



*к.т.н. В.Я. Еремин      А.А. Буданов*

В.Я. Еремин, к.т.н. – технический директор «РИТА»;  
А.А. Буданов – аспирант кафедры МГрОиФ МГСУ

## **Деформируемость песчаных грунтов при изготовлении свай по разрядно-импульсной технологии (РИТ)**

*Многokратные импульсные воздействия - электровзрывы, осуществляемые при изготовлении свай-РИТ, увеличивают прочность и уменьшают деформируемость окружающего грунта, значительно повышая их несущую способность по грунту (до 150...200т). На основе экспериментальных данных проанализировано поведение несвязного грунта при изготовлении таких свай, приводятся графики и зависимости деформируемости и изменения плотности несвязных грунтов с расстоянием до источника возмущений и увеличением размера условной камуфлетной полости.*

Задача об увеличении *несущей способности* (НС) висячих свай по грунту весьма актуальна, особенно для буронабивных свай, у которых часто недоиспользуется НС по материалу ствола из-за недостаточной НС по грунту. Удачно решается эта задача путем создания по длине свай локальных уширений за счет уплотнения окружающего грунта.

В условиях плотной застройки применение массивных молотов и ВВ для уплотнения грунта ограничено динамическими воздействиями большой интенсивности. Достаточно высокая НС свай по грунту достигается за счет осуществления большого числа щадящих динамических воздействий малой единичной энергии, которые создаются при электрическом пробое бетонной смеси разрядом импульсного тока высокого напряжения – *электровзрывами* (ЭВ). *Технологию*, позволяющую создавать локальные уширения ствола свай за счет уплотнения окружающего грунта ЭВ, называют *разрядно-импульсной* (РИТ) [1]. РИТ, применительно к грунтам, характеризуется: высокой плотностью энергии, преобразуемой в локальной зоне; управляемостью процессом; воспроизводимостью; возможностью многократного воздействия в заданном месте по длине свай [2].

*Сваи*, изготовленные с применением РИТ (свай-РИТ) имеют высокую НС по грунту, часто достигающую НС по материалу. Так, сваи-РИТ буровым диаметром  $d=180\text{мм}$  имеют НС по грунту более 60т,  $d=250\text{мм}$  - 100т, а сваи  $d=300\text{мм}$  - до 150...200т! При испытаниях свай-РИТ по ГОСТ 5686-94 их осадки (при расчетных нагрузках) не превышают допустимых значений, имея при этом значительный резерв НС по грунту (табл.1) [3], а остаточные деформации измеряются первыми миллиметрами, что свидетельствует о работе системы сваи-РИТ-грунт в стадии упругих деформаций.

При явных достоинствах свай-РИТ, *напряженно-деформированное состояние* (НДС) окружающего грунта практически не исследовано. Для прогнозирования многократного механического действия ЭВ, необходимы данные о поведении грунта и изменении его основных характеристик. Для ответа на поставленные вопросы проведена серия экспериментов по изучению процесса изменения НДС песчаных грунтов, окружающих скважину, в режиме циклического воздействия ЭВ. Цель проводимых экспериментов – установить закономерности перемещения, уплотнения и изменения

напряженного состояния песчаного грунта с определенными физико-механическими характеристиками при различных расстояниях до источника возмущений в зависимости от энергии и количества ЭВ. В данной работе изложены результаты этих исследований в части, касающейся деформируемости песка.

Таблица 1

№ п/п	Объект	Характеристика свай	Грунтовые условия	Расч. НС, т	Нагр., т	Осадка под нагр., мм	Осадка после разгр., мм	Превышение НС., раз
1	Арбат, д.1, вестибюль второго выхода станции м. "Арбатская"	d=250мм, L=8м	Сугл. пл. оторфованные, глина	75	90	8,39	3,21	1,2
				75	90	7,79	2,5	1,2
2	Митино, мкр. 8Б, к.2, сек.2, фундамент жилого дома	d=300мм, L=10и11м	Пески м. и ср.кр., пл., в забое в/нас	80	100	4,14	0,9	1,25
				80	100	4,39	0,88	1,25
3	Митино, мкр. 8Б, к.2, сек.1, опытная площадка для испытаний	d=300мм, L=19м	Насыпь, торф, далее пески ср. кр., в/нас	70	240	17,3	6,42	3,42
				80	270	32,04	12,64	3,38
4	Б. Знаменский пер., д.23, свайный фундамент 10-ти этажного корпуса, 1-го дома МО РФ	d=250мм, L=15.2м	Пески м., ср.пл., сугл. текучепл.	92	120	6,4	1	1,3
				92	120	8,3	1,8	1,3
				92	120	8,4	1,7	1,3
5	ул. Гришина, д.23, стр.7, свайное основание над сооружением ГО	d=250мм, L=15м	Пески пыл. ср. пл., в/нас, пески м. и пыл., в/нас	85	102	5,2	2,8	1,2
				85	130,5	8,3	1,6	1,54
				85	102	7,3	1,3	1,2
6	Врачебный проезд, вл.8, свайное основание 25-эт. ж. дома	d=250мм, L=11.2м	Сугл. тугопл., пески ср. кр., пл., в/нас.	60	72	3,32	0,52	1,2
				60	115	10,9	2,8	1,92
7	Богородский вал, вл.8, свайное основание пристройки	d=250мм, L=12.2м	Пески м., ср. пл., в/нас., сугл. тугопл.	92	110	7,68	2,01	1,19
				92	110	9,58	2,25	1,19
8	Пр-т Вернадского, д.37, свайное основание 19-этажного корпуса	d=300мм, L=18м	Техног. гр., сугл., песок ср. кр., в/нас	150	180*	15,11	5,73	1,2
				150	180	8,93	1,88	1,2
				150	234**	18,46	5,47	1,56
9	ул. Остоженка, вл. 35, свайное основание	d=250мм, L=11.5м	Пески м. ср. пл., песок ср. кр., в/нас	90	110	6,8	2,1	1,2
				90	120	7,2	3,1	1,33
10	ул. Обручева, д.27, усил. фун-та	d=250мм, L=19м	Пески м. пл., в/нас., глина тугопл.	100,8	121	10,24	2,3	1,2
11	ул. Давыдовская вл. 19-19а, св. осн-ние 24 эт. жил. компл.	d=300мм, L=20м	Песок ср. кр., в/нас., сугл. п/тв., супесь пл	150	198	14,34	5,27	1,32

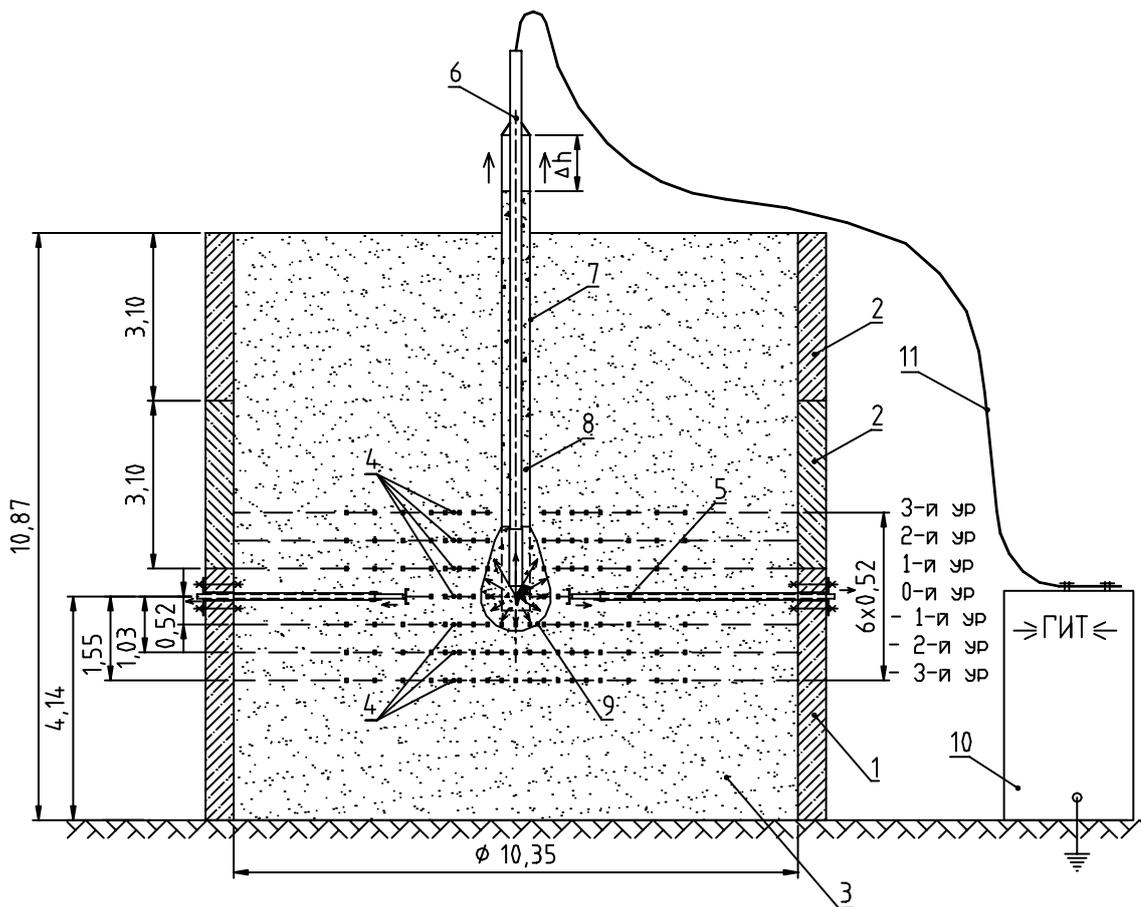
\* испытания вдавливающей нагрузкой 180 т проводились через 15 дней после бетонирования свай, твердение бетона в грунте, температура + 8°C;

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

Из ранних исследований [4] известно, что радиус влияния ЭВ в грунтах составляет около 0,5м, поэтому размеры лотка были взяты с двойным запасом, что позволило воспроизводить в лабораторных условиях силовые воздействия на грунт, отражающие его работу в натуральных условиях. В собранном виде лоток представлял собой конструкцию из трех установленных друг на друга массивных ж/б колец (рис.1), дооборудованных в соответствии с задачами экспериментальных исследований. Нижнее кольцо -1 - стационарное, верхние кольца -2 устанавливались краном по мере заполнения лотка песком. Большая жесткость используемых в опытах колец, а также массивность основания, определяли нулевое перемещение частиц песка на границе с лотком. Выбранные граничные условия краевой задачи, допускали возникновение значительных по размеру областей предельных состояний песка с развитыми пластическими деформациями и позволяли установить особенности процесса его уплотнения в различных точках объема. Исследовалось поведение рыхлого речного песка ( $e = 0,71 \dots 0,73$ ) средней крупности (зерновой состав приведен в табл.2.)

Таблица 2

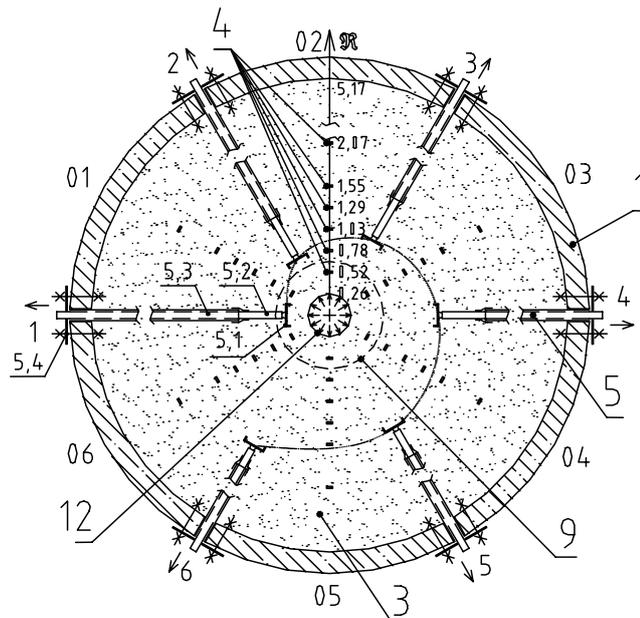
мм	>10	10-5	5-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	<0,1
%	0	0,9	4,6	14,5	23,2	40,9	15,4	0,5



**Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального лотка**

(здесь и далее, все расстояния, кроме оговоренных, приводятся в относительных радиусах УМКП, вычисленной при обработке результатов одного из опытов)

Условные обозначения: 1 - нижнее ж/б стационарное кольцо; 2 - съемное ж/б кольцо; 3 - исследуемый песок; 4 - система реперов; 5 - датчики, фиксирующие радиальное смещение грунта; 6 - штанга с электродами; 7 - извлекаемая обсадная труба внешним диаметром  $R=0,58$ ; 8 - мелкозернистая бетонная смесь В25, подвижностью П - 5; 9 - граница уширения сваи; 10 - генератор импульсных токов; 11 - коаксиальный кабель.



**Рис. 2. Схема расположения реперов и датчиков перемещений в горизонтальной плоскости (основной ур. №0) до РИО**

Условные обозначения: 1; 3; 4; 5; 9 - см. рис. 1; 5.1 - шайба; 5.2 - шток; 5.3 - полая трубка; 5.4 - крепежный элемент; 12 - граница скважины.

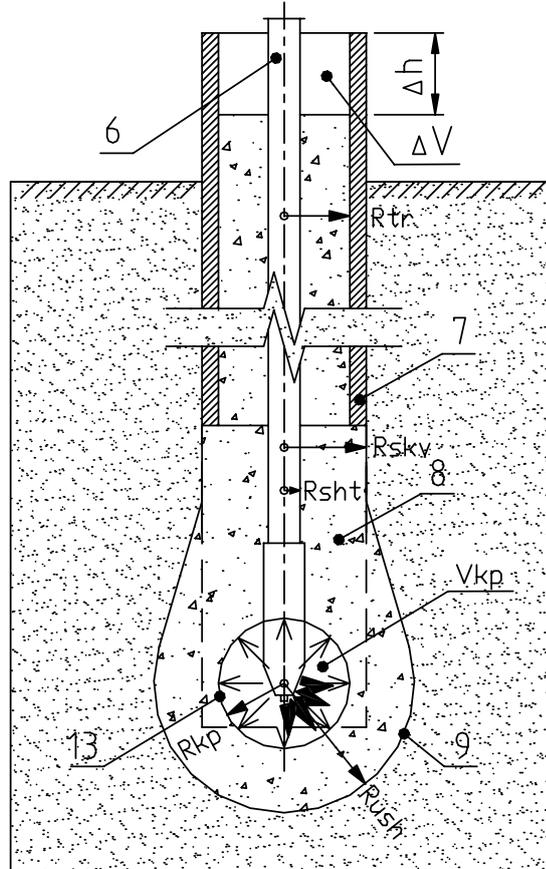
Песок в лоток укладывали слоями по 0,1м с уплотнением. На уровнях и расстояниях заданных планом эксперимента (рис.1) закладывали реперы. Их начальное положение фиксировалось в журнале. На рис.2 показана схема типового расположения системы реперов -4 в горизонтальной плоскости. В плоскости планируемой разрядно-импульсной *обработки* (РИО), в уровне №0, помимо реперов устанавливали датчики -5 радиальных перемещений грунта. Конструкция датчиков поясняется рис.2. Для получения скважины по центру лотка вертикально устанавливали обсадную трубу -7. После заполнения лотка песком в обсадную трубу подавали бетонную смесь подвижностью П-5 (ГОСТ 7473-94). Далее трубу извлекали из скважины на 30...35см, и в нее на глубину уровня №"0" погружали электродную систему, смонтированную на штанге -6. Электроды соединяли с *генератором импульсных токов* (ГИТ) - 10 коаксиальным кабелем -11.

В конденсаторных батареях ГИТ запасалась электрическая энергия до уровня запланированного в эксперименте (3,6; 10,8; 21,7 кДж), при достижении которого срабатывал коммутатор и накопленная энергия поступала на электроды, погруженные в бетонную смесь. С учетом неизбежных потерь (на индуктивность, за счет остаточного напряжения в конденсаторах и т.п.), на электроды соответственно поступало 2,4; 7,2; 14,5 кДж. В межэлектродном промежутке за первые микросекунды создавалась плотность энергии достигающая  $10^8$  кДж/м<sup>3</sup>, при которой диэлектрическая прочность бетонной смеси разрушалась и происходил пробой. По осциллограммам тока и напряжения предпробойные потери оценивались в 20% энергии поступившей на электроды. За доли миллисекунды запасенная в конденсаторах электрическая энергия, за минусом оговоренных потерь, преобразовывалась в другие ее виды. Образующаяся при этом ударная волна распространялась в бетонной смеси со скоростью звука, переходя в окружающий грунт, где ее энергия быстро рассеивалась, ударная волна вырождалась в волну сжатия. Внутри образовавшейся на месте разряда парогазовой полости некоторое время сохранялось высокое давление, за счет которого она расширялась, смещая в радиальных направлениях окружающую ее бетонную смесь. Начальные скорости расширения полости достигали 100м/с и более. Частицы бетонной смеси получившие импульс движения, оказывали давление на окружающий песок, который вместе с установленными в нем реперами смещался в радиальном направлении. Давление в парогазовой области при ее расширении быстро снижалось до уровня ниже гидростатического, полость схлопывалась, заполняясь порцией свежей бетонной смеси, осевшей вдоль скважины под действием сил гравитации. В результате деформаций грунта радиус сваи с каждым электровзрывом увеличивался. Фиксировались уровень бетона в обсадной трубе, которым заполнялась формируемая *камуфлетная полость* (КП) и перемещения штоков -5.2 датчиков -5 (рис.2). По окончании РИО электроды и обсадную трубу извлекали, а после набора бетоном прочности откапывали послойно реперы -4, фиксируя их изменившееся положение, брали и исследовали пробы грунта. Отклонения в величинах не превышали допустимых значений.

Известно, что при исследованиях размеров КП, зон уплотнения и остаточных деформаций в грунтах при камуфлетных взрывах зарядов ВВ, выбирают единицу измерения основываясь на теории подобия и размерностей [5]. Часто в качестве единицы измерения используют радиус заряда ВВ в тротиловом эквиваленте. Приведение энергии электрических разрядов к энергии взрыва ВВ сопровождается неизбежной ошибкой, достигающей 30-35% [6]. К тому же, при исследованиях камуфлетных взрывов на основе традиционных ВВ, как правило, производился единичный взрыв. Очень мало опубликовано данных исследований при осуществлении двух последовательных взрывов зарядов ВВ для формирования одной КП [7], а информации о действии более трех последовательных взрывов в одной полости к сожалению обнаружить не удалось. В проведенных нами исследованиях осуществлялось до 90 электровзрывов в центре формируемого камуфлетного уширения сваи. Это обстоятельство наложило определенную сложность в выборе универсальной единицы измерения удобной для

пользования, позволяющей сопоставлять и анализировать результаты исследований по воздействию последовательных ЭВ, отличающихся в эксперименте запасенной энергией, напряжением, емкостью накопителей, индуктивностью контура, количеством разрядов, величиной разрядного промежутка и другими факторами.

На основе закона геометрического подобия за единицу измерения можно принять радиус КП. При изготовлении свай-РИТ, создаваемые каждым ЭВ КП заполняются бетонной смесью. Так как ЭВ осуществляются дискретно, можно точно измерить и вычислить объем бетона, заполнившего КП или, определяя общий расход бетона за каждые 5...10 ЭВ, вычислить объем *условной* камуфлетной полости (УКП) за серию взрывов, или вычислить объем *условной максимальной* камуфлетной полости (УМКП) за полное число ЭВ в данном эксперименте. Во всех случаях объем УКП полости после N взрывов равен объему бетонной смеси, заполнившей N полостей при их схлопывании. Наиболее достоверно определяется объем бетонной смеси, израсходованной на заполнение N КП, по ее осадке в обсадной трубе (скважине).



**Рис. 3. Схема образования камуфлетной полости и уширения свай-РИТ**

Условные обозначения: 6; 7; 8; 9 – см.рис.1; 13 – граница камуфлетной полости.

Зная внутреннее сечение обсадной трубы  $\pi \cdot R_{tr}^2$ , сечение электродной штанги  $\pi \cdot R_{sht}^2$ , измеряя уровень бетонной смеси после очередного взрыва в обсадной трубе, который снижается на некоторую величину  $\Delta h_i$ , пренебрегая потерями бетонной смеси, связанными с ее уплотнением и адгезией к стенкам, вычисляем объем бетона осевшего в обсадной трубе (и заполнившего КП) при  $i$ -том взрыве  $V_{cil,i} = \pi \cdot \Delta h_i \cdot (R_{tr}^2 - R_{sht}^2)$ .

Допуская, что КП имеет форму шара, ее объем  $V_{kp,i} = \frac{4}{3} \pi \cdot R_{kp,i}^3$  (рис.3), с учетом

$V_{cil,i} = V_{kp,i}$ , радиус КП при одиночном  $i$ -том взрыве  $R_{kp,i} = \sqrt[3]{\frac{3}{4} (R_{tr}^2 - R_{sht}^2) \cdot \Delta h_i}$ . Радиус

УКП за серию из  $N$  взрывов, начиная с первого  $R_{ukp}^{1...N} = \sqrt[3]{\frac{3}{4}(R_{tr}^2 - R_{sht}^2) \cdot \sum_{i=1}^N \Delta h_i}$ .

Промежуточный радиус УКП, например, за серию из пяти взрывов после пятидесяти

$$R_{ukp}^{51...55} = \sqrt[3]{\frac{3}{4}(R_{tr}^2 - R_{sht}^2) \cdot \sum_{i=51}^{55} \Delta h_i}.$$

Параметры КП от единичного ЭВ при одинаковой запасенной энергии  $E$  в течение одного эксперимента изменяются незначительно (до 10,0%), а в случае рассмотрения серии разрядов разница показателей УКП сокращается. Так, за 5 взрывов в начале одного из экспериментов (с 6 по 10) радиус УКП составил  $R_{ukp}^{6...10}$ , а за 5 взрывов в конце эксперимента (с 81 по 85)  $R_{ukp}^{81...85} = 0,95 \cdot R_{ukp}^{6...10}$ . Если взять интегральный показатель за всю серию из 90 взрывов, пользуясь приведенным радиусом УМКП  $R_{ukp}^{1...90} = R_{ukp}^{\max}$ , то при исследовании поведения грунта за один опыт,  $R_{ukp}^{\max}$  можно рассматривать как оптимальный показатель. Однако, пользуясь  $R_{ukp}^{\max}$  сложно сопоставить конечные и промежуточные результаты одного эксперимента с результатами других, даже при совпадении общего количества ЭВ, т.к. вариационные параметры и следовательно радиусы  $R_{ukp}^{\max}$ , отличаются.

В итоге скрупулезного анализа результатов нескольких сотен ЭВ, пришли к выводу, что в качестве универсальной единицы измерения следует принять переменный радиус УКП, фактически вычисляемый после  $N$  ЭВ -  $R_{ukp}^{1...N}$ .

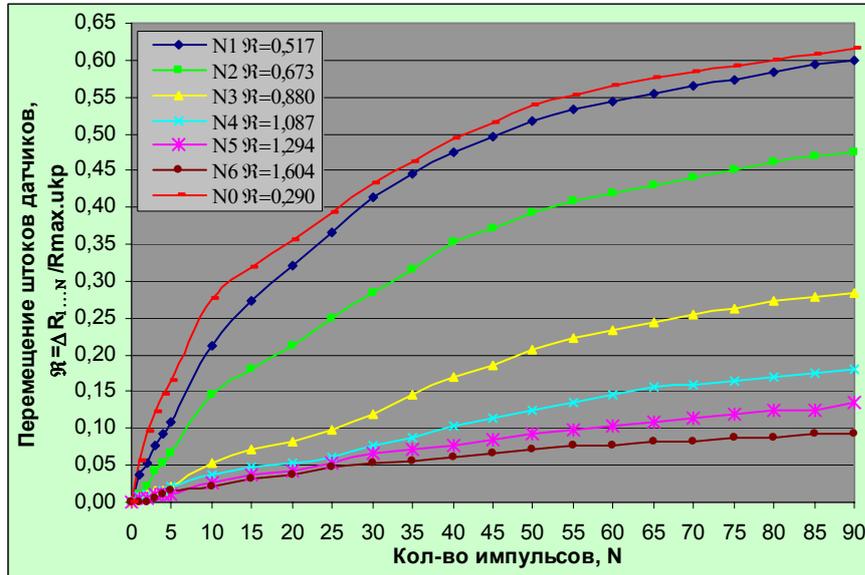
В результате исследования большого числа проб грунта, взятых по мере удаления от очага ЭВ, установлены зоны с различной степенью уплотнения (см. рис.7). Характер конечных перемещений реперов -4 проиллюстрирован на рис.6 по результатам одного из опытов. Регистрация перемещений штоков датчиков -5 позволила установить картину накопления необратимых деформаций в песке от числа ЭВ. Так, на рис.4 и 5 приведены графики перемещений частиц песка в одном из опытов, выраженные - в радиусах УМКП  $\mathfrak{R} = \Delta R^{1...N} / R_{ukp}^{\max}$  (при этом абсолютное перемещение  $\Delta R^{1...N} = R^{1...N} - R_0$ , где соответственно  $R_0$  и  $R^{1...N}$  - положение точки до РИО и после  $N$  ЭВ) см. рис.4а и 5а; и - в переменных радиусах УКП  $\mathfrak{R}_N = \Delta R^{1...N} / R_{ukp}^{1...N}$  см. рис.4б и 5б. При анализе графиков рис.4а и 4б просматривается аналогия поведения грунта от количества разрядов выраженного в различных единицах измерения. Сравнивая графики рис.5а и 5б, становится понятен смысл использования универсальной единицы измерения для иллюстрации перемещений грунта. Рассеянное семейство кривых (рис.5а) на рис.5б сливается!

Выбранная система фиксации смещений частиц грунта с допустимой точностью отражает реальную картину. Перемещение точки удаленной от центра электроразряда на  $0,88R_{ukp}^{\max}$  после окончания эксперимента без учета уплотнения грунта должно было составить  $0,309R_{ukp}^{\max}$ . Фактическое замеренное перемещение репера составило  $0,285R_{ukp}^{\max}$ . С учетом изменения объемной деформации грунта от 0 до 0,050 в зоне радиусом  $1,0R_{ukp}^{\max}$ , перемещение должно было составить  $0,301R_{ukp}^{\max}$ . Несовпадение - 5%, что представляет очень высокую точность, учитывая некоторое отличие реального уширения сваи от шарообразной формы. Учитывая изложенное, можно рассчитывать размеры зоны уплотнения и достигаемую в ней плотность песка.

С увеличением числа ЭВ остаточные деформации грунта и радиус уширения сваи нарастают нелинейно, но характер развития деформаций различно удаленных точек

идентичен, что иллюстрируется рис.4а и 4б. Наибольшая доля остаточных деформаций в ближней к источнику возмущений зоне, фиксируемая в абсолютных единицах датчиками –5, накапливается в основном за первые 20 ЭВ. За следующие 20 взрывов (до 40), интенсивность накопления деформаций плавно уменьшается, оставаясь после 40 импульсов практически постоянной, небольшой по величине вплоть до окончания эксперимента (90 разрядов).

а) Выраженное в радиусах УМКП -  $\mathcal{R}$



б) Выраженное в переменных радиусах УКП -  $\mathcal{R}_N$

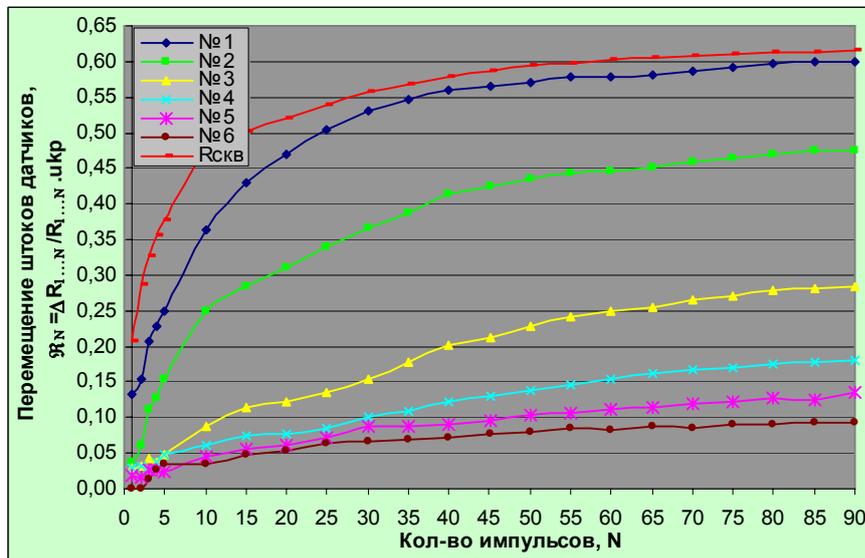
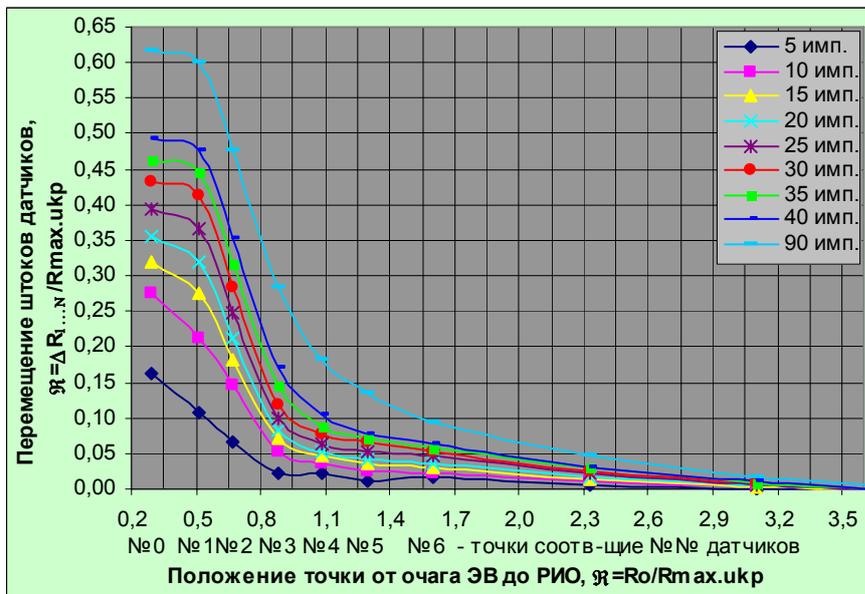


Рис. 4. Перемещение штоков датчиков – 5, установленных до РИО на различном расстоянии от очага ЭВ и увеличение радиуса уширения сваи (кривая №0) в зависимости от количества импульсов N

Кроме того (см. рис.4а), перемещение штока датчика №1, установленного от источника возмущений на расстоянии 0,517 УМКП ( $0,517R_{\text{укр}}^{\max}$ ), за первые 10 ЭВ достигло  $0,212R_{\text{укр}}^{\max}$ . Перемещение датчика №5, удаленного на расстояние  $1,294R_{\text{укр}}^{\max}$ , т.е. в 2,5 раза, за эти же 10 взрывов составило  $0,026R_{\text{укр}}^{\max}$ , что в 8 раз меньше показаний датчика №1. За

10 последних ЭВ (с 81 до 90), датчики №1 и №5 зафиксировали практически одинаковое смещение, соответственно  $0,015R_{ukp}^{max}$  и  $0,011R_{ukp}^{max}$ . Таким образом, наблюдаемая в начале каждого опыта большая разница показаний датчиков постепенно выравнивалась. При этом увеличение плотности песка в ближней к источнику воздействия зоне не вызвало заметного прироста интенсивности уплотнения песка в более удаленных точках измерений, т.е. диссипация энергии ударной волны в маловлажном песке средней крупности мало изменяется с его уплотнением в исследуемом диапазоне энергий.

а) Выраженное в радиусах УМКП -  $\mathfrak{R}$



б) Выраженное в переменных радиусах УКП -  $\mathfrak{R}_N$

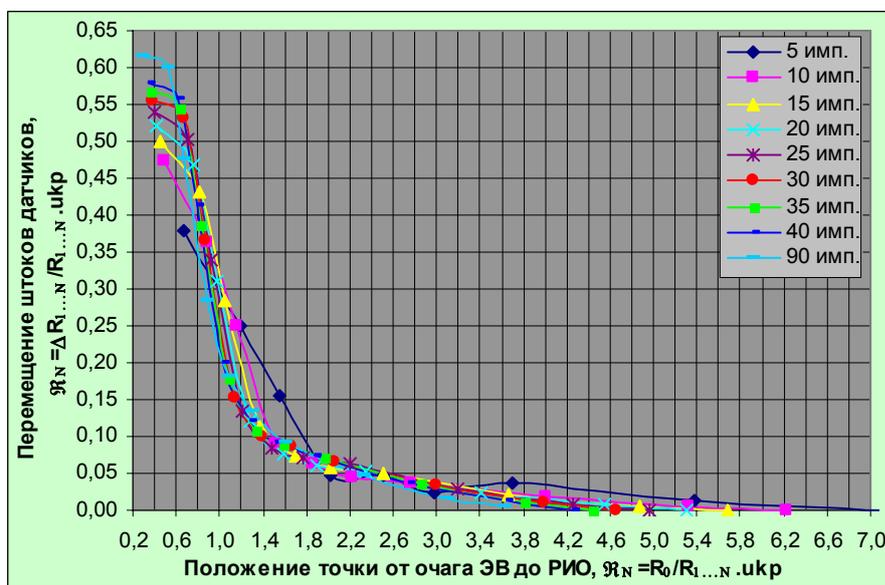


Рис. 5. Увеличение радиуса уширения сваи и перемещение штоков датчиков - 5 в зависимости от их положения до очага ЭВ, при количестве импульсов  $N$

Опыты показали, что после 50-60 разрядов перемещения частиц песка от единичного импульса соизмеримы с погрешностями измерений, для дальнейшего уплотнения грунта необходимо увеличить энергию разряда. Однако, полного прекращения перемещений штоков датчиков зафиксировано не было даже при 90 разряде.

Полученные кривые накопления остаточных деформаций (рис.4а и 4б), с достаточной для расчетов точностью аппроксимируются функцией вида

$$u = \alpha N^\beta ; \quad \{1\}$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты, зависящие от положения рассматриваемой точки до очага электроразрядов, амплитуды импульсного давления, состава и свойств грунта.

Причину накопления деформаций можно объяснить тем, что в случае повторяющихся импульсов, при каждом новом цикле воздействия происходят малые сдвиги в грунте, приводящие к более плотной упаковке частиц. Постепенно взаимные смещения накапливаются, причем по мере уплотнения грунта перемещение частиц от каждого последующего импульса уменьшаются. При этом увеличение суммарной деформации происходит за счет нарастания необратимой ее части, тогда как упругая деформация грунта при повторном нагружении по данным [8, 9] имеет тенденцию к уменьшению или остается постоянной с увеличением числа циклов.

Сравнивая графики рис. 5б и 5а можно установить следующее. За первые 10 ЭВ шток датчика №1, установленный на расстоянии  $0,888 R_{укр}^{1...10}$ , переместился на  $0,364 R_{укр}^{1...10}$ . В тоже время, датчик №5, удаленный на  $2,221 R_{укр}^{1...10}$  зафиксировал перемещение  $0,044 R_{укр}^{1...10}$ . С удалением датчиков от источника возмущений в 2,5 раза перемещение оказалось меньше почти в 8,3 раза. За 80 ЭВ (с 1 по 80) датчик №1, находящийся на расстоянии  $0,528 R_{укр}^{1...80}$  от источника возмущений, переместился на  $0,596 R_{укр}^{1...80}$ , одновременно, датчик №5 удаленный на  $1,319 R_{укр}^{1...80}$  переместился на  $0,127 R_{укр}^{1...80}$ . Разница перемещений изменилась с 8,3 до 4,7 раза.

Принятая универсальная единица измерения позволяет рассматривать “равноудаленные” точки, например, за первые 10 импульсов шток датчика №4 удаленный на  $1,866 R_{укр}^{1...10}$ , переместился на  $0,062 R_{укр}^{1...10}$ , что соответствует показанию датчика №5 ( $0,061 R_{укр}^{1...20}$ ) за 20 (!) импульсов удаленного на  $1,892 R_{укр}^{1...20}$  и т.п. (см. табл.3).

Таблица 3

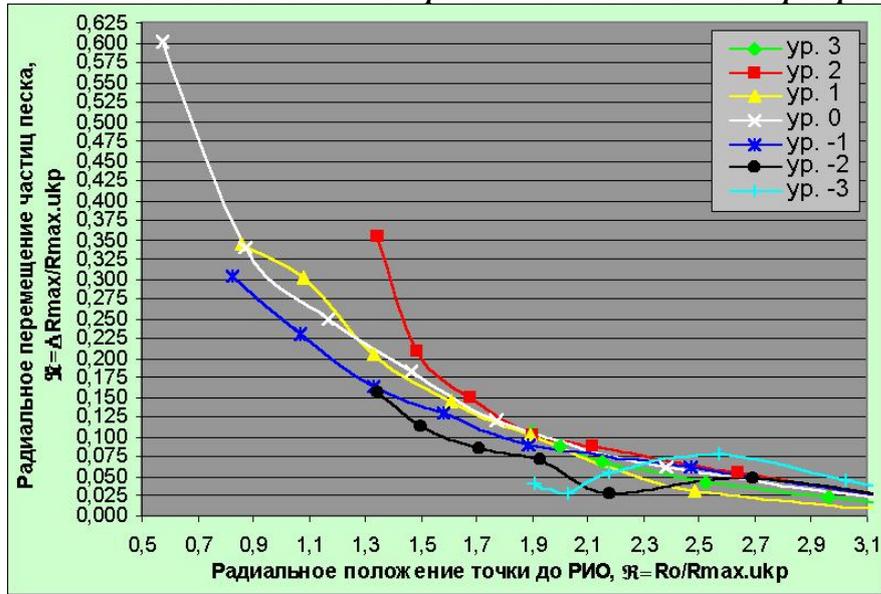
№ датчика	№ имп.	Начал. полож.	Перемещение	№ имп.	Начал. полож.	Перемещение	№ имп.	Начал. полож.	Перемещение
1	-	-	-	-	-	-	3	1,378	0,207
2	1	2,463	0,038	2	2,007	0,062	7	1,317	0,203
3	4	2,164	0,038	7	1,722	0,061	23	1,236	0,131
4	6	2,673	0,038	10	1,866	0,062	45	1,237	0,130
5	7	2,532	0,041	20	1,892	0,061	90	1,294	0,135
6	9	2,856	0,037	26	2,175	0,063	-	-	-

Приращение перемещений частиц грунта с количеством импульсов убывает (см. рис.5а) неравномерно, а после 10...20 разрядов, продолжают существенно перемещаться частицы, расположенные в зоне  $1,3R_{укр}^{max}$ .

Похожее явление авторы [10, 11] поясняют сферическим распространением динамического возмущения и наличием внутреннего сопротивления грунта (на преодоление которого затрачивается значительная часть механической энергии), обуславливающим быстрое падение давления, а, следовательно, и более быстрое замедление движения грунта, что с точки зрения механики объяснимо. Т.о., вокруг очага ЭВ создается область конечных размеров, в которой грунт претерпел необратимую объемную деформацию – зона уплотнения (ЗУ). Для дальнейшего разрушения структуры песка в прежнем объеме, плотность которого в результате воздействия повысилась, необходимо значительно увеличить энергию. Оставаясь неизменной в процессе экспериментов, энергия разряда способна оказывать заметное воздействие на меньший объем грунта повышенной плотности!

За счет рассеивания энергии интенсивность динамического воздействия падает с удалением от источника возмущений, поэтому, в пределах активной ЗУ выделяются области различного реагирования грунта (рис 5а). В дальней зоне необратимые деформации почти отсутствуют. В средней зоне они несколько возрастают. В ближней, происходят значительные необратимые деформации, и - ядро уплотнения (небольшая по абсолютной величине зона предельного уплотнения), где произошло наиболее полное закрытие свободного порового пространства. В общем случае соотношение между размерами этих областей будет зависеть в основном от интенсивности динамических воздействий, их количества, напряженного состояния, плотности песка и его грансостава.

а) Радиальное - в зависимости от расстояния до очага электровзрывов



б) Горизонтальное - в зависимости от расстояния до оси скважины

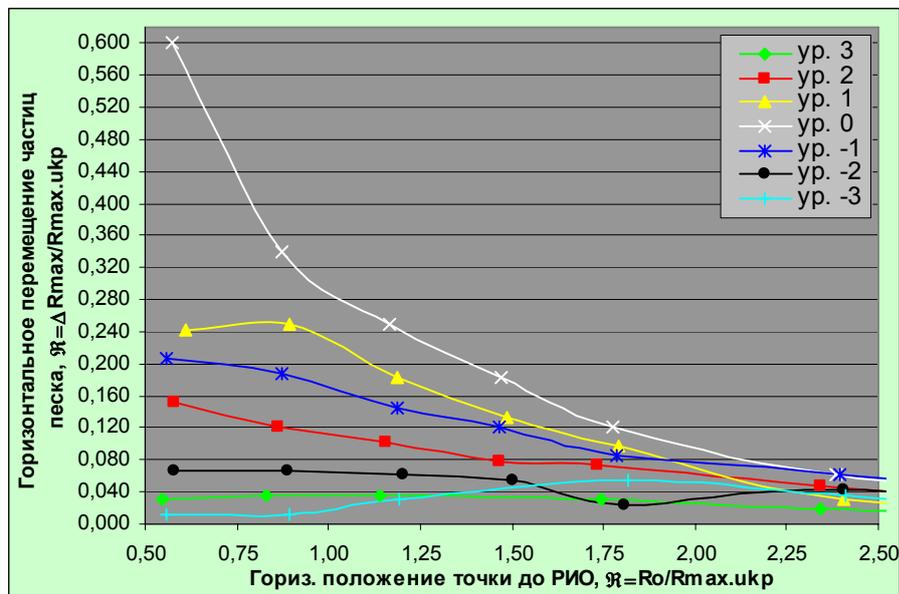


Рис. 6. Конечное перемещение песка по уровням (замерено по изменению положения реперов -4 после РИО)

Из графиков конечных перемещений реперов (рис.6) относительно центра источника возмущений – рис.6а (радиальные смещения) и относительно оси скважины – рис.6б (горизонтальные смещения) выраженных в радиусах УМКП  $\mathfrak{R} = \Delta R^{max} / R_{укр}^{max}$  (при

этом абсолютное перемещение  $\Delta R^{\max} = R^{\max} - R_0$ , где  $R^{\max}$  - положение точки после РИО), видно существенное уменьшение перемещений грунта с удалением начального положения точки от очага ЭВ и от оси скважины. Сближение кривых радиальных перемещений частиц грунта (рис.6а) указывает на то, что уплотнение грунта происходит с симметрией близкой к сферической. Однако, перемещения частиц песка, расположенных в горизонтальных плоскостях (ур. №1, 2, 3) выше основного уровня №0 чуть большие, чем их “зеркальные” отражения, находящиеся ниже основного уровня (ур. № -1, -2, -3). Это явление объясняется характерным изменением плотности скелета грунта. Во всех опытах на расстоянии более  $3,5R_{ukp}^{\max}$ , конечные остаточные перемещения были сопоставимы с погрешностью измерений.

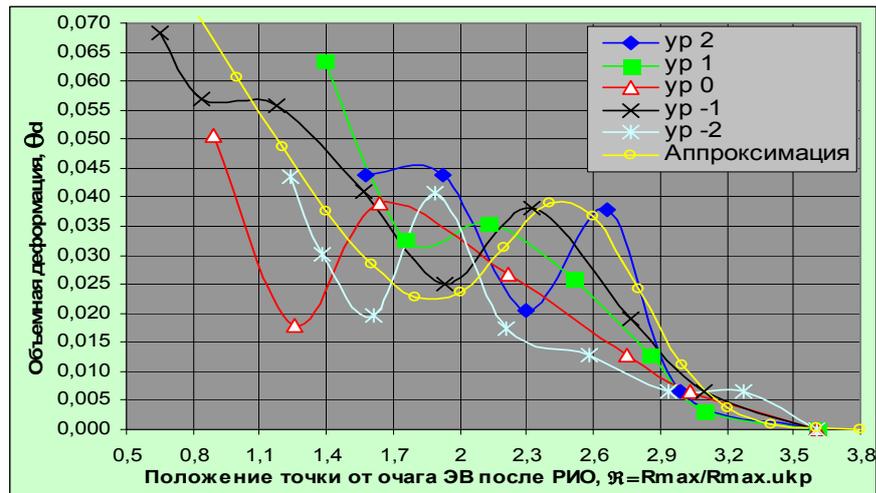


Рис. 7. Изменение объемной деформации песка  $\theta_d$  с расстоянием  $R$  на разных уровнях

На рис.7 приведены зависимости объемной деформации  $\theta_d$  скелета грунта после воздействия РИО с удалением от центра ЭВ.  $\theta_d$  рассчитывалась как  $\theta_d = 1 - \frac{\rho_{d0}}{\rho_d}$  на

основании результатов исследования отобранных проб грунта на каждом уровне. Как видно, характерной особенностью механического воздействия электровзрывов в песке является зональный характер изменения  $\rho_d$  ( $\theta_d$ ). Полученные данные распределения прироста плотности грунта (чередование зон значительного и менее значительного повышения плотности) хорошо согласуются с результатами полученными другими исследователями при одиночных взрывах зарядов ВВ [12, 13]. Такое чередование зон с постепенным общим затуханием плотности (до  $\rho_{d0}$ ) с удалением от центра возмущений, по всей видимости, является результатом влияния действия комплекса факторов: 1) Влияние отраженной от стенок лотка ударной волны и ее наложение на волну сжатия (перемещения частиц). 2) Возникновение растягивающих (тангенсальных) напряжений сопоставимых с сжимающими (нормальными) на некотором расстоянии от очага возмущений. 3) Не исключается отсутствие фильтрации газов и жидкости при быстром динамическом сжатии грунта, плотность которого увеличивается за счет сжатия газов (и последующей их фильтрации), что может отрицательно влиять на прочностные свойства грунта. 4) Влияние дилатансии, т.е. некоторого местного разуплотнения песчаного грунта при взаимном смещении частиц.

Полученные опытные кривые  $\theta_d = f(R)$  (рис.7) в исследуемом диапазоне могут быть аппроксимированы следующей зависимостью

$$\theta_d = K_1 e^{-m_1 R^2} + K_2 e^{-m_2 (R - R_m)^2}; \quad \{2\}$$

где  $\theta_d$  – объемная деформация после РИО;

$\mathfrak{R} = R^{\max} / R_{ukp}^{\max}$  – относительное расстояние рассматриваемой точки (после РИО) от очага ЭВ в радиусах УМКП;

$\mathfrak{R}_m$  - положение второго пикового значения плотности (= 2,5);

$K_1, K_2, m_1, m_2$  – эмпирические коэффициенты (= соответственно 0,10; 0,035; 0,50; 5,0);

Коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$  равенства {2} выражают величину соответственно первого и второго пикового значения плотности, коэффициент  $m_1$  выражает минимальное значение плотности, а  $m_2$  влияет на степень затухания плотности с расстоянием.

$\rho_d(\theta_d)$  возрастает с каждым последующим импульсом, при этом растет и радиус уширения ствола сваи. Измеряя  $\Delta h_i$ , зная  $R_{tr}$ ,  $R_{sht}$  и  $R_{skv}$  (см. рис.3), принимая полученную форму уширения в виде шара, на основании преобразования элементарных зависимостей объемов геометрических тел, в первом приближении можно судить о полученном радиусе уширения сваи

$$R_{ush} = \sqrt{\left\{ \frac{3}{4} (R_{tr}^2 - R_{sht}^2) \cdot \Delta h \right\}^{\frac{2}{3}} + R_{skv}^2}; \quad \{3\}$$



**Рис. 8. Характерные уширения свай-РИТ а) в глинистом; б) и в) – в песчаном грунтах**

Данная зависимость хорошо себя зарекомендовала в глинистых грунтах, где полученные уширения ствола сваи по своей форме близки к сферическим. В песчаных грунтах наблюдается систематическое отклонение формы полученного уширения от сферической, скорее приближающейся к цилиндру или бочке! На фото (рис.8) приведены три характерных уширения полученных соответственно в пылевато-глинистом (рис.8а) и в песчаном грунтах (рис.8б, 8в). Подставив в выражение {3} для определения радиуса сферического уширения сваи, некий коэффициент  $\chi$ , учитывающий цилиндричность формы, можно использовать полученную зависимость и для песчаных грунтов.

При откопке экспериментальных свай во всех случаях было зафиксировано несимметричное расположение полученного уширения сваи относительно вертикальной центральной оси скважины (рис.8б – значительное, рис.8в – незначительное) – полной симметрии не наблюдается. На рис.9 изображены изолинии конечных горизонтальных перемещений грунта на основном уровне возмущений, построенные по результатам замеров положений реперов до и после РИО (опыт №2). По характеру изолиний явно прослеживается преобладающая односторонняя направленность развития перемещений грунта. Там же нанесен контур откопанной сваи, соответствующий тому же уровню.



Результаты проведенных экспериментальных исследований, а также анализ других работ, показывают, что параметры, характеризующие изменение плотности и прочности грунта с расстоянием от очага возмущений в пределах ЗУ, существенно зависят от физико-механических характеристик (грансостав, влажность, плотность, содержание газа и др.), максимального давления, числа циклов и т.д. При этом каждой величине интенсивности динамического воздействия соответствует своя предельная достигаемая плотность.

С каждым ЭВ возрастает упругость грунта, причем модуль общей деформации увеличивается, приближаясь к модулю разгрузки, который во всех случаях сохраняет свое значение. В результате, изменение модуля деформации на участке воспринимающем нагружение при последовательных воздействиях равной амплитуды, в случае рыхлого песка составило около 30МПа (с 8...10МПа до 40...41МПа). В общем случае модуль деформации песчаных грунтов при данной технологии необходимо рассматривать как функцию расстояния до очага электровзрывов и числа циклов нагружения.

**Выводы:** 1) Материалы настоящего исследования позволили выяснить физическую природу происходящих в песке явлений при воздействии ЭВ и установить влияние энергии на изменение физико-механических характеристик несвязного грунта; 2) Высокая НДС свай-РИТ (до 150...200т) при их малом буровом диаметре является следствием уплотнения (увеличения прочности и уменьшения деформируемости) грунта вокруг формируемого уширения сваи; 3) В исследуемом диапазоне энергий и количества ЭВ, доказано соблюдение закона геометрического подобия в песчаном грунте вне зависимости от масштабов и количества взрывов; 4) При многократном повторении ЭВ увеличивается плотность и как следствие прочность рыхлого песка, уменьшается его деформируемость вокруг формируемого уширения сваи на  $(3,0...3,5) \cdot R_{ukp}^{max}$ , что подтверждает аналогию действия РИТ и взрывов камуфлетных зарядов ВВ, где также размеры ЗУ принимают равной  $(3,0...3,5) \cdot R_{kp}$ ; 5) Каждой энергии, запасенной в накопителях ГИТ, соответствует предельно достигаемая степень уплотнения, при достижении которой с увеличением циклов воздействия дальнейшее уплотнение и изменение НДС песка становится едва уловимым. Удвоение накапливаемой энергии при РИО рыхлых песков приводит к увеличению КП на 20%; 6) Знание природы основных явлений и процессов, протекающих в зоне влияния электроразрядов и результатов их воздействия на конечную картину распределения остаточных деформаций, позволяет предложить систему прогнозирования размеров области уплотнения, а следовательно и радиуса уширения сваи, при ее изготовлении с применением РИТ в различных грунтовых условиях.

#### **Список литературы:**

1. Еремин В.Я. Разрядно-импульсные технологии на стройках России // Журнал Стройклуб – 2002. – № 1-2 (9-10). – с. 11-15.
2. Малюшевский П.П. Основы разрядно-импульсной технологии. – Киев: Наук. Думка, 1983. – 272с.
3. 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.
4. Исследование физико-механических свойств песков после их мелиорации методом разрядно-импульсного воздействия. Отчет. М.: МПК СтройМаркет, 2002. – 133 с. (архив «МПО РИТА»).
5. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. –М.: Наука, 1965. –387с.
6. Зельманов И.Л., Колков О.С., Тихомиров А.М., Шацкевич А.Ф. Об электровзрыве в песчаном грунте. ФГВ, 1968, № 3, с. 408-413.
7. Смирнов В.И., Голицынский Д.М., Мельников Л.Л. Строительство подземных сооружений с использованием камуфлетных взрывов. –М.: Недра, 1981. -215с.

8. *Азбергенов М.И. Закономерности упруго-пластического деформирования песчаных грунтов в режиме циклического нагружения. Дис...канд. техн. наук. – М.:1986.*
9. *Кузнецов А.В. Деформирование водонасыщенного песка при низкочастотных циклических воздействиях. Дис...канд. техн. наук. – М.:1990.*
10. *Х.А. Рахматулин, А.Я. Сагомоян, Н.А. Алексеев. Вопросы динамики грунтов. – М.: Изд-во МГУ, 1964.*
11. *Об оптимальной плотности заряжания при проходке подземных сооружений взрывом в сжимаемых грунтах. А.В. Михалюк, К.А. Гундарев. В кн. Взрыв в пористых дисперсных средах. – Киев: Наук. Думка, 1969.*
12. *А.А. Вовк, В.Г. Кравец, И.А. Лучко и др. Геодинамика взрыва и ее приложения. - Киев: Наук. Думка, 1981.*
13. *Кравец В.Г., Грищенко Н.С., Демещук Л.И. Формирование инженерных свойств грунтов взрывными методами. – Киев: Наук. Думка, 1983.*