

8УДК 624.15

**Тер-Мартгирисян З.Г.**, доктор технических наук, профессор, зав. каф. МГрОиФ (Московский Государственный Строительный Университет),

**Еремин В.Я.**, кандидат технических наук, «РИТА» (Разрядно-Импульсные Технологии и Аппараты),

**Буданов А.А.**, аспирант, ст. преподаватель (Московский Государственный Строительный Университет)

## ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ГРУНТА ПОД НИЖНИМ КОНЦОМ ВИСЯЧИХ СВАЙ-РИТ

*В основу обосновываемой методики положена модель создания под нижним концом буровой сваи напряженно-деформированного состояния грунта, как под забивной.*

*Устраняется более чем 2-х кратное недоиспользование несущей способности, обеспечивается необходимая сходимость с результатами натурных испытаний.*

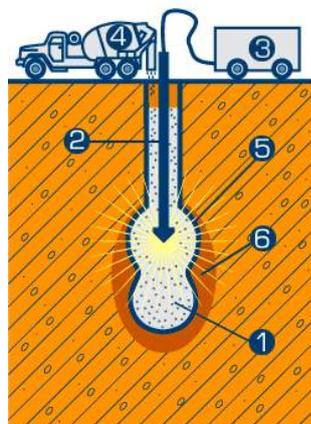
Рыночные условия жестко требуют минимизировать затраты на устройство оснований и фундаментов, одновременно обеспечивая их высокую надежность. Эффективными направлениями решения этой задачи являются:

- внедрение в практику строительства новых видов свай, позволяющих максимально использовать возможности грунтового основания;

- совершенствование методов расчета.

С 1990 года в геотехническом строительстве применяют новый вид буронабивных свай высокой несущей способностью (НС) по грунту – сваи-РИТ (рис. 1). При их изготовлении используют *разрядно-импульсные технологии (РИТ)* для динамического уплотнения около свайного грунта путем

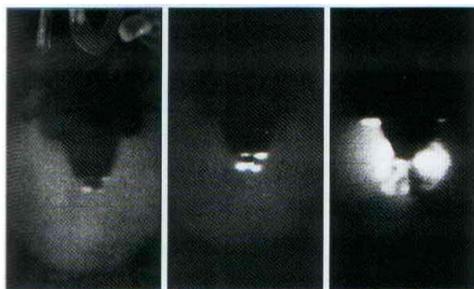
осуществления электрических разрядов энергией до 60 кДж. Для чего, на электроды, погруженные в скважину, заполненную подвижной бетонной смесью, периодически подают импульсы тока высокого напряжения. При достижении в межэлектродном промежутке критической плотности энергии (см. рис. 2, где приведены отдельные кадры предпробойной стадии развития электрического разряда в воде), электрическая прочность бетонной смеси не выдерживает и происходит ее пробой - электрический разряд или - *электровзрыв (ЭВ)*. Запасенная в накопителях электрическая энергия взрывообразно преобразуется в другие ее виды. В момент пробоя бетонной смеси зарождается ударная волна, а на месте разряда образуется быстро расширяющаяся *камуфлетная полость (КП)*. Приведенная в движение бетонная смесь передает импульс давления в грунт. За счет пластических деформаций и уплотнения грунта в локальной зоне под действием импульса, увеличивается диаметр скважины и соответственно поперечное сечение формируемой сваи (рис. 3). Давление в расширяющейся КП быстро падает, снижаясь значительно



**Рис.1**

*Сущность разрядно-импульсной технологии*

- 1 - ствол сваи после обработки;
- 2 - штанга с электродной системой (излучатель энергии);
- 3 - разрядная станция - ГИТ;
- 4 - бетононасос;
- 5 - зона цементации грунта;
- 6 - зона уплотнения грунта.



**Рис. 2**

*через 16мкс; через 96мкс; через 300мкс*

ниже гидростатического, и полость схлопывается, заполняясь бетонной смесью под действием сил гравитации.

Взрывообразное протекание процесса преобразования энергии, с формированием ударных волн и развитием КП, указывает на определенное сходство процесса протекания ЭВ и камуфлетного взрыва заряда химического взрывчатого вещества (ВВ).



**Рис. 3**

*Характерные уширения свай-РИТ, а) - в глинистом, б) - в) - в песчаном грунтах.*

Опыт изготовления свай с *камуфлетным уширением (КУ)*, формируемым взрывом заряда ВВ, показал, что повторить взрыв ВВ в скважине, заполненной бетонной смесью весьма сложно, поэтому при устройстве таких свай [1, 2] используют заряды большой массой (рис. 4) [3]. В [4] на графике (рис. 17) приведена минимальная масса камуфлетного заряда 0,2 кг. Сложилось мнение, что применение зарядов ВВ небольшой массы в геотехнике малоэффективно и не оправдывает дополнительных затрат. Однако при использовании мощных зарядов помимо проблем транспортирования, хранения, применения ВВ и ликвидации возможных отказов, возникает проблема сейсмического воздействия.



**Рис. 4**

*Опускание заряда ВВ в лидирующую скважину*

Экспериментально и теоретически обосновано [5], а на практике убедительно доказано, что КУ относительно больших размеров, достаточных для увеличения в 2...4 раза НС буровых свай диаметром до 400 мм, можно получать, осуществляя серию щадящих ЭВ. Создание КУ у свай-РИТ, происходит, за счет накопления пластических деформаций грунтом, окружающим источник возмущений. Учитывая изложенное, не целесообразно запасать более 60 кДж электрической энергии для одного ЭВ. Трогильовый эквивалент ЭВ-ного преобразования такой энергии соответствует 7,2 г (вычислено по данным [6] при ЭВ в замкнутой камере).

После осуществления серий ЭВ на заданных уровнях *разрядно-импульсной обработки (РИО)*, ствол свай-РИТ приобретает "гантелеобразную" форму (см. рис. 5).

За период с 1992 года в Москве изготовлено более шестидесяти тысяч свай-РИТ в различных инженерно-геологических условиях. Около 500 свай было подвергнуто испытаниям по [7], которые показали, что свай-РИТ буровым диаметром 180 мм практически в любых грунтах имеют НС по грунту превышающую 50 т, НС свай-РИТ  $d = 250$  мм достигает 100 т,  $d = 300$  мм – 150 т и более! Осадки свай-РИТ при испытаниях расчетными нагрузками не превышают допустимых величин, имея при этом значительный резерв



**Рис. 5**

*Первая выкопанная в Корее свай-РИТ имеет ярко выраженную "гантелеобразную" форму.*

НС по грунту, а остаточные деформации измеряются первыми миллиметрами, что свидетельствует о работе системы свай-РИТ – грунт в стадии упругих деформаций [8]. НС свай-РИТ, установленная при испытаниях вдавливающей нагрузкой, в 2-4 раза превышает НС, рассчитанную по [9], в 2...2,5 раза определенную по [10]. НС свай-РИТ, вычисленная по [11], изданном в 2003 г., часто так же имеет более чем двух кратный запас. В таблице 1 приведены некоторые данные об испытаниях свай-РИТ вдавливающей нагрузкой.

*Данные по испытаниям свай-РИТ вдавливающей нагрузкой* **Табл. 1**

№ п/п	Объект	Характеристика свай	Грунтовые условия	Расчетная несущая способность, т	Нагрузка на свай-РИТ при испытании, т	Осадка свай-РИТ под нагрузкой, мм	Превышение несущей способн., раз
1	ул. Гришина, д.23, стр.7, свайное основание под сооружением ГО для 17-этажного дома	d=250мм, L=15м	Пески пыл. ср. пл., водонас., пески м. пыл., водонас.	85	102	5,2	1,2
				85	102	2,3	1,2
				85	130,5	8,3	1,54
2	Рубцовская наб. вл.3, свайное основание 3-х этажного гаража-стоянки	d=180мм, L=13м	Сугл. текучепл. заторфов., разруш. Известняк	37,5	45	4,8	1,2
				37,5	45	6,1	1,2
				37,5	45	7,9	1,68
3	Б. Знаменский пер., д.23, свайный ф-нт 10-ти эт. корпуса, 1-го дома МО РФ	d=250мм, L=15,2м	Пески м., ср. пл., сугл. текучепл.	92	120	6,4	1,3
				92	120	8,4	1,3
				92	120	12,45	1,3
4	ул. Остоженка, вл. 35, свайное основание	d=250мм, L=11,5м	Пески мелкие ср. плотн., песок ср. кр.,	90	110	6,8	1,2
				90	120	7,2	1,33
5	Соймоновский пер., вл.7, стр.2, свайн. Основание гаража	d=250мм, L=7м	Песок рыхлый, ср. кр., песок ср. кр. ср. плотн.	50	60	3,05	1,2
				50	60	4,98	1,2
6	Арбат, д.1, вестибюль второго выхода станции м. "Арбатская"	d=250мм, L=8м	Суглинки плотные оторфованные, глина	75	90	8,39	1,2
				75	90	7,79	1,2
7	Богородский вал, вл.8, свайное основание пристройки	d=250мм, L=12,2м	Пески м., ср. плотн., водонас., сугл. тугопл.	92	110	7,68	1,19
				92	110	9,58	1,19
8	Митино, мкр. 8Б, к.2, сек.1, опытная площ. испыт. свай-РИТ	d=300мм, L=19м	12м насыль, торф, далее пески ср. кр., водонас.	70	240	17,3	3,42
				80	270	32,04	3,38
9	Митино, мкр. 8Б, к.2, сек.2, фундамент жилого дома	d=300мм, L=10м,	Пески м., ср. кр., пл., в забое водонас.	80	100	4,14	1,25
				80	100	4,39	1,25
10	Врачебный пр-д, вл.8, свайное основ. 17-эт. жилого дома	d=250мм, L=11,2м	Сугл. тугопл., пески ср. кр., плот., водонас.	60	72	3,32	1,2
				60	115	10,9	1,92
11	ул. Новослободская, вл.16-18, свайное основание 3-й очереди ТКЦ им.Мейерхольда	d=250мм, L=10м, L=12,5м	Сугл, песок м. пыл., песок ср. кр.	110	132	13,12	1,2
				110	132	14,63	1,2
12	ул. Обручева, д.27, усиление фундамента	d=250мм, L=19м	Пески м. пл., водонас., гл. тугопл.	100,8	121	10,24	1,2
13	Пр-т Вернадского, д.37, свайное основание 19-этажного корпуса	d=300мм, L=18м	Техногенные грунты, суглинки, пески ср. кр., водонас.	150	180*	15,11	1,2
				150	180	8,93	1,2
				150	234**	18,46	1,56
14	Пр-т Вернадского, д.37, свайное основание 30-этажного корпуса высотой 120м	d=300мм, L=21м	Техногенные грунты, сугл, песок ср. кр., водонас.	137	216	13,52	1,58
				137	216	17,05	1,58
				137	216	18,46	1,58
15	Колбитц, Германия. Опытная площадка	d=300мм, L=8м, d=300мм L=13м	Пески мелкие средней плотности	-	120***	9,90	-
				-	140***	10,40	-
				-	165***	7,00	-
				-	175***	8,50	-
16	ул. Давыдовская вл. 19-19а, свайное основание 24 этажного жилого комплекса	d=300мм L=20м	Песок ср. кр, водонас., суглинок полутв. супесь пласт .	150	198	14,34	1,32
17	МО г. Пушкино, ул. Институтская, 24-х этажный жилой комплекс.	d=300мм L=13м L=12м	Песок кр., ср. кр. и м., рыхл. и ср. плотн., суглинок тугопл.	120	144	19,53	1,2
					144	11,17	1,2
					160	13,84	1,33

\* испытания вдавливающей нагрузкой 180т проводились через 15 дней после бетонирования свай, твердение бетона в грунте проходило при температуре +8<sup>0</sup>С;

\*\* при контрольной нагрузке 180т свая-РИТ дала осадку 10,71мм;

\*\*\* испытания проводились в соответствии с требованиями, действующих в Германии рекомендаций DGEG.

При превышении расчетной нагрузки на требуемый коэффициент надежности, дальнейшие нагружения, как правило, останавливались заказчиками. Осадка же испытываемых свай-РИТ была далека до предельной, что свидетельствует о высокой реальной НС свай-РИТ по грунту.

Для осуществления приоритетного национального проекта “Доступное и комфортное жилье – гражданам России”, столь высокое недоиспользование НС свай - недопустимо.

Существенное различие между реальной и расчетной НС свай-РИТ можно было бы устранить оставаясь в рамках известной методики расчета НС свай по

грунту, путем введения многократно увеличенных значений коэффициентов условий работы грунта, как например сделано в [12] для расчета НС свай ЭРСТ и Л-38 под их нижним концом, без объяснения физического смысла такого решения [13].

Более логично, создать модель изменения *напряженно-деформированного состояния* (НДС) грунта под нижним концом сваи-РИТ в процессе РИО. С учетом этой модели, разработать уточненную инженерную методику расчета НС.

Целесообразно, чтобы новая методика расчета позволяла использовать накопленный опыт, а так же проверенную практикой существующую нормативную базу. В основе расчета НС свай лежит общепризнанный принцип, что висячая свая передает вдавливающую нагрузку основанию боковой поверхностью и нижним концом. НС висячей сваи определяется в Российских нормах по формулам имеющим следующий вид [9, 11]

$$F_d = \gamma_c \left( \gamma_{cR} RA + u \sum \gamma_{cf} f_i h_i \right) \quad (1).$$

Не останавливаясь на анализе других методик (в том числе зарубежных), скажем, что по своей сущности они аналогичны методике изложенной в [9, 11].

Рассмотрим первое слагаемое в формуле (1), существенно влияющее на НС сваи-РИТ в целом.

Новизна идеи расчета НС грунта под нижним концом сваи-РИТ в анализируемой методике расчета заключается в преобразовании известной модели НДС грунта, принятой под нижним концом буровой сваи, в известную модель НДС грунта, принятую под нижним концом забивной сваи.

Установлено, что при погружении забивной сваи под ее нижним концом формируется *зона уплотнения* (ЗУ), достигающая по некоторым исследованиям [14] *2 диаметров сваи*, по другим – *3...4* [15]. НДС грунта, создаваемое в основании забиваемой сваи, в конечном итоге, определяет расчетное сопротивление грунта  $R$  под ее нижним концом. При погружении забивной сваи, грунт под нижним концом уплотняется, вытесняется сваей в стороны и вверх, происходят внутренний выпор – необратимые пластические деформации. Природное геостатическое НДС массива, в который погружается свая, под влиянием геодинамических напряжений преобразуется в новое НДС.

НДС массива вокруг погружаемой в грунт сваи детально исследовано и подробно изложено в [16].

При бурении скважины для устройства буровой сваи, природное НДС грунта изменяется, но иным образом. Со стороны забоя скважины снимается вертикальная составляющая бытового давления вышележащих слоев грунта. В результате односторонней разгрузки, несмотря на относительно небольшие размеры сечения скважины, происходит изменение НДС грунта и его разуплотнение в основании скважины. После заполнения скважины бетонной смесью с объемной массой большей, чем у грунта, разуплотнение основания приостанавливается. Однако давлением столба бетонной смеси, вернуть грунт в исходное НДС невозможно. Если целенаправленно изменять НДС массива под нижним концом сваи, с целью улучшения строительных свойств грунта, можно увеличить несущую способность буровой сваи.

Наиболее легко можно управлять изменением НДС грунта в основании сваи за счет его уплотнения, например, используя технологию "песконасос" [17] или путем втрамбовывания в грунт щебня, тощего бетона, или устройства КУ, с одновременным заполнением их бетоном, или РИО бетонной смеси в основании буровых свай. При достаточно тщательной РИО в забое скважины можно грунт под нижним концом буровой сваи уплотнить и изменить вид НДС массива в зоне, прилегающей к нижнему концу сваи-РИТ. В локальной зоне влияния ЭВ происходит поворот главных осей эллипсоида напряжений. Для вычисления остаточных напряжений, вызванных пластическими деформациями в [16] предложено на ветви нагружения НДС массива определять по нелинейному деформированию, а на ветви разгрузки –

по линейному деформированию, полагая, что модули деформации при нагрузке и разгрузке разные,  $E_r \geq E_n$ . Если принять закон формирования по нелинейному уравнению  $\tau = \tau_o \cdot \gamma^{n/2}$ , а закон объемного изменения по линейному уравнению  $\sigma = k \cdot \varepsilon$ , то в условиях компрессионного сжатия зависимость между нагрузкой  $\sigma = p$  и реактивными напряжениями на контакте бетонная смесь грунт скважины  $\sigma_2 = \sigma_3$

$$\text{можно выразить в виде } \sigma_2' = \sigma_3' = \frac{k \cdot (\alpha \cdot \sigma_1')^{\frac{2-n}{n}} - 2 \cdot \tau_o^{\frac{2}{n}}}{k \cdot (\alpha \cdot \sigma_1')^{\frac{2-n}{n}} + 4\tau_o^{\frac{2}{n}}}, \text{ где } \alpha = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1-2\nu}{1-\nu}.$$

В результате управляемой РИО грунта в основании сваи-РИТ можно создать НДС около свайного массива, аналогичное состоянию грунта в основании забивной сваи. Тогда для расчета НДС сваи-РИТ по грунту под ее нижним концом, можно использовать известные таблицы с расчетными значениями сопротивления грунта под нижним концом забивной сваи ( $R$ ).

Решить проблему расчета НДС свай, при устройстве которых применяются ЭВ, пытались многие исследователи. Но для того чтобы управлять изменением НДС грунта нужно установить закономерности изменения физико-механических характеристик грунта в основании сваи при комплексном электродинамическом и акустическом воздействии, обнаружить факторы и установить законы позволяющие управлять преобразованием электрической энергии в другие ее виды при пробое разрядного промежутка, заполненного бетонной смесью разного состава, содержащей различные добавки, а также влияния множества других факторов.

В настоящее время эту задачу решить весьма сложно.

Для расчета НДС свай, изготовленных с помощью электрических разрядов, пытались [18] в расчетах перейти от ЭВ к взрыву ВВ, чтобы использовать опыт, накопленный в практике взрывного дела. Во взрывном деле, для определения размера КП и ЗУ грунта вокруг нее, используют начальные параметры заряда (радиус заряда, масса ВВ, плотность заряжания, количество выделяемой энергии, давление на фронте ударной волны, теплота взрыва, работоспособность, объем продуктов детонации, брызгантность и т.п.). Наиболее часто в расчетах используют массу заряда  $Q$  в тротиловом эквиваленте. Радиус КП определяют согласно [19] по формуле

$$R_{kp} = (0,1 - 0,5) \sqrt[3]{Q}, \quad (2)$$

остаточные деформации распространяются в зоне радиусом

$$R_{zur} = (1,5 - 2,0) \sqrt[3]{Q}, \quad (3)$$

При переходе к ЭВ, проблемы начинаются с того, что у ЭВ нет массы заряда, практически отсутствуют продукты взрыва и т.д. В некотором приближении ЭВ можно считать "безмассовым". Поэтому многие исследователи пытались представить электрическую энергию неким эквивалентным количеством ВВ, параметры которого зависят от величины максимального давления на фронте волны и/или от радиуса эквивалентного заряда ВВ.

Несмотря на сходство общего характера волновых картин (в связи с непостоянством амплитуд импульсных давлений), установить четкое количественное соотношение между взрывом ВВ и ЭВ не удалось. Экспериментально обнаружены [18] существенные отличия ЭВ и взрыва ВВ. Приведение энергии электрических разрядов к энергии взрыва ВВ сопровождается ошибкой, достигающей 30...35% [20], поэтому прямой переход к использованию накопленного опыта применения ВВ некорректен.

Пенни и Тейлор, используя принципы законов геометрического подобия, установили [21] соотношения между радиусом заряда ВВ, радиусом КП и радиусом ЗУ грунта вокруг КП, величины которых зависят только от характеристик грунта и не зависят от масштаба взрыва, массы заряда и глубины его размещения. На основе этих

принципов была разработана теория расчета размеров создаваемых КП. Согласно этой теории, для каждого вида грунта радиус КП всегда составляет  $n$  радиусов заряда ВВ, а радиус ЗУ грунта вокруг КП всегда составляет  $m$  радиусов заряда.

Отсюда следует, что размеры ЗУ пропорциональны размерам КП.

Учитывая, что у ЭВ, в отличие от взрыва ВВ, отсутствуют масса и радиус заряда, для вычисления радиуса ЗУ грунта, по формулам, применяемым в расчетах для взрывов химических ВВ, можно воспользоваться второй частью зависимости. Другими словами, зная объем КП, образованной взрывом или серией ЭВ, по известным формулам определяем радиус полости, а затем, пользуясь законами геометрического подобия, находим радиус ЗУ.

Если (3) разделить на (2), то после сокращения получим, что радиус зоны ЗУ  $R_{зир}$  в 4...15 раз больше радиуса КП  $R_{кр}$ . В.К.Пивоваров, проводя эксперименты с камуфлетными взрывами ВВ, инструментально зафиксировал [1] уплотнение дисперсных грунтов вокруг КП на расстоянии 3,0...3,5 ее радиуса. Образующиеся ЗУ имели форму полуэллипсов, (эксперименты выполнялись на глубине 2,5 м, поэтому на форме КП и ЗУ сказывалось влияние свободной поверхности). Было подтверждено [2], что ЗУ грунта вокруг центра взрыва не зависит от его масштаба, а показатель простреливаемости не зависит от глубины и веса заряда, являясь функцией физико-механических свойств конкретных грунтов [22].

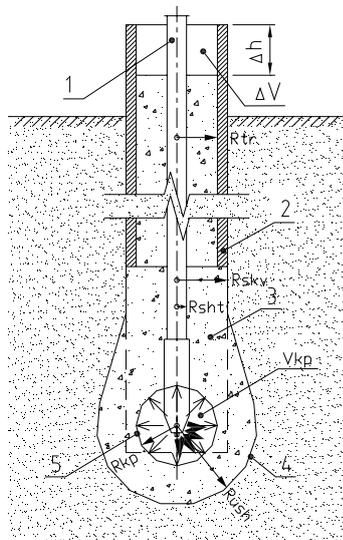
В нашем случае, прямо воспользоваться законом геометрического подобия (например, используя радиус КП, образуемой единичным ЭВ) было бы неверно, т.к. объемы КП, образующихся при каждом ЭВ, не одинаковы. Для сопоставления размеров прогнозируемых уширений свай-РИТ и формируемых ЗУ грунта в результате серии ЭВ, необходимо было выявить универсальную "единицу измерения", позволяющую сопоставлять и анализировать результаты воздействия последовательных ЭВ, независимо от запасаемой энергии, напряжения, емкости накопителей, индуктивности контура, количества ЭВ, частоты их следования, величины разрядного промежутка, состава и свойств бетонной смеси и других факторов.

КП, создаваемые каждым ЭВ, заполняются бетонной смесью, что фактически наблюдается по ее осадке в устье скважины. Так как, КУ формируют серией из  $N$  ЭВ дискретно по времени, с интервалами в несколько секунд между ЭВ, можно точно измерить и вычислить объем бетона, израсходованного на заполнение каждой, единичной КП, а также суммируя эти объемы, не сложно вычислить или замерить объем, назовем ее "условной", камуфлетной полости (УКП). Таким образом, определяя общий расход бетона за  $N$  ЭВ, можно вычислить объем УКП, формируемой в основании сваи. В принципе, КП такого же размера (равного УКП) можно было бы получить в результате одного мощного взрыва. Во всех случаях объем УКП после  $N$  взрывов будет равен объему бетонной смеси, заполнившей  $N$  схлопывающихся единичных КП. Наиболее достоверно объем бетонной смеси, израсходованной на заполнение  $N$  КП, определяется по ее осадке в устье скважины.

Поиск оптимального критерия для сопоставления результатов прогнозируемых КУ свай-РИТ и образующихся ЗУ, привел к тому, что на основе закона геометрического подобия, в качестве единицы измерения было предложено использовать радиус ( $R_{ukp}^{1...N}$ ) условно образуемой на данный момент КП (т.е. радиусом УКП). Этот радиус в результате каждого  $i$ -го ЭВ увеличивается на величину  $\Delta(R_{ukp}^{1...N})$ , монотонно уменьшающуюся с каждым очередным ЭВ и в итоге стремящуюся к 0. В дальнейшем мы будем оперировать радиусом УКП, при формировании которой в прилегающем массиве грунта создается НДС, соответствующее НДС под погруженной на эту же величину забивной свайей. В этом случае действительно, не имеют принципиального значения масса или радиус эквивалентного заряда ВВ, энергия ЭВ и их количество. Важно знать радиус УКП и

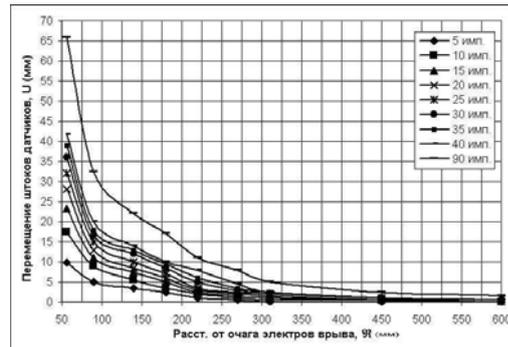
коэффициент пропорциональности (для данного вида грунта), чтобы определить размер ЗУ простым умножением.

Для проверки высказанной гипотезы, при соблюдении названных выше условий, были выполнены экспериментальные исследования с маловлажным и влажным песчаным грунтом в лотке диаметром 2 м с энергиями в накопителях от 3,6 до 21,7 кДж [23], а также при изготовлении натуральных свай-РИТ. За счет роста КУ, в абсолютных единицах (мм) было зафиксировано увеличение ЗУ с ростом числа ЭВ. При этом, ранее абсолютно несопоставимые размеры границ ЗУ в различных экспериментах, а так же при рассмотрении различного количества ЭВ, при использовании универсальной единицы измерения ( $R_{ukp}^{1...N}$ ) приобрели значения, полностью отвечающие закону геометрического подобия.

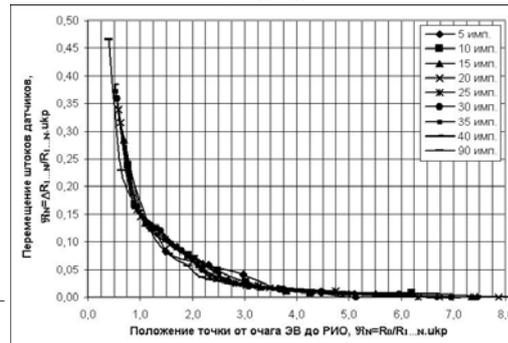


**Рис. 6**

1 - штанга с электродами; 2 - извлекаемая обсадная труба; 3 - мелкозернистая бетонная смесь В25, подвижностью П-5; 4 - граница уширения сваи; 5 - граница камуфлетной полости.



**Рис. 7а**



**Рис. 7б**

На [рис.6](#) приведена схема образования КП и КУ модельной сваи-РИТ; на [рис.7а](#) - графики увеличения радиуса КУ и накопления радиальных пластических деформаций песка в абсолютных величинах от числа произведенных импульсов в зависимости от их положения до очага ЭВ; на [рис.7б](#) - то же, выраженные в переменных радиусах УКП. Сравнивая графики [рис.7а](#) и [7б](#), становится понятен смысл использования переменных радиусов УКП для иллюстрации перемещений грунта. Рассеянное семейство кривых ([рис.7а](#)) на [рис.7б](#) сливается! Универсальная единица измерения (радиус УКП фактически вычисляемый после N ЭВ) позволила анализировать и сопоставлять размеры УКП и ЗУ сформированных в результате различного числа ЭВ разной энергии в однотипных грунтах.

Во всех опытах, было установлено, что явно выраженная ЗУ влажных песков превышает 3,5 диаметра УКП ( $3,5R_{ukp}^{1...N}$ ), что подтверждает аналогию действия серии ЭВ и камуфлетных взрывов зарядов химических ВВ, где (как оговаривалось выше) размеры ЗУ в дисперсных грунтах составляют  $(3,0...3,5)R_{kp}$  [1, 2].

Теперь рассмотрим обратную задачу.

1. Зададимся размерами ЗУ под нижним концом сваи-РИТ, в которой видоизменяется НДС, прилегающего массива грунта, в результате РИО, до состояния подобного НДС под нижним концом погруженной забивной сваи в этом же грунте.

Диаметр ЗУ в основании забивной сваи составляет

$$D_{zuZC} = (2...2,5) d_{ZC} \quad (4).$$

Допускаем, что диаметры забивной сваи и буровой скважины равны  $d_{ZC} = d_{BC}$ .

2. Зная  $D_{zuZC}$ , и помня, что при взрыве ВВ грунт уплотняется в зоне диаметром  $D_{zuVV} = (3...3,5)D_{kpVV}$ , а в результате серии ЭВ образуется УКП, вокруг которой грунт уплотняется в зоне диаметром  $D_{zuEV} = (3...3,5)D_{ukpEV}$ , необходимо серией ЭВ создать в грунте ЗУ эквивалентную ЗУ грунта под нижним концом сваи, условно забитой в этот же грунт

$$D_{zuZC} = D_{zuVV} = D_{zuEV} \quad (5).$$

Подставляя известные значения в (5), не сложно вычислить диаметр и объем УКП, которую необходимо создать серией ЭВ в основании висячей сваи-РИТ. Диаметр этой УКП

$$D_{ukpEV} = (0,67...0,71) d_{ZC} \quad (6).$$

Допуская, что УКП имеет форму шара, ее объем составит

$$V_{ukp} = \frac{1}{6} \pi D_{ukpEV}^3 = (0,05...0,06) \pi d_{ZC}^3 \quad (7).$$

3. При заполнении УКП бетонной смесью ее уровень в устье скважины понижается на величину  $\Delta h$ , объем которой составит  $V_{b\Delta h} = \frac{\pi d_{BC}^2}{4} \Delta h$  (8),

Так как на заполнение УКП потребовался объем бетонной смеси в устье скважины  $V_{b\Delta h}$ , то

$$V_{ukp} = V_{b\Delta h} \quad (9).$$

Помня, что  $d_{ZC} = d_{BC}$  (см.п.1), после подстановки в (9) значений (7) и (8) и сокращения, получим один из основных параметров РИО основания сваи-РИТ, а именно величину осадки бетонной смеси в устье скважины  $\Delta h = (0,2...0,24) d_{BC}$ , который при производстве работ контролируется так же легко, как отказ у забивных свай.

Решив обратную задачу, можно в практических расчетах НС грунта под нижним концом висячих свай-РИТ использовать таблицы с расчетными сопротивлениями грунта  $R$  приведенными для забивных свай.

### **Выводы:**

1. Высокая несущая способность свай-РИТ обеспечивается в определенной степени несущей способностью грунта под ее нижним концом, что является следствием видоизменения напряженно-деформированного состояния прилегающего массива грунта до напряженно-деформированного состояния, образующегося под нижним концом погружаемой забивной сваи.

2. Радиус зоны уплотнения, создаваемой несколькими электровзрывами, пропорционален радиусу условной камуфлетной полости, объем которой равен сумме объемов камуфлетных полостей, образующихся при каждом электровзрыве. Доказано, что независимо от параметров и количества электровзрывов соблюдается закон геометрического подобия в песчаном грунте.

3. Радиус зоны уплотнения во влажном песке составляет 3...3,5 радиуса условной камуфлетной полости, что подтверждает действие закона геометрического подобия при электровзрывах и взрывах камуфлетных зарядов ВВ в дисперсных грунтах.

4. Адекватные размеры зон изменения напряженно-деформированного состояния грунта в основании сваи-РИТ и забиваемой сваи, позволяет на стадии проектирования свай-РИТ, вычислять объем условной камуфлетной полости и задавать величину осадки бетонной смеси в устье скважины в процессе формирования КУ.

5. Обоснована методика расчета несущей способности грунта под нижним концом висячих свай-РИТ, как для забивных свай.

### Использованная литература:

1. Пивоваров В.К. Исследование уплотнения глинистых грунтов взрывом и его влияние на несущую способность набивных взрывных свай. Дис. К.т.н., -Киев: Киевский строительный институт, 1966, - 142 с.
2. Смирнов В.И., Голицинский Д.М., Мельников Л.Л. Строительство подземных сооружений с использованием камуфлетных взрывов. М.: Недра. 1981. - 215 с.
3. K. Haediecke Gründungen/Band II. Berlin, VEB Verlag für Bauwesen. 1970. - 335 s.
4. Grundbau-Taschenbuch, Teil 2: Geotechnische Verfahren. 6 Auflage. Herausgeber Ulrich Smolczyk. 2001. Berlin. – 860 s.
5. Еремин В.Я., Еремин А.В., Буданов А.А. Зона уплотнения грунта вокруг камуфлетного уширения сваи, полученной серией электровзрывов (к расчету свай-РИТ)./ Труды Международной научно-технической конференции (3-5 октября 2006 г. Уфа). Проблемы механики грунтов и фундаментостроения в сложных грунтовых условиях. Том 1. Уфа, 2006, с. 80-84.
6. Ясиевич Г.Н. Исследование способа изготовления буронабивных свай с помощью электрогидравлического эффекта и их работы под вертикальной нагрузкой: Дис. канд. техн. наук: - Л.: ЛИСИ, 1977. - 225с.
7. ГОСТ 5686-94. Грунты. Испытание сваями.
8. Тер-Мартirosян З.Г., Буданов А.А., Еремин В.Я. О повышении несущей способности свай, изготавливаемых по разрядно-импульсной технологии //Информационный научно-технический журнал Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2004. № 1(60). – с.60-62.
9. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты.
10. Рекомендации по применению буроинъекционных свай. М: изд.НИИОСП, 1997.
11. СП 50-102-2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов.
12. Рекомендации по применению буроинъекционных свай. М.: НИИОСП им. Н.М. Герсеева. 2001. – 115 с.
13. Еремин В.Я., Еремин А.В., Сарафанов Н.В., Буданов А.А. Некоторые проблемы качества буровых свай./ Труды Международной научно-технической конференции (3-5 октября 2006 г. Уфа). Проблемы механики грунтов и фундаментостроения в сложных грунтовых условиях. Том 1. Уфа, 2006, с. 85-96.
14. Бахолдин Б.В. Экспериментальные и теоретические исследования процесса взаимодействия грунта с забивными сваями и создание на их основе практических методов расчета свай. Диссерт. Д.т.н., М., ВНИИОСП, 1987. – 472 с.
15. Малышев М.В., Болдырев Г.Г. Механика грунтов. Основания и фундаменты. – М.: "АСВ", 2001. – 328 с.
16. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов/ Уч. пос. – М.: Изд-во АСВ, 2005. – 488с.
17. Крыжановский А.Л., Рубцов О.И. Вопросы надежности проектного решения фундаментных плит высотных зданий.// Научно-технический журнал «Вестник МГСУ». – 2006г. №1. – с. 191–198.
18. Шамко В.В. О тротиловом эквиваленте мощного подводного искрового разряда./ Электронная обработка материалов. 1972, № 5(47). с. 16-19.
19. Родионов В.Н., Кутузов Б.Н. Механический эффект подземного взрыва. М.: Недра, 1971.
20. Зельманов И.Л., Колков О.С., Тихомиров А.М., Шацкевич А.Ф. Влияние газообразующих веществ в очаге электровзрыва на движение слабосвязного грунта./ ДАН СССР, 1968, № 1, с. 90-93.
21. Чедвик П., Кокс А., Гопкинс Г. Механика глубинных подземных взрывов. –М.: Мир. 1966. – 127 с.
22. Глоба В.М. Буровзрывные работы при строительстве магистральных трубопроводов и подземных хранилищ. М.: Недра. 1984.- 239 с.
23. Еремин В.Я., Буданов А.А. Деформируемость песчаных грунтов при изготовлении свай по разрядно-импульсной технологии (РИТ).// Научно-технический журнал «Вестник МГСУ». – 2006г. №1. – с.150–164.