

Высотным зданиям – надежный фундамент!

В.Я. Еремин, канд. техн. наук, техн. директор фирмы «РИТА»;
А.А. Буданов, аспирант кафедры МГрОиФ МГСУ

Использование электрических разрядов в геотехнике – это изготовление свай малых диаметров и большой несущей способности по грунту. Описан процесс изготовления свай-РИТ и экономическое сравнение на примере строительства высотного здания.

С древних времен люди с трепетом и страхом относились к грозе и землетрясениям, обожествляя их. При этом богов, «ответственных» за эти явления изображали с гневными лицами. Явления, в основе которых лежит этот же принцип, могут «скрываться» и под прекрасным ликом. С кем не случилось, что в транспорте милая дама, одетая в синтетическую шубу, просила Вас передать деньги за проезд, протягивая руку. Вы, ничего не подозревая, еще не прикоснувшись к ее руке, получали ощутимый «удар» электрического тока.

Природа упомянутых явлений одна и та же: накопление в локальной зоне больших электрических потенциалов (зарядов) завершающееся пробоем диэлектрика, окружающего локальную зону, в месте, где электрическая прочность вещества окажется наименьшей. В примере с дамой, накопление заряда статического электричества происходило на ее теле, укутанном в эту шубу. Обувь и воздух изолировали накапливаемую электрическую энергию от растекания. Но когда Ваша рука приблизилась, слой воздуха уменьшился, и в какой-то момент диэлектрическая прочность оставшегося воздушного промежутка не выдержала – произошел разряд накопленной электрической энергии.

Не одну сотню лет ученые с риском для жизни изучают электрические разряды, надеясь найти способы практического использования накапливаемых природой колоссальных ресурсов электрической энергии. Около 50 лет назад была высказана идея об электризации горных пород, накоплении в локальных зонах литосферы больших электрических зарядов и возможности возникновения электрических разрядов [1, 2]. В результате электрического пробоя горных пород с высокими диэлектрическими свойствами, накопленная электрическая энергия преобразуется в другие ее виды, включая механическую, проявляющуюся в виде землетрясения. К сожалению, люди, используя электричество уже более двух столетий, так и не научились в сколько-нибудь значительных масштабах запастись этот промышленный вид энергии [3]. Применение накапливаемых в природе электрических зарядов и огромных энергий – очень далекая перспектива.

Сегодня технически возможно запастись электрическую энергию в форме электрических (аккумуляторы, конденсаторы и др.) и магнитных (индукционные накопители) полей. Возможны и другие способы накопления энергии, но мы остановимся на конденсаторах-накопителях практически используемых для осуществления электрических взрывов (ЭВ) в грунтах, в том числе для их уплотнения, изготовления свай и анкеров.

Вспомним уроки физики, на которых демонстрировался пример пробоя воздушного промежутка (между двумя металлическими шариками): ЭВ

происходил в воздухе, была видна яркая вспышка света, слышен хлопок, однако механического воздействия не ощущалось. Если ЭВ произвести в непрозрачной жидкости, то вспышки не будет видно, но мы услышим слабый хлопок и почувствуем резкий удар по стенкам сосуда – жидкость хорошо передает окружающей среде механическую энергию взрыва.

При изготовлении свай в качестве такой жидкости используют литую бетонную смесь, а вместо сосуда – глубокую скважину, в которую погружают специальные электроды. При подаче на электроды электрической энергии большой плотности может произойти пробой бетонной смеси. Но есть одно «но». Если плотность энергии окажется недостаточной, то бетонная смесь, являясь проводником электрического тока, будет разогреваться – электрическая энергия преобразуется в тепловую в строгом соответствии с законом Джоуля-Ленца.

Для того чтобы произошел ЭВ необходимо создать за короткое время высокую плотность электрической энергии. При быстром нарастании энергии на электродах бетонная смесь не в состоянии ее “пропустить” и, на какое-то время становится диэлектриком. Когда плотность энергии достигает предела диэлектрической прочности бетонной смеси, происходит ее пробой. Между электродами возникает один или сразу несколько плазменных каналов, по которым протекает электрический ток силой десятки тысяч ампер. Весь описанный процесс протекает за время $10^{-4} \dots 10^{-5}$ секунды. Для осуществления ЭВ, способного совершить механическую работу по уплотнению грунта, необходимо за названное время преобразовать 20...60 кДж электрической энергии в другие ее виды. Выразив эту энергию в широко применяемых в технике единицах измерения, получим, что необходима энергия 20 МВт·час, т.е. энергия достаточная для обеспечения районного центра с населением 20-30 тыс. чел.

Учитывая, что для ЭВ такая энергия нужна только в момент разряда, можно ее подавать на электроды отдельными импульсами. Для создания таких импульсов энергии применяют генераторы импульсов тока (ГИТ), при накоплении энергии в виде электрических полей используют конденсаторные батареи. Запасенная в конденсаторах энергия определяется по формуле

$$E = U^2 C / 2,$$

где U – напряжение (В); C – емкость (Ф).

Очевидно, что с увеличением напряжения количество запасаемой энергии возрастает быстрее, чем при увеличении емкостей конденсаторов. Поэтому в ГИТах используют высоковольтные конденсаторы, способные выдерживать сотни тысяч циклов заряд-разряд в импульсном режиме.

Имеющееся на строительной площадке напряжение 380 В, необходимо повысить до напряжения разряда. Первые установки создавали на напряжения 30...100 кВ и даже 300 кВ. Однако, возникающие ограничения по обеспечению безопасности, в конечном итоге, способствовали оптимизации применяемого напряжения. Практика показала, что при напряжениях от 3 до 10 кВ обеспечивается устойчивая стабильность пробоя разрядного промежутка и, в то же время, требования к изоляторам, трансформаторам и т.п. как электрооборудованию, работающему под с напряжением до 10 кВ. При таком

напряжении, для накопления электрической энергии 20...60 кДж требуется увеличить емкость (число) конденсаторов. Для конденсаторов нужен постоянный ток. Поэтому в ГИТ в паре с повышающим трансформатором 0,4/10 кВ устанавливается блок выпрямителей переменного тока в постоянный. Скоммутировав названное оборудование, мы еще не можем его использовать. Кроме того, накапливаемая в конденсаторных батареях энергия, не должна расходоваться до определенного момента. Для этой цели в ГИТ установлен разрядник, который срабатывает при накоплении установленного уровня энергии.

Разрядник коаксиальным кабелем соединяется с электродами, которые погружаются в бетонную смесь. Небольшая, но очень важная деталь: вся описанная система работает в режиме импульсных токов, которым присущи особенности, характерные для импульсных систем. В момент разряда импульсного тока (РИТ) на короткое время температура в ограниченном пространстве достигает 10^4 °С, давление сотен МПа, токи 30 тыс.А и более. Причем, все электрооборудование должно выдерживать десятки тысяч подобных импульсов.

Несмотря на определенные сложности, используя доступное оборудование для накопления электрической энергии, в настоящее время быстро расширяется применение электрических разрядов, в том числе при уплотнении грунта, изготовлении свай и анкером [4].

Первые исследования по применению ЭВ для уплотнения грунта в геотехнике, были начаты в МИСИ (ныне МГСУ) в 1960 г., выполненная работа под названием: «Электроискровой метод уплотнения грунтов», официально зарегистрирована Комитетом по делам изобретений и открытий 05.06.62 г. за № 30166 в книге Государственной регистрации.

Как бы ни пытались назвать технологии, связанные с уплотнением грунтов ЭВ: электрогидравлические, электровзрывные, электроискровые, электроразрядные, ЭРСТ и т.п., за этими технологиями изготовления свай, анкером, глубинного уплотнения грунта в настоящее время закрепилось название: *Разрядно-импульсные технологии* (РИТ). В своде правил [5] по проектированию и устройству свайных фундаментов и других документах [6] нашли отражение свай-РИТ.

Исследования, выполненные в МИСИ в 1960-1970 годах, не только не потеряли своей актуальности, а оказались востребованными в связи с развитием строительства высотных зданий, в основании которых напряжения могут достигать 1 МПа (100 т/м^2) и более. При таких напряжениях теряется линейная зависимость между деформациями и нагрузкой.

Скальные грунты в Москве часто залегают на больших глубинах, не доступных даже для строительства элитных зданий по экономической целесообразности. Можно весьма эффективно использовать залегающие на доступных глубинах водонасыщенные песчаные разности. Известно, что приложение длительно действующих усилий, может вызвать местное разуплотнение песка [7], развитие неравномерных осадок, что весьма злободневно для строительства высотных зданий. Известно также, что вероятность

разжижения песков резко снижается с увеличением их плотности, особенно ярко это выражено в более мелких разностях.

Для глубинного уплотнения песков, залегающих на глубинах 5...25 м ниже дна котлованов, глубина которых, в свою очередь, при строительстве высотных зданий часто превышает 10 м, не так просто выбрать оптимальную технологию и соответствующее оборудование, не наносящих ущерба окружающей застройке, креплениям бортов котлована, не разуплотняющих зону контакта грунта и будущей фундаментной плиты за счет подъема основания [8] и т.д., и т.п.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования под руководством В.А. Флорина, Н.Н. Маслова, Н.М. Гольдштейна, а также Ю.М. Абелевым, Д.Д. Барканом, П.А. Ивановым, Г.М.Ляховым, Г.И. Покровским, О.А. Савиновым, Е.В. Светинским, И.С. Федоровым, О.Я. Шехтером и многими другими, с учетом результатов практического уплотнения миллионов кубических метров водонасыщенных песков различными способами, позволили выявить ряд положительных особенностей воздействия взрыва взрывчатых веществ (ВВ) на грунт. После взрывного уплотнения песков достигается высокая степень однородности плотности массива, более рыхлые, а следовательно, менее прочные участки массива уплотнялись в большей степени, а прослой более плотных песков в меньшей степени изменяли свою первоначальную плотность [7]. Однако вопрос о применении традиционных ВВ для уплотнения грунтов в основаниях высотных зданий нет смысла поднимать. Тем более, что применение традиционных ВВ, помимо возможности их захвата и использования террористами, связано с рядом проблем, включая газификацию грунта продуктами детонации; невозможность многократного (до нескольких сотен) повторения взрывов с безопасными параметрами динамического воздействия.

ЭВ, обладая всеми положительными особенностями взрыва ВВ, не представляет интереса для террористов, позволяет минимизировать энергию единичного взрыва, обеспечивая щадящий режим воздействия, повторить тысячи ЭВ, управлять процессом воздействия на грунт. В связи с этим РИТ все чаще применяется для устройства свайных оснований под высотные здания.

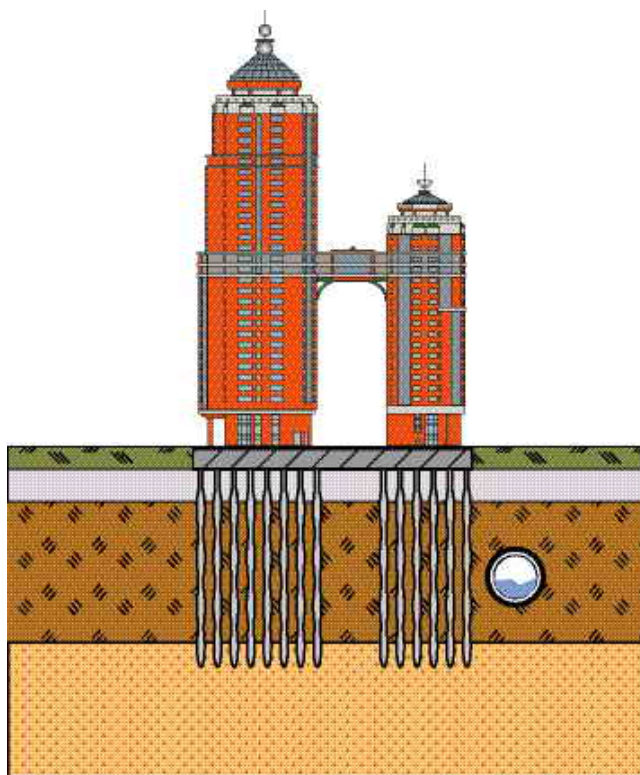
При устройстве каждой сваи-РИТ для высотного здания осуществляется несколько сотен ЭВ с энергией каждого не более 6...10 г в тротиловом эквиваленте. Таким образом, благодаря исследованиям Я.Д. Гильмана (1963)*, Л.П. Хлюпиной (1966), Л.А. Семушкиной (1968), выполненных в МИСИ под руководством проф., д.т.н. Г.М. Ломизе, а также исследованиями других ученых, позволили в настоящее время успешно изготавливать сваи при диаметре скважины до 300 мм с несущей способностью по грунту до 200 т и более.

При изготовлении свай-РИТ, в отличие от уплотнения грунта с использованием РИТ, ЭВ происходит в бетонной смеси, динамическое воздействие ЭВ через бетонную смесь передается грунту, разрушает структуру водонасыщенного песка в локальной зоне. Частицы грунта под действием сил гравитации переупаковываются с учетом фильтрации грунтовой воды в среде с подвижным скелетом, полагая $U = -V$, где: U – скорость фильтрации; V – скорость движения скелета грунта под действием сил гравитации.

Например, время переупаковки частиц в зоне разряда высотой 0,5 м в мелких песках средней плотности при $K_{\phi} = 8-10$ м/сутки, вычисленное с использованием зависимости Дарси-Герсеванова для случая фильтрации в среде с подвижным скелетом, ориентировочно составляет несколько десятков секунд. В то же время, камуфлетная полость, образующаяся при каждом ЭВ и достигающая в диаметре не менее 10...15 см, заполняется бетонной смесью еще до того, как частицы песка переупакуются.

Очередной ЭВ в начале разрядно-импульсной обработки (РИО) свай следует раньше, чем успевает сформироваться новая структура в песке. По мере осуществления ЭВ плотность песчаных разностей возрастает, приближаясь к оптимальной величине и структура переупакованного песка успевает сформироваться за время, пока запасается в накопителях очередная порция электрической энергии. Песчаный грунт продолжает уплотняться за счет небольших смещений частиц все в более удаленных зонах. Оседание бетона в устье скважины становится менее значительным. Необходимо переходить к РИО следующего уровня.

При изготовлении свай-РИТ высокой несущей способности, при РИО в пределах всего свайного поля существенно улучшаются строительные свойства грунтового массива, в котором они изготавливаются, что позволяет осваивать территории, ранее считавшиеся непригодными для строительства не только высотных зданий, но даже зданий высотой 14...20 этажей из-за сложных грунтовых условий.



Характерным примером успешного применения свай-РИТ может служить здание на проспекте Вернадского, 37, высотой 120 м, весом 137 000 т, построенное при непосредственном участии д.т.н. С.А. Амбарцумяна, на 899 сваях-РИТ диаметром 300 мм, длиной 21 м. Стесненная строительная площадка, (ограниченная с одной стороны искусственным озером с зеркалом воды на 2м выше дна котлована, с двух сторон подземными коллекторами Ø 1,7 м на глубине 8м, с четвертой существующим спортивным корпусом общежития МГУ) не использовалась из-за сложного геотехнического состояния (высокий уровень грунтовых вод, невозможность удалить техногенные грунты, залегающие под основанием здания на глубину до 4...8 м). Весь комплекс СМР по строительству двух корпусов выполнен за 1,5 года. При расчетной несущей способности свай-РИТ по грунту 150 т, испытывали сваи по ГОСТ 5686-94 вдавливающей нагрузкой 216 т, осадки свай под этой нагрузкой не превысили 18 мм. Скептически настроенные специалисты при оптимистическом прогнозе предрекали осадку 150 мм (на сваях диаметром 1м длиной 24м). Мониторинг за деформациями здания, выполняемый специалистами НИИОСП им. Н.М. Герсегова, в течение строительства и 2-х лет после его завершения, свидетельствует о хороших результатах – осадка здания не превысила 40 мм. Таким образом, при строительстве этого комплекса зданий за счет использования свай-РИТ, было сэкономлено более 200 млн. рублей.

* - в скобках – год защиты диссертационной работы.

Список литературы:

1. Воробьев А.А., Защинский Л.А., Евсеев В.Д., Курчин В.Н. О статических принципах доказательства существования источников электрических разрядов в литосфере. *Известия ВУЗов. Физика.* 1975, в. 4, с. 111-113.
2. Воробьев А.А. Преобразование энергии, электризация горных пород и разряды в земных недрах. *Электронная обработка материалов.* 1972, № 1 (43), с. 49-56.
3. Лазаренко Б.Р. Состояние и перспективы использования электрических явлений в технологических процессах./Сокращ. Доклад на III Всесоюзном совещании по электрической обработке материалов. 1-3 ноября 1971. Кишинев//*Электронная обработка материалов.* 1972, 2 (44), с. 3-8.
4. Еремин В.Я. Разрядно-импульсная технология на стройках России. *Строительные и дорожные машины.* 2003, № 11, с. 4-10.
5. СП 50-102-2003 Проектирование свайных фундаментов. М.: Госстрой России, 2004, с. 82.
6. Инструкция по проектированию и устройству свайных фундаментов зданий и сооружений в г. Москве. М.: Москомархитектуры. 2001, с. 148.
7. Иванов П.Л. Разжижение песчаных грунтов. Госэнергоиздат. М-Л., 1962, с. 261.
8. Юдина И.М. Разуплотнение грунтов оснований котлованов и его учет при прогнозе осадок сооружений. Дисс. к.т.н. рук. З.Г. Тер-Мартirosян. МИСИ, М.: МИСИ, 1989, с. 191.