопителе энергии, коммутаторе и нагрузке. Для этого нужны детальные сведения о количественных характеристиках этих процессов. Такие исследования становятся особенно актуальными в настоящее время, когда параметры установок приближаются к предельным, и требования к качественным и количественным характеристикам электрофизических установок резко возрастают. Коммутатор является ключевым элементом, в том плане, что обеспечивает возникновение и существование самого процесса ввода энергии в нагрузку.

Повышение скорости ввода энергии в нагрузку вынуждает предпринимать попытки сведения к минимуму индуктивности и активного сопротивления всего разрядного контура. При этом вклад индуктивности коммутирующего разрядника в индуктивность контура может достигать 40 %, а энерговыделение в коммутаторе к моменту времени $t \approx T/4$ (первому максимуму тока) – величины порядка 30 % от общего запаса конденсаторной батареи [1]. Таким образом, коммутатор, с одной стороны, уменьшает амплитуду тока в нагрузке, а, с другой, снижает КПД передачи энергии из емкостного накопителя в нагрузку. Первая и вторая проблемы тесно связаны между собой.

Любой коммутатор (разрядник) обладает характерным для него временем коммутации – зависимостью напряжения на коммутаторе $U_k(t)$ или сопротивления коммутатора $R_k(t)$ от времени [2]. Эту зависимость принято называть характеристикой коммутации. Как было показано [2], эта характеристика определяется как типом самого коммутатора, так и протекающим через коммутатор током $I(t)$, т.е. $U_k(t)$ зависит от зарядного напряжения накопителя U_0 и импеданса Z_n нагрузки.

Низкоиндуктивные многоискровые разрядники, работающие на принципе пробоя по поверхности диэлектрика [3, 4], часто используются при построении сильноточных генераторов тока. В процессе включения их сопротивление заметно изменяется, проходя область интенсивного поглощения энергии из контура.

На практике наиболее простыми способами регулирования скорости ввода энергии является изменение индуктивности контура и изменение зарядного напряжения конденсаторной батареи. При этом изменяются характеристики коммутатора, и наиболее надежные данные по энерговоду в нагрузку можно получить только из осциллограмм тока и напряжения на нагрузке. Поэтому, необходимо знать, каким образом изменяются характеристики коммутатора с изменением запасенной в накопителе энергии и импеданса нагрузки.

Перечисленные ранее [5] особенности развития и существования поверхностного разряда позволя-