

ЮШКОВ АНАТОЛИЙ ЮРЬЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ НАБИВНЫХ СВАЙ
ИМПУЛЬСНЫМИ РАЗРЯДАМИ

Специальность 05.14.12 – Техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2004

Работа выполнена в НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете.

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор Курец В.И.

Официальные оппоненты – доктор технических наук,
профессор Усов Ю.П.;
кандидат технических наук,
Черненко В.П.

Ведущая организация – Институт физико-технических
проблем энергетики Севера Кольского
научного центра РАН

Защита диссертации состоится «11» ноября 2004 года в 15 часов на заседании диссертационного Совета К 212.269.02 при Томском политехническом университете по адресу: 634004, г. Томск, пр. Ленина, 2а, НИИ высоких напряжений при ТПУ, ауд. 312.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «11» октября 2004 года.

Ученый секретарь
диссертационного Совета,
К.Т.Н.



М.А. Соловьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность проблемы. В настоящее время широкое распространение получили свайные фундаменты, способствующие внедрению индустриальных методов в строительстве. Наиболее широко применяются забивные сваи, которые изготавливаются на предприятиях строительной индустрии и погружаются в грунт следующими методами: забивка молотом с помощью копровых установок, вибрационное погружение с использованием специального оборудования, задавливание в грунт при приложении к свае статических или динамических нагрузок, создаваемых посредством грузоподъемных и гидравлических механизмов. Однако в ряде случаев применение забивных свай становится технически затрудненным или экономически нецелесообразным, а иногда и практически невозможным. К таким случаям следует отнести:

- сооружение фундаментов на площадках со сложными условиями строительства, в том числе, когда в пределах строительной площадки залегают плотные грунты, резко меняющие отметки погружения свай;
- прорезка сваями неоднородных по составу насыпей с твердыми включениями или слоев грунта природного сложения с часто встречающимися валунами;
- строительство фундаментов вблизи существующих зданий и сооружений, в которых могут возникнуть недопустимые деформации элементов несущих конструкций;
- производство ремонтных работ в стесненных по высоте помещениях.

Особо надо отметить работы, связанные с укреплением фундаментов при реконструкции и ремонте зданий и сооружений, когда использование забивных свай становится практически невозможным, например при реконструкции ветхого жилого фонда. В этих случаях обычно используют набивные сваи, которые изготавливают непосредственно на строительных площадках. Все виды таких свай (набивные, буронабивные, инъекционные) имеют ряд принципиальных недостатков, связанных со сложностью контроля качества в процессе изготовления и с низкой их несущей способностью.

Одним из наиболее перспективных методов решения проблемы улучшения качества набивных свай является использование электрогидравлического метода, позволяющего обеспечить формирование профиля сваи с уширениями как в ее основании, так и по длине, а также создать уплотнение грунта под пятой сваи и по боковой поверхности и тем самым значительно увеличить ее несущую способность. Суть электрогидравлического метода заключается в создании ударных нагрузок в бетонном растворе, возникающих при формировании мощного импульсного разряда на разных глубинах скважины. Сваи, создаваемые таким образом, получили название «электронабивных». Они обладают повышенной несущей способностью, высокой технологичностью процесса и наилучшими экономическими показателями по сравнению со сваями, изготавливаемыми любыми другими традиционными методами. В настоящее время

электрогидравлический метод прошел успешную промышленную апробацию. С его использованием построено более десятка зданий и сооружений в основном на обводненных грунтах.

Основной проблемой при создании электронабивных свай является формирование канала разряда в бетонном растворе, который имеет высокую удельную проводимость ($\sigma \sim 10^{-3} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$). В таком канале выделяется энергия накопителя и генерируются все ударные воздействия на среду. В настоящее время практически все установки для создания электронабивных свай обеспечивают «тепловую» форму пробоя рабочего промежутка. В этом случае формирование канала разряда происходит при разогреве области раствора между потенциальным и заземленным электродами за счет токов ионной проводимости, при этом образуется парогазовый пузырь или цепочка пузырей, которые растут, перекрывая основную часть рабочего промежутка. Затем парогазовая область пробивается и образуется локальный канал разряда. Большая часть энергии импульса затрачивается на образование такой области, но из-за того, что этот процесс имеет длительный характер, то возникают дополнительные потери энергии, связанные с растеканием импульсных токов с оголенных частей электродной системы. Кроме того, наличие газовой фазы в обрабатываемом растворе приводит к значительной диссипации энергии ударных волн и импульсов давления от парогазовой полости. Для компенсации этих потерь приходится увеличивать энергию импульса генератора. Так, в настоящее время при производстве электронабивных свай энергия единичного импульса достигает $\sim 100 \text{ кДж}$. Использование большой энергии импульса приводит к сокращению срока службы электродных систем, работающих в условиях комбинированных воздействий высокого напряжения и мощных ударных нагрузок, и увеличивает массогабаритные параметры источника импульсов.

Таким образом, уменьшение потерь в предпробивной стадии развития разряда является значительным резервом уменьшения энергии импульса и может быть достигнуто, если осуществить оптимизацию процесса инициирования разряда в проводящих средах. Важно отметить, что поиск методов инициирования разряда в проводящих средах не ограничивается только технологией создания электронабивных свай, а является актуальным для многих электроразрядных технологий, где в качестве объекта воздействия или в качестве передающей среды применяется жидкость с высокой удельной электропроводностью. Решение этой научно-технической задачи позволит обеспечить такие же нагрузки на обрабатываемый объект, как и при тепловом пробое, но при этом энергия импульса будет на порядок меньше, что улучшит надежность работы снаряда – излучателя, снизит расход энергии, уменьшит массогабаритные параметры установки, а соответственно, и повысит эффективность технологии создания электронабивных свай.

Диссертационная работа выполнялась в рамках Межотраслевой программы сотрудничества Министерства образования России и Федеральной Службы Специального Строительства за 2002 – 2005 гг. по

теме «Разработка, изготовление, испытание опытной электроразрядной установки для производства набивных свай» (регистрационный номер 01.03–01), программы Министерства образования России по теме «Исследование электрической искры в конденсированных средах как преобразователя энергии» (регистрационный номер 4.1.99 за 1999 – 2003 гг.), ЕЗН Министерства образования России ГНУ «НИИ ВН при ТПУ» по теме «Исследование динамики и траектории канала разряда при пробое конденсированных сред» (регистрационный номер 4.8.01 за 2001 – 2004 гг.), индивидуальных грантов ГНУ «НИИ ВН при ТПУ» за 2002 – 2004 гг.

Цель работы включала изучение структуры потерь энергии при пробое высокопроводящих жидкостей, выбор метода инициирования разряда в бетонных растворах, обоснование необходимых параметров источника импульсов для производства электронабивных свай, а также разработку на основе данных исследований опытной стационарной установки и проведение ее испытаний на макетах скважин.

Основные задачи исследований. Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие задачи:

1. Экспериментально исследовать и теоретически оценить уровень потерь энергии импульса в предпробивной и завершающей стадиях развития разряда в жидких средах с различной проводимостью.

2. Исследовать и выбрать эффективные технологические методы инициирования разряда в проводящих средах с целью организации электрического пробоя.

3. Изучить влияние электрических разрядов на цементные растворы и прочность образующегося цементного камня.

4. Разработать и изготовить экспериментальный образец электротехнической установки и на макете скважины провести испытания по созданию и формированию электронабивных свай с требуемыми прочностными свойствами и необходимым профилем.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Показано, что для оценки потерь энергии формирования разряда необходимо учитывать количество лидерных образований, развивающихся с потенциального электрода. Предложена методика расчета потерь энергии в предпробивной стадии развития разряда.

2. Установлено, что метод инициирования разряда, реализуемый протеканием зарядного тока через рабочий промежуток, позволяет эффективно формировать локальный канал разряда в высокопроводящих жидкостях, в том числе в бетонных растворах, и уменьшить потери энергии в предпробивной стадии развития разряда на ~ 30 %.

3. Установлено, что прочность цементного камня, полученного после обработки цементных растворов электрическими разрядами, увеличивается от 30 до 50 % по сравнению с контрольными образцами. Применение схемы с протеканием зарядного тока обеспечивало максимальное значение прочности.

4. Предложена и экспериментально подтверждена методика расчета конфигурации электронабивной сваи от характеристик грунта и параметров импульсов.

Автор выносит на защиту:

- результаты экспериментальных исследований и теоретических оценок потерь энергии на стадии формирования разряда в жидкостях с различными значениями проводимости;
- результаты исследований методов инициирования импульсного разряда в высокопроводящих жидкостях;
- результаты исследования прочностных свойств цементного камня, полученного из растворов, обработанных электрическими разрядами;
- методику расчета параметров импульса и оценку ударных воздействий на бетонный раствор и грунт, окружающий скважину;
- опытную установку для производства электронабивных свай и результаты ее испытаний на макете скважины.

Достоверность и обоснованность результатов положений, выводов и рекомендаций настоящей диссертационной работы гарантирована необходимым объемом экспериментальных исследований, обеспечивающих статистический анализ результатов, использованием современных методов измерений и соответствующей аппаратуры, адекватностью расчетных, экспериментальных данных по оценке потерь энергии в стадии развития разряда и изменения геометрии бетонного тела электронабивной сваи, а также подтверждается сравнением полученных результатов с результатами других исследователей, практической реализацией научных положений и выводов при создании и успешном испытании опытной установки.

Практическая значимость и реализация работы.

Расширена область использования электроразрядной технологии для создания электронабивных свай в ненасыщенных водой грунтах.

Проведены успешные испытания опытной установки для производства электронабивных свай на макете скважины глубиной до 10 м.

Разработана опытная установка для производства электронабивных свай, включающая генератор импульсов и рабочий снаряд, которые обеспечивают необходимые ударные нагрузки на бетонный раствор и окружающий грунт при энергии импульса на порядок меньшей, чем использовалась до настоящего времени.

Полученные результаты могут быть использованы в других электрогидравлических установках, например, для очистки внутренних поверхностей водопроводных труб, увеличения дебита скважин и очистки фильтров в них, а также для повышения прочностных характеристик бетона.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались на научно-практической конференции-выставке «Наука, инновации, подготовка кадров в строительстве» (Россия, Москва, 2002 г.), Международной научно-технической конференции «Состояния и перспективы развития электротехнологии» (Россия, Иваново, 2003 г.), 8-ой Всероссийской научно-практической

конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (Россия, Томск, 2002 г.), The 7th Korea-Russia international symposium on Science and Technology (Korea, Ulsan, 2003), The 8th Korea-Russia international symposium on Science and Technology (Russia, Tomsk, 2004), 13th International Symposium on High Current Electronics Technology (Russia, Tomsk, 2004), а также на научных семинарах ГНУ «НИИ ВН при ТПУ».

Публикации. Основное содержание и результаты исследований опубликованы в 4-х научных статьях, 1-ом патенте РФ, 3-х докладах в трудах научных конференций и 3-х тезисах докладов.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения с общим объемом 170 страниц, включая 41 рисунок, 28 таблиц и 2 приложения. Список цитируемой литературы содержит 114 ссылок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обосновывается актуальность тематики, сформулированы цель и задачи исследований, определена научная новизна и практическая значимость результатов и дана общая характеристика работы.

В первой главе рассмотрены области использования и методы создания набивных свай в строительстве и при ремонтных работах. Основной проблемой создания таких свай является их низкая несущая способность, так как изготовление изделий осуществляется непосредственно на рабочих площадках.

Анализ литературы показывает, что для улучшения несущей способности и качества свай применяют высокоэнергетические методы, в основе которых используется взрыв химических веществ или электрогидравлическое воздействие. Отмечается, что наиболее перспективным методом формирования набивных свай и анкеров является метод, основанный на организации импульсных разрядов в бетонном растворе для увеличения диаметра сваи в основании, развития ее боковой поверхности, упрочнения окружающего грунта, упрочнения тела сваи и улучшения других характеристик. Такой электрогидравлический метод в основном используют в практике строительных работ во влажных грунтах. Основной проблемой при создании электронабивных свай является использование значительных энергий в импульсе, достигающих 100 кДж, что приводит к резкому сокращению надежности и срока службы рабочего снаряда–излучателя, существенному увеличению массогабаритных характеристик установок. Анализ процесса создания электронабивных свай в производстве показал, что большая часть энергии импульса расходуется на образование парогазовых мостиков между электродами в рабочем снаряде излучателя, что приводит к неоправданному увеличению энергии единичного импульса. При этом разряд в бетонном растворе имеет тепловой характер. Для уменьшения потерь энергии на стадии формирования разряда необходимо перейти от тепловой формы пробоя к электрической.

В настоящее время уровень изученности процесса не достаточен для применения электронабивных свай в строительном производстве при различных геотехнических условиях, так как имеется информация по его использованию только в водонасыщенных грунтах. Недостаточно разработаны модели ударных нагрузок, сопровождающих электрический разряд при создании сваи в грунте, отсутствует анализ потерь энергии импульса на стадии формирования разряда и нет достаточно разработанной концепции конструирования рабочего снаряда–излучателя.

Несмотря на указанные проблемы перспективность электрогидравлического способа создания электронабивных свай не вызывает сомнений и для расширения их использования необходимо более детально изучить процесс их производства.

Вторая глава посвящена описанию аппаратуры, источников импульсов, оптических устройств, схем измерений и электродных систем, а также методике проведения экспериментов, материалам и объектам исследований.

Определения потерь энергии на стадии формирования и развития разряда в жидкостях с различной удельной электропроводностью, а также исследование изменения прочности цементного камня после обработки растворов цемента электрическими разрядами выполнялись на двух экспериментальных установках, укомплектованных необходимой измерительной и регистрационной аппаратурой.

Первая установка включала в себя рабочую камеру и генератор импульсных токов (ГИТ 1), который обеспечивал амплитуды импульсов напряжения 30 кВ, интервал изменения разрядной емкости от 0,4 до 10,0 мкФ и максимальную энергию в импульсе 4,5 кДж. Индуктивность разрядного контура составляла 5 – 15 мкГн, а частота посылок импульсов – 1 имп/с. Конструкция ГИТ 1 позволяла использовать как классическую схему зарядки конденсаторной батареи, так и схему зарядки через рабочий промежуток, заполненный жидкостью или бетонным раствором. Этот генератор использовался для технологических исследований.

Вторая установка была укомплектована генератором импульсных токов (ГИТ 2), который имеет возможность широкого варьирования параметров: $U_0 = 20 - 50$ кВ, $W_0 = 45 - 180$ Дж, $L_{\min} = 5$ мкГн. Эта установка снабжена системами измерения разрядного тока и напряжения, а также имеет оптическую систему и схему синхронизации подачи импульса с ее запуском. Устройство для получения синхронизирующих импульсов запуска собрано на базе тиратрона ТГИ – 400/16 и тригatrona, смонтированного на шаровом разряднике. Оптические исследования осуществлялись с использованием скоростных фоторазверток на СФР–2М с максимальной частотой съемки $2.5 \cdot 10^6$ кадр./с и статического фотографирования фотоаппаратом Зенит–ТТЛ. Вся оптическая система смонтирована на оптической скамье, юстировка которой осуществлялась лазером ЛГ–76, а для подсветки использовалась лампа ИФК–150 и зеркальные лампы. В этой установке применялась

специальная рабочая камера, стенки которой выполнены из оптически активного материала – блочного оргстекла.

В качестве объектов исследований были использованы: техническая вода ($\rho \approx 3 \cdot 10^3$ Ом·см), слабый раствор электролита ($\rho \approx 1,5 \cdot 10^3$ Ом·см), цементный и бетонный растворы с $\rho \approx (1 - 20) \cdot 10^2$ Ом·см. В работе использовался цемент марки М 400 Топкинского цементного завода, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 10178–85. В качестве заполнителя в бетонных растворах применялся мелкозернистый песок, согласно ГОСТ 8736–85. Слабые растворы электролита создавались растворением в воде KCl в требуемых пропорциях.

В качестве измерительной аппаратуры, фиксирующей характеристики тока и напряжения использовались осциллографы С8–17, ОК–17 с системой делителей напряжения типа Раске–Балыгина и токовых шунтов Роговского. Для определения характеристик цементных растворов применялись: прибор Вина (сроки схватывания), и конус АзНИИ (растекаемость). Прочность цементного камня определялась по методике и на аппаратуре согласно ГОСТ 310.4–81.

Для исключения систематических и грубых ошибок при обработке экспериментальных данных были использованы методы математической статистики.

В третьей главе изложены результаты исследований потерь энергии на стадиях формирования и развития разряда в технической воде, водоцементных растворах и в слабых электролитах, удельная электропроводность которых соответствовала водоцементным и бетонным растворам, а также рассмотрено несколько видов инициирования разряда в таких средах.

Отмечается, что изучению потерь энергии при разряде в воде посвящено большое количество работ. Наиболее полно процессы потерь энергии исследовались сотрудниками института ИИПТ НАН Украины в г. Николаеве. В основе этих исследований использовалась модель, предложенная Ушаковым В.Я., согласно которой с момента подачи импульса часть энергии затрачивается на создание перегретой неустойчивости вблизи потенциального электрода. Этот процесс характеризуется временем долидерной стадии развития разряда ($t_{дл}$), сопротивлением рабочего промежутка (R_0) и средним напряжением в рабочем промежутке ($U_{ср}$). Тогда расход энергии W_1 долидерной стадии развития разряда можно определить с помощью выражения:

$$W_1 = \frac{U_{ср}^2}{R_0} \int_0^{t_{дл}} dt,$$

Потери энергии в стадии развития лидеров определяются энергией, необходимой для образования лидерной системы, и энергией, связанной с растеканием токов с оголенной поверхности потенциального электрода, а также с поверхности самих лидеров. Характерное время лидерной стадии развития разряда в технической воде значительно меньше, чем время

долидерной стадии ($t_{\text{дл}} \gg t_{\text{л}}$), поэтому энергия потерь, связанная с растеканием токов в этой стадии развития разряда (W_3) должна быть незначительной.

Потери энергии на образование одного лидера можно определить из выражения, предложенного профессором Кривицким Е.В.:

$$W_2^* \approx \left(\frac{U_1^2 l_{\text{рп}}}{R_0 V_{\text{рл}}} \right) \ln \left(\frac{E_{\text{кр}} l_{\text{рп}}}{U_1} \right),$$

где $E_{\text{кр}}$ – критическая напряженность, при которой возможно развитие лидеров; $l_{\text{рп}}$ – длина рабочего промежутка; $V_{\text{рл}}$ – скорость нарастания лидера в промежутке; U_1 – напряжение в рабочем промежутке в момент старта лидеров.

Расчет потерь энергии в стадии формирования и развития разряда в соответствии с представленными выражениями дает заниженные значения. Это связано с тем, что в расчетах не учитывается количество возникших лидеров. Число лидеров в разряде зависит от проводимости и состояния среды, энергии импульса, напряженности электрического поля. С учетом этого и на основе экспериментальных данных было предложено их количество оценивать следующим выражением:

$$n \approx \frac{E_1^2}{\rho} \left(\frac{W_0 - W_1}{W_0} \right) \frac{1}{\gamma C_p \beta}, \quad (3.11)$$

где W_0 – энергия импульса; E_1 – напряженность электрического поля у потенциального электрода в момент старта лидеров; β – скорость изменения температуры среды; γ – плотность жидкости; C_p – теплоемкость жидкости.

Тогда потери энергии, связанные с развитием лидерной системы будут определяться так:

$$W_2 = n W_2^*.$$

Потери энергии W_3 за счет растекания токов в процессе развития лидеров до замыкания рабочего промежутка можно оценить как:

$$W_3 = \frac{U_1^2}{R_0} t_{\text{л}}.$$

Общие затраты энергии $W_{\text{п}}$ на формирование и развитие разряда определяются суммой потерь:

$$W_{\text{п}} = W_1 + W_2 + W_3.$$

Расчетные значения потерь энергии в каждой стадии развития разряда в зависимости от энергии импульса и длины рабочего промежутка при постоянной амплитуде импульса ($U_0 = 30$ кВ) и $\rho = 3 \cdot 10^3$ Ом·см, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Длина рабочего промежутка l_{rp} , см	1	2	3	4	5	Энергия импульса, W_0 , Дж
W_1 , Дж	130,10	174,74	194,43	205,45	212,47	540
W_2+W_3 , Дж	44,18	162,58	287,22	417,75	553,47	
$W_{п}$, Дж	174,28	337,32	481,65	623,20	765,94	
W_1 , Дж	140,74	194,84	219,86	234,19	243,45	1350
W_2+W_3 , Дж	47,76	215,62	409,34	620,49	845,11	
$W_{п}$, Дж	188,50	410,46	629,20	854,68	1088,6	
W_1 , Дж	143,80	200,81	227,53	242,92	252,92	2250
W_2+W_3 , Дж	48,49	232,90	451,59	692,83	951,24	
$W_{п}$, Дж	192,29	433,71	679,12	935,75	1204,1	
W_1 , Дж	146,16	205,47	233,55	249,81	260,39	4500
W_2+W_3 , Дж	48,93	246,86	486,52	753,40	1040,8	
$W_{п}$, Дж	195,09	452,34	720,07	1003,2	1301,2	

В таблице 2 даны экспериментальные значения вероятности пробоя рабочих промежутков при различных значениях энергии импульса. Суммарные потери энергии ($W_{п}$) с определенным приближением можно считать равным энергии импульса при условии 50 % вероятности пробоя промежутка. Сравнения результатов эксперимента и расчета показали удовлетворительную сходимость.

Таблица 2

Длина рабочего промежутка l_{rp} , см	Энергия импульса W_0 , Дж			
	540	1350	2250	4500
	Вероятность пробоя рабочего промежутка, %			
1	100	100	100	100
2	67±7	100	100	100
3	54±8	98±2	100	100
4	24±5	85±5	97±3	100
5	0	63±7	89±6	100

Предложенная методика расчета потерь энергии на стадии формирования и развития разряда была использована для оценки потерь при пробое водцементных растворов с $\rho \approx 1,5 \cdot 10^3$ ом·см. Результаты расчета представлены в таблице 3, а результаты потерь энергии полученные экспериментально – в таблице 4, которые подтверждают правомочность использования такой структуры потерь и метода расчета при пробое высокопроводящих жидкостей.

Таблица 3

Длина рабочего промежутка l_{rp} , см	1	2	3	Энергия импульса, W_0 , Дж
W_1 , Дж	130,10	174,74	194,43	540
$W_2 + W_3$, Дж	175,04	673,90	1196,15	
$W_{п}$, Дж	305,14	848,64	1390,58	
W_1 , Дж	140,74	194,84	219,86	1350
$W_2 + W_3$, Дж	192,07	926,19	1777,05	
$W_{п}$, Дж	332,81	1121,03	1996,91	
W_1 , Дж	143,80	200,81	227,53	2250
$W_2 + W_3$, Дж	195,51	1008,43	1978,01	
$W_{п}$, Дж	339,31	1209,24	2205,54	
W_1 , Дж	146,16	205,47	233,55	4500
$W_2 + W_3$, Дж	197,64	1074,80	2144,17	
$W_{п}$, Дж	343,80	1280,27	2377,72	

Таблица 4

Длина рабочего промежутка l_{rp} , см	Энергия импульса W_0 , Дж			
	540	1350	2250	4500
	Вероятность пробоя рабочего промежутка, %			
1	56±6	100	100	100
2	5±2	64±7	90±5	100
3	0	38±8	69±7	97±2

Анализ потерь энергии в предпробивной стадии развития разряда в проводящих жидкостях показал, что при их снижении можно добиться наибольшего эффекта, если уменьшить время, необходимое для создания перегретой неустойчивости вблизи потенциального электрода, и уменьшить количество прорастающих лидеров. Этого можно достичь путем принудительного инициирования разряда.

Для инициирования разряда нами использовались вынос «тройной точки» (изоляция – металл – жидкость) в рабочий промежуток и пропускание зарядного тока конденсаторной батареи через рабочий промежуток. Выбор этих способов определялся простотой их осуществления и надежностью работы при организации разряда в водоцементном или бетонном растворах на глубинах до 5 – 15 м.

Исследования влияния тройной точки на разряд в жидкостях показали, что время $t_{дл.}$ уменьшается на 20 – 25 %, в результате чего потери энергии в стадии формирования разряда уменьшаются на ~ 20 %, кроме того установка диэлектрической вставки в потенциальном электроде обеспечивает при прочих равных условиях возможность пробивать большие рабочие промежутки. Однако, как было экспериментально установлено, этот эффект сохраняется только при подаче 10 – 30 импульсов, а затем при их

дальнейшей подаче эффект инициирования уменьшается и может прекратиться совсем. Поэтому такое инициирование разряда не может быть эффективно использовано при создании электронабивных свай, т.к. для их формирования требуется от 100 до 1000 импульсов.

Инициирование разряда в проводящей жидкости зарядным током конденсаторной батареи оказалось более предпочтительным. За счет токов проводимости происходит разогрев жидкости у потенциального электрода и между электродами, при этом сокращается время формирования перегретой неустойчивости и создаются благоприятные условия для формирования лидеров в рабочем промежутке. Сравнение статических фотографий разряда, без протекания тока, с фотографиями когда зарядный ток протекал через рабочий промежуток, показывает, что в большинстве случаев разряд начинает развиваться с острия, а не изоляции электрода и уменьшается число лидеров, перекрывающих большую часть рабочего промежутка (рис. 1).

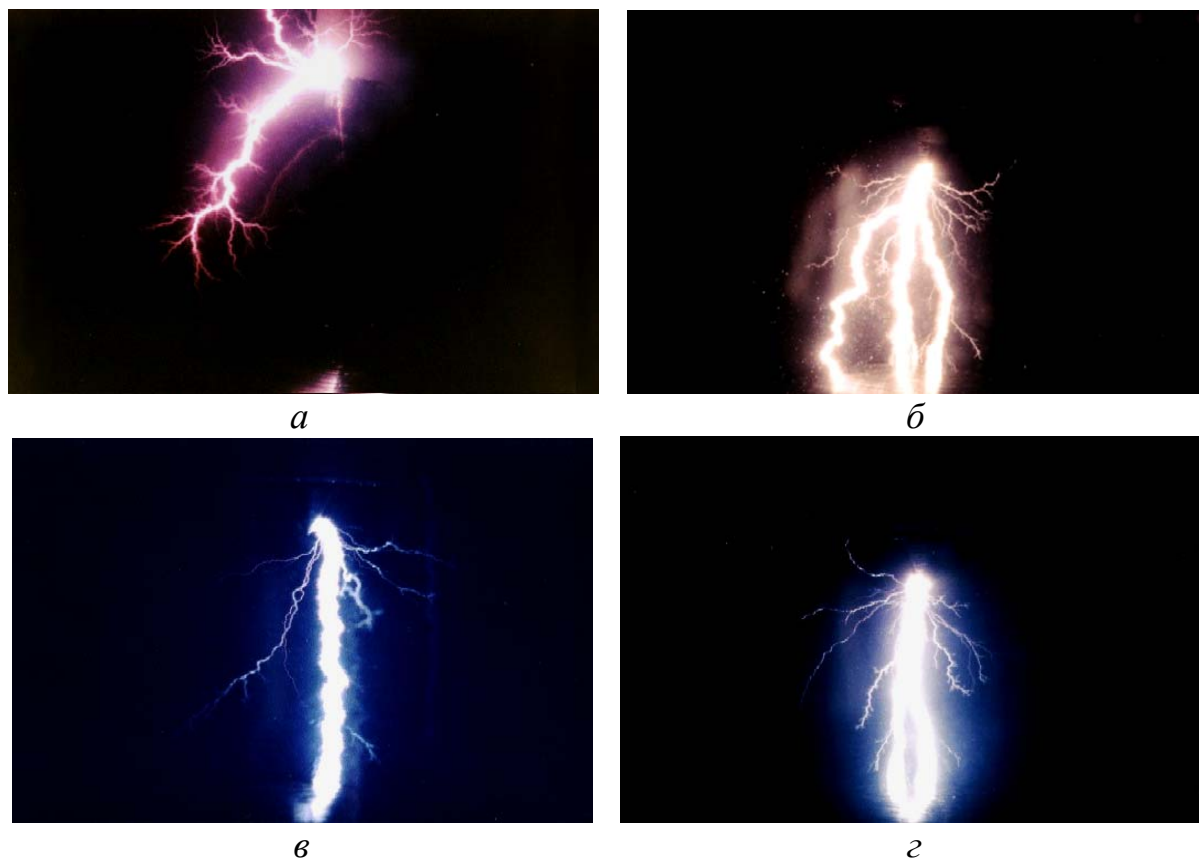


Рис. 1. Электрический разряд в воде
($U_0 = 30$ кВ, $W_0 = 112,5$ Дж, $\rho = 3 \cdot 10^3$ Ом·см):

а, б – разряд в схеме без протекания тока в рабочем промежутке (*а* – растекание тока при $l_{rp} = 3$ см, *б* – пробой при $l_{rp} = 2$ см);
в, г – разряд в схеме с протеканием тока в рабочем промежутке (*в* – пробой при $l_{rp} = 3$ см, *г* – пробой при $l_{rp} = 2$ см)

Из осциллограмм тока и напряжения следует, что время развития разряда уменьшилось, а скорость развития разряда увеличилась (рис. 2).

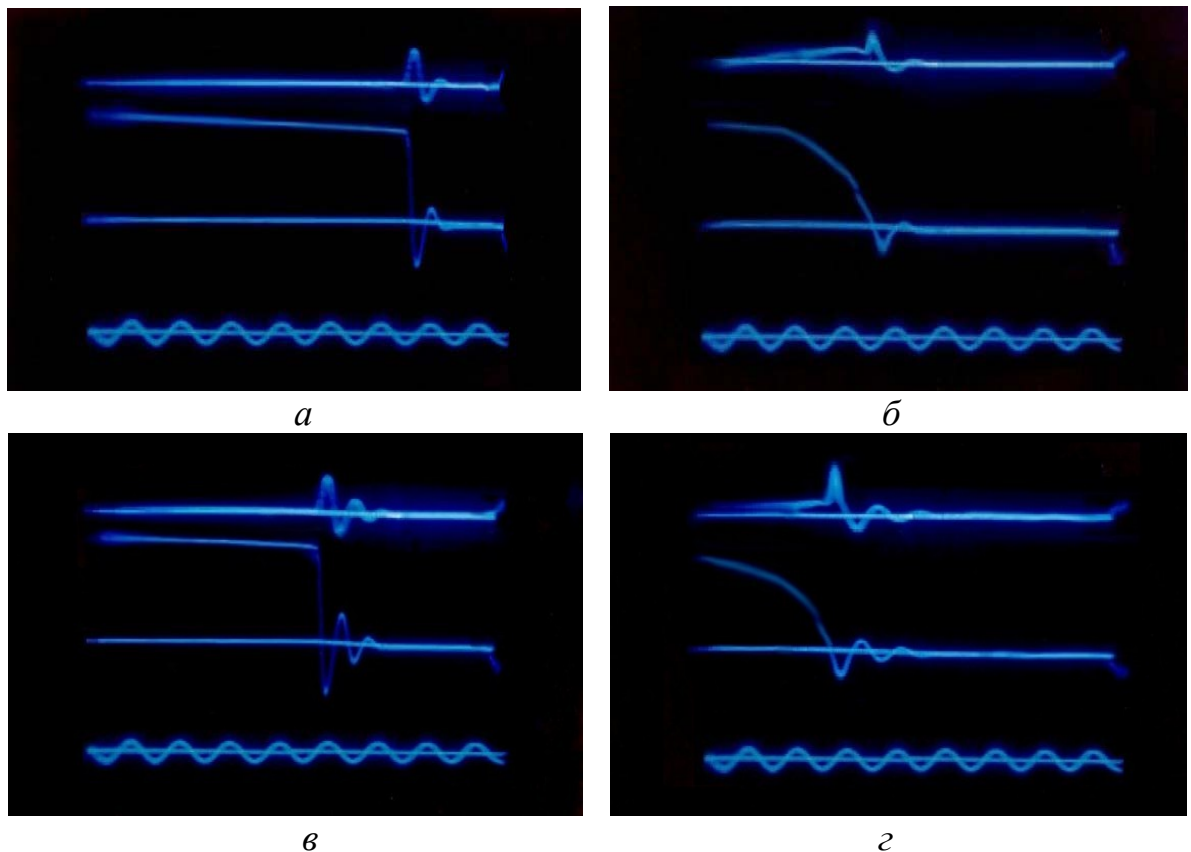


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения разряда в воде, эталонная частота 100 кГц ($U_0 = 30$ кВ, $W_0 = 540$ Дж, $l_{\text{пл}} = 2$ см):

$a, б$ – разряд в схеме без протекания зарядного тока (a – пробой, $\tau_3 = 61$ мкс, $\rho = 3 \cdot 10^3$ Ом·см; $б$ – пробой, $\tau_3 = 33$ мкс, $\rho = 1,5 \cdot 10^3$ Ом·см);
 $в, г$ – разряд в схеме с протеканием зарядного тока ($в$ – пробой, $\tau_3 = 45$ мкс, $\rho = 3 \cdot 10^3$ Ом·см; $г$ – пробой, $\tau_3 = 23$ мкс, $\rho = 1,5 \cdot 10^3$ Ом·см)

В результате было экспериментально установлено, что такой способ инициирования разряда позволяет уменьшить потери энергии импульса на 30 %, и его можно рекомендовать не только при создании электронабивных свай, но и для других электрогидравлических технологий.

Четвертая глава посвящена изучению влияния обработки водоцементных растворов электрическими разрядами на прочностные характеристики цементного камня. Для приготовления растворов использовался цемент марки М 400 с разными водоцементными соотношениями (В/Ц). Соотношение В/Ц существенно влияет на прочность цементного камня. В промышленных технологиях обычно используются растворы с соотношением равным 0,4, однако в случае создания электронабивных свай такие растворы не могут быть использованы, из-за того, что смесь имеет тестообразное состояние и обладает плохой текучестью. Поэтому нами использовались растворы, имеющие водоцементное соотношение не менее 0,5. Результаты исследований показали, что даже при В/Ц = 0,5 – 0,7 прочность цементного камня, полученного после обработки раствора электрическими разрядами, увеличивается на 50 – 60 % по сравнению с прочностью контрольных

образцов, создаваемых по традиционной технологии. Оптимальная энергия необходимая для обработки растворов, когда прочность цементного камня достигает максимального значения, равняется 34 кДж/л. Применение схемы с протеканием зарядного тока обеспечивало формирование цементного камня с максимальным значением прочности. При создании набивных свай важной характеристикой является показатель удобоукладываемости раствора в скважине, который зависит от растекаемости раствора и определяет их качество. Наши исследования показали, что показатель растекаемости цементных растворов, обработанных электрическими разрядами, выше, чем у контрольных образцов.

Как отмечалось, одна из областей применения набивных свай связана с их изготовлением на местах, удаленных от промышленного производства. В связи с этим является важным обеспечить высокое качество цементного камня, получаемого при использовании лежалых цемента. Известно, что хранение цемента в течение трех месяцев приводит к 20 % потери прочности цементного камня и к 30 % после шести месяцев хранения. Исследования показали, что активация лежалых цемента электрическими разрядами позволяет увеличить прочность цементного камня на 11 % по сравнению с контрольными образцами, а электрообработка смеси, состоящей из лежалых и нормальных цемента в соотношении 1:1, позволяет получить прочность цементного камня, соответствующую требованиям ГОСТ. Измельченный в шаровой мельнице частично гидратированный цемент может быть использован при электроразрядной активации в качестве активного наполнителя для производства электронабивных свай.

В пятой главе рассмотрена модель процесса формирования конфигурации электронабивной сваи; представлена методика оценки результатов воздействия электрических разрядов на размеры уширения скважины и их связь с параметрами генератора импульсов; описана установка, позволяющая моделировать глубину погружения сваи и изменения характеристик окружающего грунта, а так же даны оценки возможностей использования водоудерживающих добавок для связывания воды в бетоне при работах в маловлажных грунтах.

Модель формирования электронабивной сваи позволяет учесть следующие процессы: электрический пробой рабочего промежутка в бетонном растворе в скважине, который генерирует акустическую волну, распространяющуюся в растворе и в окружающем грунте с учетом отражения и преломления на границе бетон – грунт. Под действием акустической волны частично разрушается скелет грунта, т.е. грунт теряет на определенном расстоянии свои прочностные свойства (аналогичные процессы происходят при взрыве ВВ); вслед за акустической волной с интервалом в несколько сотен микросекунд возникает вторичный импульс давления, связанный с расширением парогазовой полости. За счет квазистатического воздействия на зоны грунта с разрушенным скелетом происходит их заполнение бетонным раствором, при этом грунт уплотняется. В дальнейшем этот процесс повторяется. После окончания процесса

формирования конфигурации сваи происходит консолидация грунта под собственным весом, как в основании скважины, так и по боковой поверхности. Схема размещения рабочего снаряда – излучателя в скважине и обозначения, используемые в расчетах, представлены на рис. 3.

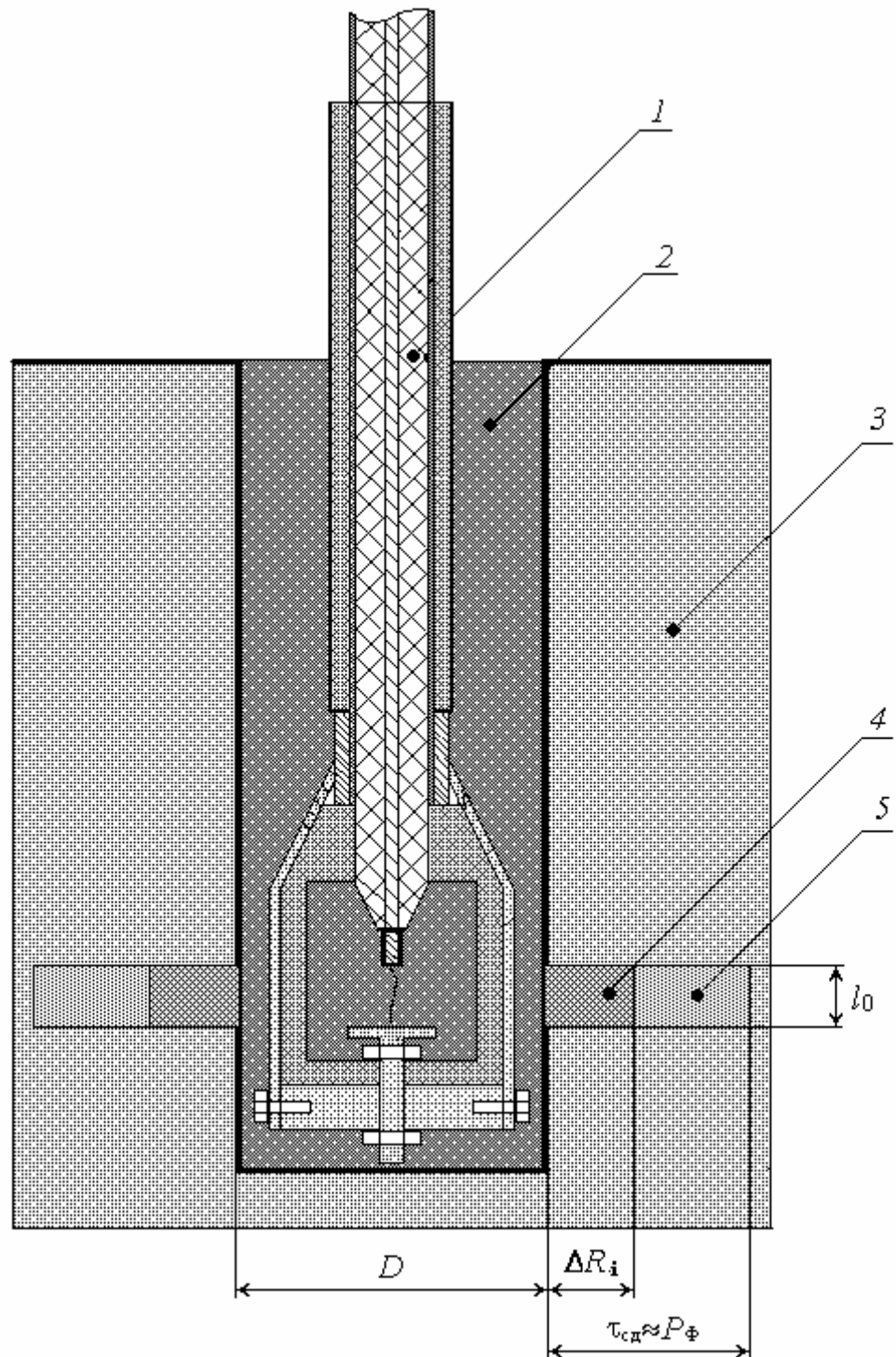


Рис. 3. Расчетная схема уширения скважины:

1 – рабочий снаряд; 2 – бетонная смесь; 3 – грунт; 4 – зона уширения скважины; 5 – зона разупрочнения грунта от ударной волны; D – диаметр исходной скважины

Согласно предлагаемой модели основными воздействующими факторами на бетонную смесь и грунт являются акустическая волна и давление от парогазовой полости. Характеристики этих воздействий в основном зависят от максимального давления в канале разряда, которое можно оценить из выражения:

$$P_m \approx 0,26 \sqrt{\frac{\rho_0 U_0^2}{L l_{pn}}}.$$

Если известны акустические характеристики грунта и его прочность на сдвиг, то возможно оценить зону разрушения грунта от акустической волны. Для этой зоны значение модуля сжимаемости грунта (E^*) можно принять минимальным, то тогда максимальное уширение скважины в зависимости от числа поданных импульсов можно определить из выражения:

$$\sum_1^n \Delta R_i \approx \sum_1^n \frac{(1 - \mu^2) \omega P_m r}{E^* N_i},$$

где N_i – номер импульса; n – количество импульсов; r_0 – радиус канала разряда; μ – коэффициент Пуассона; ω – безразмерный коэффициент.

Таким образом, зная параметры импульсов и их количество можно оценить максимальное значение диаметра ствола скважины в зоне воздействия электрических разрядов, или решить обратную задачу.

Изготовление электронабивных свай осуществлялось на установке, моделирующей состояние грунта на глубинах до 15 м, которая разработана и изготовлена в НИИ СМ при ТГАСУ. В качестве грунта использовался мелкозернистый песок, уложенный и утрамбованный специальным образом в установке. Для контроля напряженного состояния грунта на разных отметках размещались датчики давления. Специальным буром в грунте создавалась лидерная скважина диаметром 110 мм. Бетонная смесь состояла из цемента марки М 400, мелкозернистого песка (ГОСТ 8736–85), воды и водоудерживающей присадки. Водоцементное соотношение изменялось от 0,5 до 1, соотношение цемент – песок составляло один к трем.

В качестве источника импульсов использовался ГИТ 30/10, собранный на конденсаторах ИКГ 50–1 / У1 и имеющий следующие параметры: $W_0 = 4,5$ кДж, $U_0 = 30$ кВ, $L \approx 5 - 15$ мкГн, $C = 10$ мкФ, частота срабатывания 1 имп/с. В работе использовалась схема зарядки конденсаторной батареи через рабочий промежуток снаряда – излучателя. Использование коаксиальной системы рабочего снаряда – излучателя и близкое расположение источника импульсов к скважине позволили уменьшить индуктивность разрядной цепи.

Результаты исследований показали, что формирование необходимой конфигурации электронабивной сваи возможно при энергии импульса 5 кДж. Это на порядок меньше, чем энергия используемая при производстве электронабивных свай в настоящее время. Внешний вид сваи представлен на рис. 4.



Рис. 4. Электронабивная свая второго типа (глубина скважины 5 – 6 м)

Показано, что в маловлажных грунтах использованием водоудерживающих присадок в количестве 0,02 – 0,2 % от массы бетонной смеси позволяет увеличивать диаметр сваи в два раза, как в основании, так и по высоте.

На рис. 5 представлена кинетика изменения диаметра сваи от числа поданных импульсов, на этом же рисунке приведены расчетные значения увеличения диаметра в соответствии с предложенной методикой расчета.

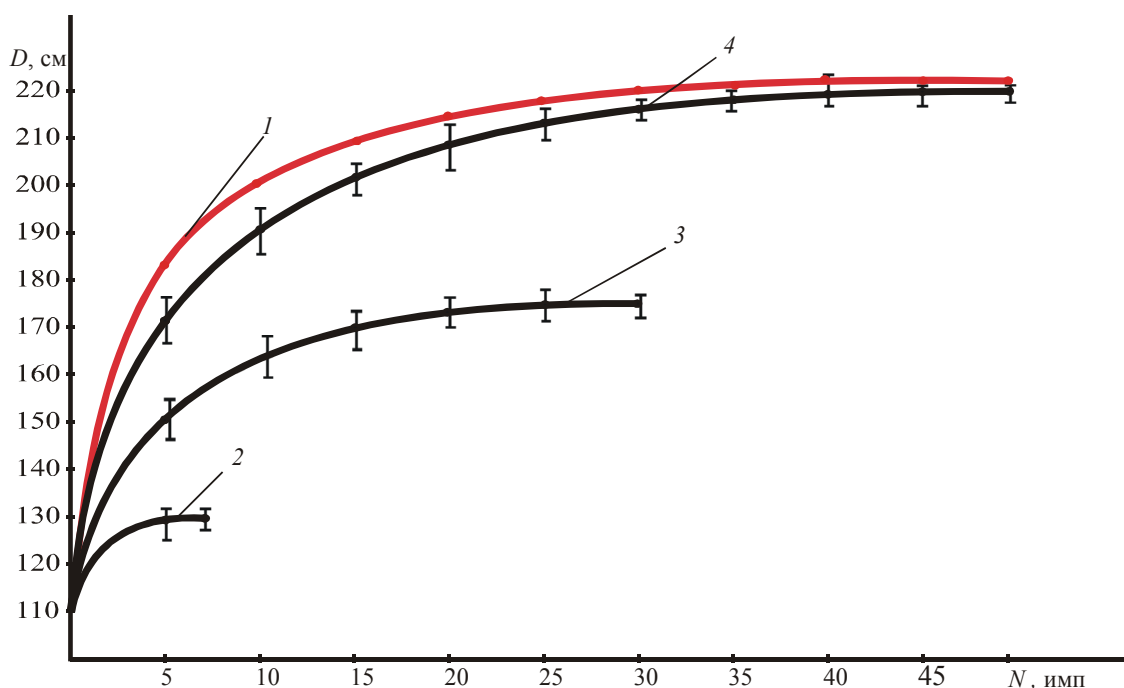


Рис. 5. Изменения диаметра сваи в зависимости от количества поданных импульсов:

- 1 – расчетная кривая изменения диаметра сваи (глубина 5 – 7 м);
- 2 – экспериментальная кривая для сваи первого типа (глубина 8 – 10 м);
- 3 – экспериментальная кривая для сваи второго типа (глубина 8 – 10 м);
- 4 – экспериментальная кривая для сваи второго типа (глубина 5 – 6 м)

Как видно, сходимость расчетных и экспериментальных значений увеличения диаметра скважины от числа поданных импульсов высокая, что указывает на возможность использования расчетной модели для прогнозирования результатов при формировании электронабивных свай.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

1. В результате экспериментальных исследований и анализа структуры потерь энергии импульса при разряде в жидкостях с различными проводимостями установлено влияние процесса образования лидерной системы на предпробивные потери, что позволило создать методику расчета и более точно сделать оценку затрат энергии при импульсном пробое высокопроводящих жидкостей, в том числе цементных и бетонных растворов.

2. Исследование процесса инициирования разряда в системе с тройной точкой (жидкость – изоляция – металл) в рабочем промежутке, показало, что разряд начинает формироваться из тройной точки, однако эффект инициирования сохраняется только в течение 30 – 50 импульсов. Этот метод инициирования может быть рекомендован в технологиях, где для достижения нужного эффекта требуется несколько импульсов, например при штамповке металла.

3. Изучение метода инициирования разряда с включением рабочего промежутка в зарядную цепь генератора импульсов, показало, что при пробое жидких сред (включая высокопроводящие) уменьшаются потери энергии в предпробивной стадии на ~ 30 %. Этот метод может быть рекомендован для пробоя цементных и бетонных растворов, в том числе и при производстве электронабивных свай.

4. Обработка электрическими разрядами цементных растворов с водоцементным соотношением, равным 0,5, увеличивает прочность цементного камня на сжатие на 50 % по сравнению с контрольными образцами. Применение схемы с протеканием зарядного тока обеспечивало достижения максимального значения прочности.

5. Показано, что в процессе изготовления электронабивных свай возможно использование как лежалых цементов, так и частично гидратированных цементов. Использование последних требует, кроме обработки электрическими разрядами, добавления нормального цемента в объемном количестве 1:1.

6. Предложена методика оценки увеличения диаметра сваи при обработке ее электрическими импульсными разрядами с заданными параметрами генератора импульсов и известными характеристиками грунта. Представлена расчетная схема процесса, учитывающая воздействие ударных волн и давления от расширения парогазовой полости на формирование электронабивной сваи и окружающий грунт.

7. Экспериментально подтверждена возможность снижения энергии единичного импульса в 5 – 10 раз по сравнению с ранее используемыми

установками при создании электронабивных свай в скважинах глубиной 5 – 10 м в плотных песчаных грунтах, при этом характеристики свай не ухудшаются.

8. Экспериментально показана принципиальная возможность формирования свай в маловлажных грунтах при добавлении водоудерживающих присадок в бетонный раствор, например метилцеллюлозы с содержанием не менее 0,02 % от массы раствора.

9. На основе результатов экспериментов по формированию свай электрическими разрядами показано, что использование электрогидравлической технологии приводит к существенному изменению физико-механических свойства грунта вокруг свай, повышению его плотности, уменьшению влажности, увеличению угла внутреннего трения, что в совокупности приводит к повышению несущей способности свай и грунта.

Автор глубоко благодарен научному руководителю, профессору, д.т.н. Курцу В.И., под руководством которого была выполнена эта работа, сотрудникам лаб. № 5 НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете - к.т.н. Филатову Г.П., к.т.н. Таракановскому Э.Н., к.х.н. Лобановой Г.Л., к.т.н. Жучкову А.И., инженеру Голопольской О.П. за постоянную помощь в работе и обсуждении ее результатов.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

1. Курец В.И., Филатов Г.П., Юшков А.Ю. Разработка электроразрядной технологии и аппаратуры для производства набивных свай и анкеров // Тезисы докладов НПК «Наука, инновации, подготовка кадров в строительстве» – Москва, 5–6.12.2002 г. – М.: МГСУ, 2002. – С. 82–85.

2. Филатов Г.П., Юшков А.Ю. Активация цементных растворов электрическими разрядами // Материалы докладов 8 Всероссийской НТК «Энергетика: экология, надежность, безопасность» – Томск, 04–06.12.2002–Томск: ТПУ. – т. 1. – С. 82.

3. Курец В.И., Филатов Г.П., Юшков А.Ю. Энергетические потери в предпробойной стадии развития разряда в высоковольтных электрогидравлических установках // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Состояния и перспективы развития электротехнологии». Иваново. 2003. – С. 3.

4. Курец В.И., Лобанова Г.Л., Филатов Г.П., Юшков А.Ю. Активация цементных растворов электрическими разрядами // Электронная обработка материалов. – 2003. – № 1. – С. 76–80.

5. Kuretz V.I., Filatov G.P., Yushkov A.Y. Energy losses in the pre-breakdown stage of discharge evolution in high-voltage hydraulic systems // The 7th Korea-Russia international symposium on Science and Technology. Korea. Ulsan. 2003. p. 59–63.

6. Курец В.И., Филатов Г.П., Жучков А.И., Юшков А.Ю. Расчет потерь энергии при пробое проводящих сред // Электронная обработка материалов. – 2003. – № 6. – С. 37–43.
7. Патент РФ № 2228316. Способ обработки цементных растворов / Филатов Г.П., Юшков А.Ю.
8. Курец В.И., Филатов Г.П., Юшков А.Ю. Влияние методов инициирования импульсного разряда на вероятность пробоя жидких проводящих сред // Электронная обработка материалов. – 2004. – № 1. – С. 54–57.
9. Курец В.И., Филатов Г.П., Юшков А.Ю. Потери энергии при электрическом импульсном пробое водоцементных смесей // Электронная обработка материалов. – 2004. – № 2. – С. 39–40
10. Kuretz V.I., Filatov G.P., Yushkov A.Y. Investigation of high voltage discharge in service water // The 8th Korea-Russia international symposium on Science and Technology Russia, Tomsk, 2004. p. 59–63.
11. Kuretz V.I., Filatov G.P., Yushkov A.Y. Initiation of electric discharge in high-conducting mediums // 13th International Symposium on High Current Electronics Technology Russia, Tomsk, 2004. p. 427–430.