

## ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УСТРОЙСТВА СВАЙ В СЛАБЫХ ГРУНТАХ

© **Абрамова Т.Т.**

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

*Для обеспечения безопасности при строительстве различных объектов в условиях тесной городской застройки в последнее время в России все чаще используют электроразрядную технологию. Устройство свай по такой технологии заключается в том, что в скважине, заполненной жидкой бетонной смесью, производят электрические взрывы с определенной частотой. В связи с этим в работе представлены данные геофизических исследований параметров сейсмических колебаний, возникающих при импульсных воздействиях электрического разряда на грунты в скважине.*

**Ключевые слова:** электрический взрыв; пески; глины; грунтоцемент; уплотнение; сваи.

Целенаправленное управление реакцией слабых грунтов на динамические воздействия требует привлечения инновационных технологий для улучшения их свойств. Одной из таких технологий является электроразрядная. Эта технология основана на применении мощных электрических разрядов в грунтах, как средства возбуждения ударных волн и импульсов высокого давления.

Впервые электрический разряд в жидкости был осуществлен почти 250 лет назад. В 1766 году американский естествоиспытатель Т. Лейн описал проведенные им опыты с электрическими разрядами в воде и других жидкостях. Открытие опередило свое время и оказалось невостребованным. В 1950 г. Л.А. Юткин предложил использовать гидродинамические импульсы, возникающие при электрическом разряде в жидкости, в технологических процессах. Так был изобретен «Способ получения высоких и сверхвысоких давлений». Электрический разряд в жидкости есть не что иное, как электрический взрыв. Образующееся при электрическом взрыве высокое давление через жидкость передается в окружающую среду.

Применение электроразрядной технологии в геотехнике началось с 1960 г. (приоритет МИСИ им. В.В. Куйбышева № 30166 от 5.06.62 г.), под руководством профессоров Г.М. Ломизе и Л.М. Гуткина, разработавших электроискровой метод уплотнения водонасыщенных песчаных грунтов. Начиная с 1975 г. электровзрывы используют для изготовления свай.

В 1978–1981 гг. в Ленинграде В.М. Улицким, Г.Н. Ясневичем и др. были разработаны основы технологии изготовления набивных свай с использованием электрогидравлического эффекта. Однако технические и технологические причины в течение 20–25 лет сдерживали применение этой технологии в строительстве.

Сущность электроразрядной технологии заключается в том, что в скважине, заполненной жидкой бетонной смесью, производят электрические взрывы с определенной частотой посылок. Каждый электрический взрыв (ЭВ) в бетонной смеси порождает волны давления и послевзрывную расширяющуюся полость, воздействующие на стенки скважины. Грунт в зоне такого воздействия уплотняется, а скважина расширяется, причем каждое локальное расширение сразу же заполняется бетонной смесью.

Созданные сваи обладают особенностями в силу специфики их обустройства. При их изготовлении происходит уплотнение грунта, прилегающего к скважине, в которой они формируются, поэтому такие сваи обладают преимуществами по сравнению с буронабивной или буроинъекционной, изготовленными по традиционным технологиям.

Электрический разряд в цементном растворе, заполняющем скважину, создает

интенсивные волны давления и гидродинамические потоки. Разряд осуществляется последовательно на нескольких уровнях. При этом образуются квазисферические области в местах «прострелки» и производится интенсивная акустическая обработка жидкого бетона. Несущая способность свай увеличивается в 2–3 раза, кроме того, улучшаются прочностные свойства бетона на основе низкосортных цементов до прочности бетона на самых высокосортных цементах.

Электроразрядная технология обладает огромными перспективами, так как простыми техническими средствами может изменять энергию разряда в десятки раз. Кроме этого, небольшие размеры рабочего инструмента, простота транспортировки его по стволу скважины, относительная независимость размещения первичного источника энергии от местоположения скважины, возможность работы в скважинах диаметром 50–350 мм и глубиной более 100 м обеспечивают высокую технологичность процесса.

Из-за относительной новизны метода нормативные документы, регламентирующие применение разрядно-импульсных технологий с точки зрения их сейсмической опасности для зданий и инженерных сооружений, отсутствуют. Поэтому для разработки специальных норм и правил необходимы данные о параметрах сейсмических колебаний, возникающих при импульсных воздействиях электрического разряда на грунты в скважине. В связи с этим большим количеством ученых (В.В. Калинин, М.Л. Владов, С.Ф. Аптикаев, В.М. Бухов, В.А. Ногин, А.В. Калинин, А.А. Мусатов, Б.Л. Пивоваров, В.А. Стручков, Н.В. Шалаева) была проведена оценка характеристик сейсмических колебаний [4, 8].

В работе [4] дана схема расположения скважин с разрядными электродами и измерительными приборами. На первом этапе при наблюдениях сейсмоприемники располагались в трех взаимно-перпендикулярных направлениях, что позволяло регистрировать как продольные, так и поперечные волны. Регистрация сигналов велась в полосе частот 20–750 Гц. На втором этапе исследований полевые данные получены в процессе производства буроинъекционных свай на 17 строительных площадках в пределах застроенной городской территории. Регистрировались колебания на поверхности грунта и на фундаментах сооружений. Использовались сейсмоприемники СВ-5, СПМ-16, а также генерирующие сигналы, пропорциональные скорости смещения частиц. Частотный диапазон регистрирующей аппаратуры 5–250 Гц.

Геологические условия строительных площадок, на которых в процессе разрядно-импульсной обработки скважин регистрировались сейсмические колебания, были весьма сложны и неоднородны. В верхней части разреза (первые метры) – грунты насыпные: смесь суглинков, песков, глин, часто с обломками кирпича, камня, металла, корнями деревьев и т.п. Ниже, до глубин 10–15 м – чередование влажных или водонасыщенных песчано-глинистых отложений, нередко с примесью гравия.

Также в этой работе показаны образцы сейсмограмм, зарегистрированных на поверхности грунта на разных эпицентральных расстояниях ( $R_e$ ) от источника и при разной глубине источника (H) в скважине. Кроме этого авторы статьи [4] показывают латеральное изменение в отдельном пункте наблюдения при погружении источника в скважину.

На малых расстояниях от источника (4–5 м) колебания на поверхности грунта представляются 1–1,5 циклами, соответствующими продольной волне. Преобладающая частота (f) колебаний при энергиях  $W = 10–40$  кДж в большинстве случаев находится в пределах 40–80 Гц, длительность (d) здесь составляет 15–20 мс. С удалением от устья скважины спектр преобладающих колебаний становится более низкочастотным.

Исследования авторов представленной работы [4] (60 измерений) показали, что на дневной поверхности в сейсмическом поле при электроразрядах с энергиями  $W = 10–40$  кДж на расстояниях  $R_e = 2–25$  м от источника преобладает вертикальная компонента. Отношение мгновенных значений вертикальной компоненты и модуля вектора скорости находится в пределах 0,80–0,99.

На фиксированном гипоцентральной расстоянии  $R = 4$  м при потенциальной энергии источника  $W = 40$  кДж:

- максимальная амплитуда вертикальной компоненты скорости колебаний в среднем составляет  $u_z = 1,7 \pm 1$  см/с; преобладающая частота  $f = 51 \pm 13$  Гц; длительность колебаний  $d \sim 0,025$  с;
- показатель степени затухания максимальной амплитуды скорости колебаний с расстоянием (в диапазоне  $R_c = 2-25$  м) в соотношении  $u_z \sim R^n$  в среднем  $n = -2,29 \pm 0,85$  для преобладающей частоты ( $f \sim R^q$ ):  $q = -0,48 \pm 0,21$ .

Особенность сейсмических эффектов при электроразрядах связана с технологическими факторами обработки бетонной массы для создания свай. Количество разрядов на некоторых горизонтах может достигать нескольких десятков, пока не образуется камуфлетная выработка диаметром, в 1,5–2 раза превышающим диаметр пробуренной скважины. Поэтому В.А. Робман [5] отметил, что перестройка структуры грунта при повторяющихся воздействиях может и увеличить, и ослабить КПД преобразователя электрической энергии в акустическую.

Натурные эксперименты подобного рода были проведены С.Ф. Аптикаевым и А.П. Резниченко для  $W = 10-40$  кДж ( $U = 10$  кВ) [1]. Воздействие на глубине  $H = 4$  м осуществлялось на пылеватых, мягкопластичных, водонасыщенных суглинках при потенциальной энергии разряда  $W = 10$  кДж. Колебания регистрировались на эпицентральной дистанции  $R_c = 3,5$  м. При  $N = 45-50$  амплитуда в данных условиях удваивается. Период и длительность возрастали значительно медленнее, что позволило на практике не учитывать их изменения. Неучет вероятного повышения амплитуды колебаний с ростом  $N$  может привести к занижению прогнозной опасности.

К оценкам сейсмической опасности разрядно-импульсной технологии относится и вопрос о коэффициенте ослабления (усиления) амплитуды скорости колебаний при передаче энергии волн, распространяющихся в грунтах к фундаментам сооружений. Калинин В.В. и др. [4] проведены серии синхронных измерений параметров колебаний в грунтовых основаниях и на фундаментах зданий. Во всех случаях наблюдалось уменьшение амплитуды на фундаменте по отношению к амплитуде в грунте с коэффициентом  $n_\phi = 0,57-0,84$ .

Оценка сейсмической опасности электроразрядной технологии затрудняется тем, что в настоящее время фактически нет документированных свидетельств прямой причинно-следственной связи повреждений зданий и сооружений с сейсмикой электроразрядных воздействий. Отсутствие сейсмических норм, специальных для технологии, а также натуральных исследований связи реализованной опасности с характеристиками колебаний вынуждают искать на современном этапе паллиативные способы регламентирования сейсмичности промышленного электроразрядного источника. Один из таких способов – использование норм, составленных для сейсмических источников иного типа, применяемых в горном деле и строительстве. Наиболее близким (из имеющих действующие нормы и правила использования) к электроразрядному источнику представляется камуфлетный взрыв ВВ. Определенным основанием для такого суждения служит, в частности, то, что характеристики полученных авторами [4] эмпирических связей сейсмических параметров с расстоянием и энергией электроразрядного источника близки к аналогичным, оцененным в результате экспериментов с ВВ.

Одним из шагов адаптации взрывных норм к электроразряду является переход к двухпараметрической инструментальной шкале, принятой в ряде стран и учитывающей при оценке допустимости колебаний не только амплитуду их скорости, но и частоту [3]. С повышением частоты колебаний на фундаментах и перекрытиях вдвое, допустимое значение скорости колебаний также увеличивается в 1,5–2 раза. В России взрывники пользуются однопараметрическими шкалами, включенными в рекомендации по оценке допустимости сейсмозрывных воздействий, и основанными на максимальной амплитуде скорости колебаний [6]. Частота колебаний (впрочем, как и их длительность) здесь учитывается в среднем, но, как правило, ограничена верхним пределом около 30 Гц. Учесть фактор частоты для более высокочастотных колебаний можно введением коэффициента  $b_f$  к допустимому значению скорости колебаний. Приняв, что  $b_f = 1,5$  при

удвоении частоты (против 30 Гц), получили: при  $f = 45$  Гц  $b_f = 1,13$ ; при  $f = 60$  Гц  $b_f = 1,50$ ; при  $f = 75$  Гц  $b_f = 1,88$ ; при  $f = 90$  Гц  $b_f = 2,25$ ; при  $f = 105$  Гц  $b_f = 2,63$ ; при  $f = 120$  Гц  $b_f = 3,0$ .

Такие особенности электроразрядной технологии, как повышенная частота колебаний и повторяющиеся воздействия (обычно  $N = 5-10$  на каждом из уровней в скважине) приводят к противоположным эффектам в контексте сейсмической опасности. Это позволяет считать упомянутые эффекты в определенной мере компенсирующими друг друга.

Еремин В.Я. и Еремин А.В. [2] считают, что при использовании свай-РИТ нет разрушительного низкочастотного динамического воздействия на грунт, так как электровзрыв происходит в локальной зоне и в движение не вовлекаются сколь угодно значительные массы грунта, как при забивке свай. Крепления бортов котлована и окружающие, даже ветхие здания, легко переносят высокочастотные (50 Гц и более) динамические воздействия. Скорость распространения волн столь высока, что здания их «не слышат».

Таким образом, электрический разряд в скважинах с энергиями до 40–60 кДж при напряжении разряда 5–15 кВ и заглублении излучателя не менее 4 м от поверхности земли является практически безопасным для большинства типов зданий и сооружений.

С особой осторожностью данную технологию необходимо применять для усиления существующих фундаментов, основанием которых служат несвязные грунты, склонные к динамическому доуплотнению. Поэтому электроразрядную обработку тела сваи рекомендуется применять вне активной зоны усиливаемого фундамента для снижения риска доуплотнения основания здания и, как следствие, увеличения дополнительной осадки [7].

Применение этой технологии в геотехнике позволяет создать новый геотехногенный массив с улучшенными свойствами за счет уплотнения и армирования грунта. Это, в свою очередь, дает широкую возможность использовать территории, ранее считавшиеся непригодными для строительства из-за сложных грунтовых условий.

На сегодняшний день с использованием разрядно-импульсных технологий (РИТ) изготовлено более 1 млн свай-РИТ и грунтовых анкеров, процемментированы тысячи метров ветхих фундаментов старинных зданий, выполнены километры ограждений котлованов из свай-РИТ, уплотнены десятки тысяч кубических метров грунта, в том числе на глубинах до 20 и более метров, реконструировано и построено более 1000 объектов. Среди этих объектов много памятников архитектуры и зданий, представляющих историческую ценность в Москве: Старый Гостиный двор, бывшее здание Всероссийского театрального общества, комплекс зданий Большого театра, здание усадьбы Дениса Давыдова, храм Вознесения Господня у Серпуховских ворот, Центральная музыкальная школа. Кроме того, в списке объектов – первая в России санно-бобслейная трасса в дер. Парамово, здание Московской школы управления в Сколково, административный комплекс «Соколиная гора» у метро «Семеновская», цементный завод ОАО «Евроцемент» в Воронежской области, большое количество жилых и офисных зданий, школ, спортивных сооружений, мостовых переходов и т.д. Эта технология не имеет аналогов в мире и поэтому ею заинтересовались за рубежом: в Германии, Тунисе, Южной Корее.

### Литература

1. Антикаев С.Ф., Резниченко А.П. Связь параметров сейсмических колебаний с повторяемостью импульсных воздействий на грунт и способ определения деформационных свойств грунтов в скважинах // Сейсмостойкое строительство, 1999. № 5. С. 28-34.
2. Еремин В.Я., Еремин А.В. Высотным зданиям – надежный фундамент // Проблемы механики грунтов и фундаментостроения в сложных грунтовых условиях. Труды международной конференции. Уфа, 2006. Т.1. С. 69-75.

3. Международные нормы оценки колебаний, обусловленных взрывными работами (обзор). Реферат одноименной статьи Raas A. // *Eksplōsivi busenje, miniranje*, 1987. Vol. 18. № 2. P. 103-109.
4. О сейсмической опасности разрядно-импульсных технологий при производстве буринъекционных свай / *В.В. Калинин, М.Л. Владов, С.Ф. Антикаев и др.* // *ОФМГ*, 2003. №1. С. 10-16.
5. *Робсман В.А.* Накопление и хаотическое развитие нелинейных акустических процессов при динамическом нагружении геологических структур // *Акустический журнал*, 1993. Т. 39. Вып. 2. С. 333-349.
6. РТМ 36.9-88. Руководство по проектированию и производству взрывных работ при реконструкции промышленных предприятий и гражданских сооружений. Минмонтажспецстрой СССР. М., 1988. 37 с.
7. *Рытов С.А.* Эффективность применения электроразрядных технологий для устройства геотехнических конструкций // *Жилищное строительство*, 2010. № 5. С. 47-50.
8. Электроискровой источник упругих волн для целей наземной сейсморазведки / *А.В. Калинин, В.В. Калинин, М.Л. Владов* и др. / Под ред. *А.В. Калинина*. М.: Изд-во МГУ, 1989. 193 с.