

УСТРОЙСТВО ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ ПОВЫШЕННОЙ ЭТАЖНОСТИ В МОСКВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВАЙ-РИТ

Кубецкий В.Л., д.т.н., зав. лабораторией оснований, фундаментов, надземных конструкций зданий и сооружений, ГУП «НИИМосстрой»;

Еремин В.Я., к.т.н., технический директор, фирма «РИТА»;

Иванов В.В., ГУП «НИИМосстрой»;

Буданов А.А., фирма «РИТА»

Городская комплексная инвестиционная программа “Новое кольцо Москвы” утверждена постановлением Правительства Москвы от 02.02.99 г. № 80 (с изменениями от 27.06.2000, 28.08.2001, 01.07 и 30.12.2003, 31.05.2005).

В соответствии с этой Программой в Москве до 2015 года будут возведены 60 высотных комплексов высотой свыше 30 этажей каждый.

Программа разработана ГУП НИиПИ Генплана Москвы и является основной частью современной концепции размещения высотных зданий в Москве, одобренной на заседании Общественного совета по проблемам формирования градостроительного и архитектурно-художественного облика города при мэре Москвы 20.05.2004 г. На рис. 1 представлена схема размещения высотных зданий, а на рис. 2. схема первоочередных объектов по которым уже объявлены аукционы а шесть высоток уже строятся. Всего же по заявлению директора ГУП НИиПИ Генплана Москвы, столица запросто вместит и 250 высотных зданий [Дубинин Н.В. Высотное строительство –дело техники./ Жилищное строительство. 2006, №2, с. 16-18].

Одной из важных задач, решение которой требуется для выполнения программы “Новое кольцо Москвы”, является разработка и внедрение в практику строительства надежных конструкций фундаментов позволяющих передать на грунтовое основание нагрузки от высотных зданий Величина нагрузок на фундаменты высотных зданий значительно превышает уровни достигнутые в практике геотехнического строительства г. Москвы.

Необходима разработка и внедрение новых надежных конструктивных решений, вместе с тем новые конструкции фундаментов не должны увеличивать сроки и стоимость строительства.

Свободных площадок для размещения высотных зданий с хорошими инженерно-геологическими условиями на территории Москвы практически не осталось. Выделяются строительные неудобья и территории ранее используемые для свалок грунта. В основании некоторых строительных площадок встречается до 50 инженерно-геологических элементов.

Сложные инженерно-геологические условия, необходимость возведения высотных зданий в условиях сложившейся плотной городской застройки, высокие требования к неравномерности осадок высотных зданий предъявляют особые требования к конструктивным решениям фундаментов.

Современная практика фундаментостроения имеет в своем арсенале большое количество методов используемых на практике.

Основными типами фундаментов для высотного строительства в г. Москве могут служить плитные фундаменты и комбинированные свайно-плитные (КСП) фундаменты. Наибольшую надежность и минимальную величину неравномерности осадок могут обеспечить только комбинированные свайно-плитные (КСП) фундаменты.

СП 50-102-2003. (п. 8.4.2) рекомендует обеспечивать несущую способность свай за счет увеличения их длины, а не поперечного сечения. Одним из перспективных направлений является устройство КСП фундаментов, в которых применяются сваи-РИТ Ø250-350 мм изготавливаемые по разрядно-импульсной технологии, известной многим под названием: «эффект Юткина», «электрогидравлический эффект» или «электрогидравлическая технология»

РИТ начиная с 1992г. весьма успешно использована при устройстве свайных фундаментов более 500 зданий в Москве. Имеется положительный опыт применения свай-РИТ в основании зданий высотой до 30 этажей, построено здание 36 этажей, высотой 120 м (пр.Вернадского, д.37). Возводится 35 этажное здание на ул. Семеновской вл. 21.

В таблице № 1 представлены некоторые объекты, свайные основания которых выполнены с использованием разрядно-импульсной технологии в 2001-2005 г.г.

Таблица 1

№ п/п	Объект	Характеристика свай	Дата испытаний	Грунтовые условия	Расчетная несущая способность, т	Нагрузка на сваи-РИТ при испытании, т	Осадка сваи-РИТ под нагрузкой, мм	Осадка сваи-РИТ после разгрузки, мм
1	Арбат, д.1, вестибюль второго выхода станции м. "Арбатская"	d=250мм, L=8м	26,02,02	Суглинки плотные оторфованные, глина	75	90	8,39	3,21
			02,03,02		75	90	7,79	2,5
2	Митино, мкр. 8Б, к.2, сек.2, фундамент жилого дома	d=300мм, L=10м, L=11м	01,07,02	Пески мелкие, средней крупности, плотные, в забое водонасыщенные	80	100	4,14	0,9
			02,07,02		80	100	4,39	0,88
3	Митино, мкр. 8Б, к.2, сек.1, опытная площадка для испытаний свай-РИТ	d=300мм, L=19м	07,06,02	До глубины 12м насыпь, торф, далее пески ср. крупности, водонасыщенные	70	240	17,3	6,42
			09,06,02		80	270	32,04	12,64
4	147 АБ ГШ ВС РФ Е 00, жилой дом серии III М, свайное основание	d=250мм, L=5м	20,02,02	Пески мелкие	47	60	5,15	2,94
5	Б. Знаменский пер., д.23, свайный фундамент 10-ти этажного корпуса, 1-го дома МО РФ	d=250мм, L=15.2м	25,05,01	Пески мелкие, средней плотности с прослоями суглинков	92	120	6,4	1
			20,05,01		92	120	8,3	1,8
			22,05,01		92	120	8,4	1,7
6	ул. Гришина, д.23, стр.7, свайное основание над сооружением ГО	d=250мм, L=15м	20,11,00	Суглинки тугопластичные, пески пылеватые водонасыщенные	85	102	5,2	2,8
			23,11,00		85	130,5	8,3	1,6
			26,11,00		85	102	7,3	1,3
7	Врачебный проезд, вл.8, свайное основание 25-этажного жилого дома	d=250мм, L=11.2м	05,08,02	Суглинки тугопластичные, пески ср. кр. водонасыщенные	60	72	3,32	0,52
			07,08,02		60	115	10,9	2,8
8	Соймоновский пер., вл.7, стр.2, свайное основание гаража	d=250мм, L=7м	20,02,02	Песок рыхлый, ср. кр., песок ср. кр. ср. плотности	50	60	3,05	1,48
			05,03,02		50	60	4,98	2,99
9	Пр-т Вернадского, д.37, свайное основание 19-этажного корпуса	d=300мм, L=18м	12,03,03	Техногенные грунты, суглинки, песок ср. кр., водонасыщенный	150	180*	15,11	5,73
			01,04,03		150	180	8,93	1,88
			17,05,03		150	234**	18,46	5,47

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

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

Здания, в основании которых применены сваи-РИТ имеют осадки значительно ниже расчетных, при этом снижаются сроки, стоимость строительства, объемы вывозимого грунта и доставляемого бетона, что весьма важно в условиях усложнения транспортного обеспечения строительства в г. Москве.

Действительно, висячие сваи-РИТ по своим характеристикам и в частности, жесткости, практически соответствуют сваям стойкам.

Если посмотреть на графики зависимости осадки от нагрузки у обычной буровой висячей сваи, то обнаружим характерный резкий перелом – свидетельствующий о срыве сваи по боковой поверхности (Рис. 3). На графиках испытаний свай-РИТ такой перелом отсутствует.

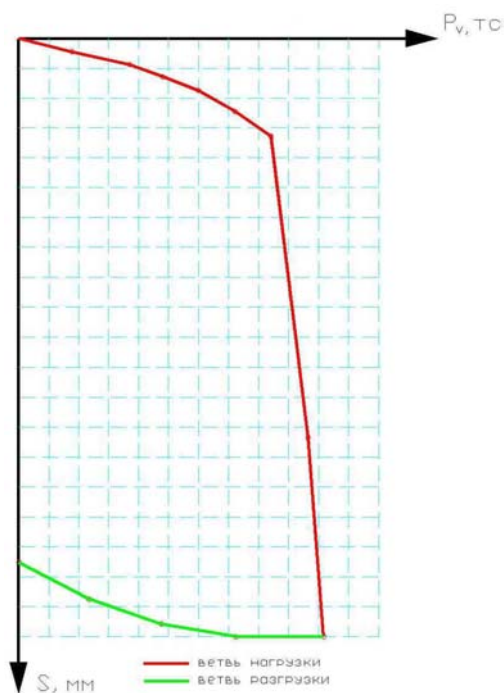


Рис. 3. График зависимости осадки от нагрузки у обычной буроинъекционной висячей сваи

График имеет более пологую кривую, даже при испытательных нагрузках достигающих расчетного сопротивления сваи по материалу (Рис. 4). На графиках изменения осадки свай-РИТ во времени по ступеням нагружения видно, как наступает стабилизация деформаций (Рис. 5). После снятия нагрузки, сваи-РИТ возвращаются практически в исходное положение, остаточные деформации у свай-РИТ измеряются первыми миллиметрами. Это свидетельствует о том, что система сваи-РИТ-грунт работает в стадии упругих деформаций.

Технология изготовления свай-РИТ включает следующие виды работ: формирование скважин диаметром 150 - 450 мм; заполнение скважины мелкозернистым бетоном; опускание электродной системы на забой и обработка пяты и ствола по выбранному режиму разрядно-импульсной обработки (РИО) с контролем за величиной осадки бетонной смеси; опускание объемного армокаркаса в скважину.

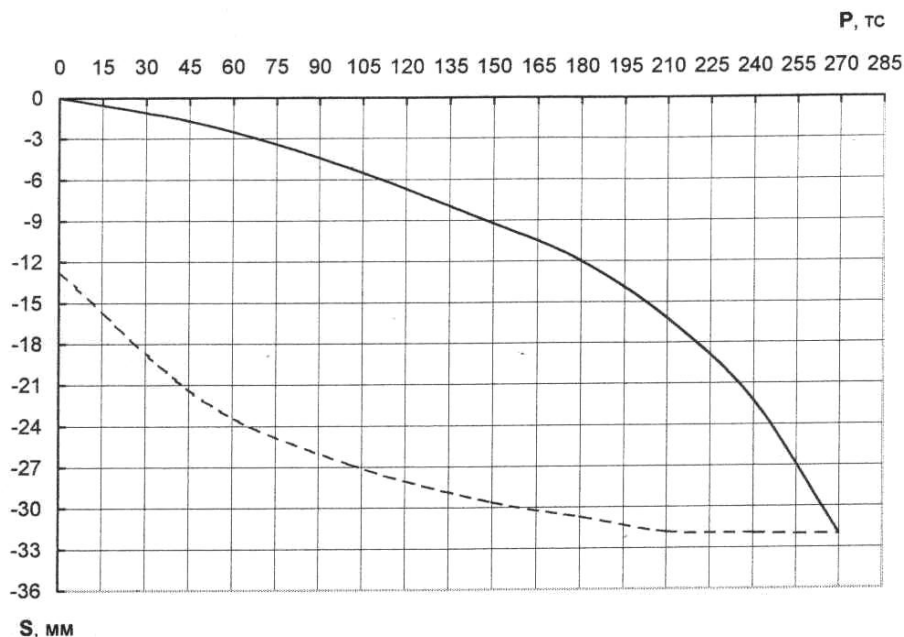


Рис. 4. Зависимость осадки сваи-РИТ с усиленной системой анкеровки от нагружения

При нагружении ступени 290т начали разрушаться сварные швы в анкерной системе. После разгрузки сваи остаточная деформация составила 12,64мм. Свая работает в упругой стадии деформаций.

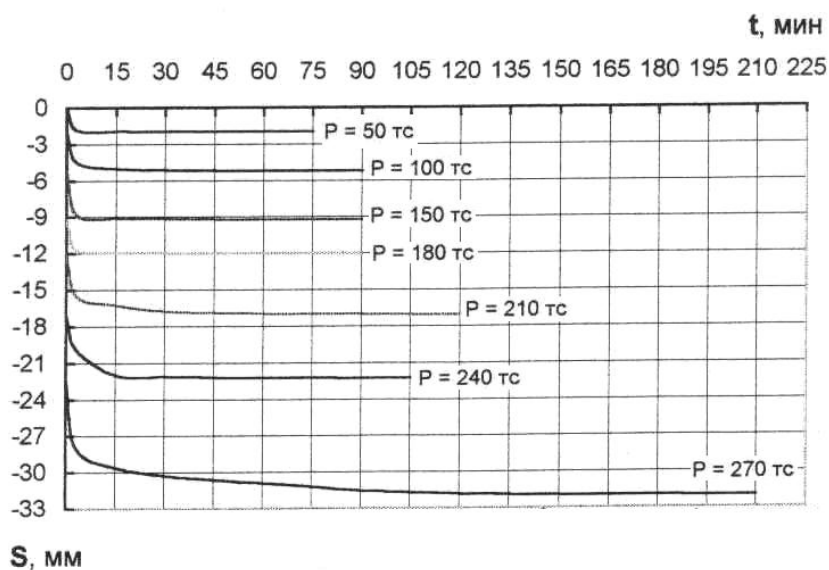


Рис. 5. Зависимость осадки во времени по ступеням нагружения сваи-РИТ с усиленной системой анкеровки

При изготовлении сваи-РИТ происходит уплотнение грунта прилегающего к скважине, в котором формируется свая-РИТ. По сравнению с буронабивными и буроинъекционными сваями, изготавливаемыми по традиционным технологиям, сваи-РИТ обладают следующими преимуществами:

- увеличением диаметра пройденной скважины в требуемом сечении за счет уплотнения грунта, прилегающего к скважине в результате выполнения

серии электрических разрядов (рис.1). Увеличение диаметра скважины контролируется по объему бетонной смеси израсходованной на заполнение уширенного сечения скважины;

- уплотнением трудно удаляемого рыхлого грунта в забое буровой скважины и формирование в грунте под нижним концом сваи зоны уплотнения, размеры которой могут превышать размеры зоны уплотнения у нижнего конца забивной сваи;

- улучшением строительных свойств грунтов в существенной мере определяющих несущую способность основания;

- увеличением и наиболее полным использованием несущей способности грунтового массива;

- максимально возможным использованием несущей способности материала сваи.

Для изготовления свай-РИТ используются традиционные материалы – бетон, цемент, песок, щебень, арматурная сталь и ряд добавок.

Нет сомнений, что самый надежный способ определения несущей способности свай по грунту – полевые испытания грунтов натурными сваями, проводимые при инженерных изысканиях для строительства, в конкретных геологических условиях данной строительной площадки. Однако, организационные проблемы не позволяют выполнить испытаний грунтов натурными буронабивными сваями на стадии проведения геологических изысканий.

В настоящее время проведено большое количество натурных испытаний несущей способности свай-РИТ на разных объектах с различными геологическими условиями. Их анализ показывает, что несущая способность этих свай значительно превышает расчетные величины и свидетельствует о необходимости уточнения расчета свай-РИТ

В 2004-2005 г.г. ГУП «НИИМосстрой» совместно с фирмой «РИТА» выполнил большой комплекс исследований для внедрения в строительства зданий повышенной этажности в Москве, надежных оснований по современной эффективной наукоемкой отечественной разрядно-импульсной технологии.

В периоды освоения новой технологии изготовления свай-РИТ (1988-1999гг.) в расчетах ограничивались нагрузками 25...40 т на сваю, редко допуская до 60 т, но уже в 2000 г. при контрольных испытаниях по ГОСТ 5686-94 сваи-РИТ длиной 15 м вдавливающая нагрузка превысила 130 т на сваю и осадка составила 8мм. В 2004 г. при испытании грунтов сваями-РИТ вдавливающая нагрузка на сваю-РИТ Ø 300 мм длиной 23 м превысила 360 т на сваю при ее осадке 34,33 мм.

Несмотря на достигнутые успехи в применении свай-РИТ, остается еще много не решенных проблем. Реальная несущая способность свай-РИТ по грунту, определяемая по результатам контрольных испытаний, значительно превосходит несущую способность, определяемую предварительными расчетами.

Для выяснения главных причин значительного прироста несущей способности в сухих песках было проведено исследование прилегающего к свае-РИТ грунта [7].

К сожалению, в процессе исследований грунтов вокруг свай-РИТ удалось взять пробы грунта только вдоль верхних участков стволов свай, обрабатывались, всего по 5 разрядов с шагом 300...350 мм по высоте.

Диаметр бурения свай составлял 250 мм. Диаметр сваи-РИТ после разрядно-импульсной обработки доходил в отдельных местах до 450 мм. Результаты определения несущей способности свай-РИТ по грунту, установленные статическими испытаниями вдавливающей нагрузкой [8] приведены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристика свай	Дата испытаний	Расчетная несущая способность, тс	Нагрузка на сваю при испытаниях, тс	Осадка сваи под нагрузкой, мм	Осадка сваи После снятия нагрузки, мм
Свая-РИТ D = 250 мм, L = 11,5 м	20.10.01	90	110*	6,8	2,1
	25.10.01	90	120	7,2	3,1

** испытания прерваны из-за деформации испытательного стента.*

Геологический разрез строительной площадки представлен насыпными грунтами (1...3 м), аллювиальными песками малой и средней крупности, маловлажными с редким гравием (мощность более 8 м), с незначительным содержанием глинисто-пелитового вещества, основная часть которого сосредоточена в тонких глинисто-песчаных слойках, с глубины 7,5...8,0 м пески водонасыщенные. Аллювиальные отложения р. Москвы подстилаются морскими отложениями верхней юры и среднего, верхнего карбона.

Внешний осмотр грунтовых стенок, при разработке грунта у свай-РИТ, показал, что грунт находится в сухом и маловлажном состоянии, относительно устойчив и даже не требует крепления. Стенки котлована вдалеке от свай-РИТ (на участках, не обработанных по разрядно-импульсной технологии) были не устойчивы, требовали устройства крепления из досок и при малейшем промедлении с креплением, осыпались.

Для определения литологических особенностей отложений массива и для исследования физико-механических свойств песков после их мелиорации методом разрядно-импульсного воздействия, были изучены пробы грунта, взятые в около свайном пространстве. В целом, было отобрано три группы проб, представляющих однотипные отложения, в которых гранулометрические различия были связаны с содержанием мелких и крупных частиц.

Основными задачами исследования являлись:

- Изучение минерало-петрографического состава песчаных грунтов естественного состояния и после проведения разрядно-импульсного воздействия.

- Получение количественных оценок физико-механических свойств песков в естественном залегании и после разрядно-импульсной обработки.

Монолиты песков отбирались методом забивки тонкостенного стального стакана диаметром 120 мм. Грунт обрезали по высоте стакана, торцы закрывались пластинами гидроизола и приваривались газовой горелкой.

Пробы изучались методами гранулометрического, рентгенофазового, микроскопического и химического анализов. По данным проведенного анализа был сделан вывод, что, прочностные свойства грунтов зависят от многих факторов, для рассматриваемого случая, очевидно, важнейшими из них являются три: гранулярный состав песков; особенности материала - заполнителя порового пространства песков; причины техногенного характера.

При сравнении массива вне зоны влияния РИТ и грунтового массива в зоне влияния РИТ выяснилось, что после проведения опытов, пески уплотнились от рыхлых до средней плотности. Грунты стали более однородны по плотности и пористости. Сопоставление физико-механических свойств песков, находящихся в естественных условиях, и модифицированных, в результате разрядно-импульсной обработки, при изготовлении свай-РИТ показало:

1. коэффициент пористости песков уменьшился в 1,04 раза (с 0,726 до 0,701);
2. влажность уменьшилась в 1,17 раза;
3. плотность возросла в 1,02 раза;
4. сцепление увеличилось в 3,5 раза;

Исследованные выборки оказались однородны по среднему квадратичному отклонению и коэффициенту вариации.

Возможное участие цемента входящего в состав бетонной смеси, в изменении структурных особенностей песков, довольно проблематично. Как показали минерально-петрографические исследования, присутствие карбонатов цемента фиксируется в песках только на расстоянии не более 5 см от свай.

Влияние техногенных факторов на инженерно-строительные свойства песков теоретически могут отражаться в гранулярных, минеральных и других особенностях этих отложений. Вместе с тем, как показали исследования песков, четких изменений их параметров не выявлено. По данным анализа была выявлена слабая тенденция увеличения плотности и прочности по мере приближения к источнику уплотнения. Несущая способность и прочность песков после производства опытных работ в целом возросла, хотя и незначительно.

К сожалению, в условиях действующей строительной площадки не удалось определить исходное напряженно-деформированное состояние массива, его изменение в процессе разрядно-импульсной обработки при изготовлении свай-РИТ, а так же исследовать грунт в зоне интенсивного воздействия, т.е. в зоне основания свай. По мнению [Ивлев А.И., Гнесин Г.Г., Маношевский П.П., Горovenko Г.Г, Виброимпульсное прессование порошковых материалов./ сб. науч. Трудов:Новое в разрядно-импульсной технологии. Киев: «Наукова Думка», 1979 с.3-6.] в момент прохождения ударной волны и воздействия высокоскоростных гидротоков на дисперсные материалы, резко уменьшается трение между частицами, повышается их подвижность, что приводит к равномерной укладке песчинок и заклиниванию их в этом положении.

Как гипотезу положительного эффекта увеличения несущей способности песков, являющихся основанием свай-РИТ, можно предположить наличие в грунте остаточного напряженно-деформируемого состояния (НДС), которое сохраняется после проведения импульсных воздействий на грунт: удар-разгрузка, действующих преимущественно в горизонтальных плоскостях. Остаточное НДС характеризуется большими горизонтальными напряжениями в массиве грунта, которые значительно больше вертикальных, вследствие чего грунт приобретает устойчивость.

Если раньше несущая способность свай ассоциировалась с несущей способностью свай по грунту, то для свай-РИТ, при изготовлении которых улучшаются строительные свойства грунта, актуальной стала проблема несущей способности свай по материалу.

В конструкции свайно-плитного фундамента жилого 36-этажного дома №37 высотой 120м на пр-те Вернадского, построенном в 2004г., были применены сваи-РИТ Ø 300 мм длиной 21м. Мониторинг за осадками этого здания, показал, что они стабилизировались не достигнув даже 30% от прогнозируемых. Данный пример наряду с аналогичными подтверждает эффективность применения свай-РИТ в основаниях зданий повышенной этажности.

Так, на упомянутом выше объекте в соответствии с требованиями технического заключения, армирование свай-РИТ Ø 300 мм длиной 21 м выполнялось составными арматурными каркасами из 2-х секций: верхняя длиной 11,7 м из 6 стержней Ø 28 А-500С, нижняя длиной 10 м из 6 стержней Ø 25 А-500С. Расчетная нагрузка на сваю составляла 137 т. Соппротивление сжатой арматуры в верхнем сечении сваи превышало 160 т (без учета работы бетона на сжатие), а в нижнем сечении сваи более 128 т. При контрольных испытаниях натуральных свай, выполняемых при строительстве, вдавливающая нагрузка доводилась до 216 т. Осадки всех испытанных свай не превышали 18 мм.

В настоящей статье рассматривается вопрос определения несущей способности свай-РИТ.

В соответствии с рекомендациями [3,4,6] расчет несущей способности свай-РИТ должен выполняться по прочности материала сваи и грунта, вмещающего сваю.

Принципиальной особенностью свай-РИТ является возможность максимального использования несущей способности материала сваи при её устройстве в песчаных и глинистых грунтах, когда нижний конец сваи не доходит до скальных грунтов, а расчет по прочности материала свай-РИТ может быть определяющим. Нагрузки, воспринимаемые свай-РИТ при диаметре скважины 300 мм и глубиной около 15-20 м могут достигать 1,5-2,0 МН, что позволяет использовать их при устройстве фундаментов зданий повышенной этажности.

В настоящей статье представлена методика расчета несущей способности сваи-РИТ по материалу как железобетонной конструкции, являющейся составной частью свайно-плитного фундамента здания повышенной этажности.

Сваи-РИТ, как железобетонные конструкции, должны удовлетворять в соответствии с [4] требованиям расчета по несущей способности (предельные состояния первой группы) и по пригодности к нормальной эксплуатации (предельные состояния второй группы).

Расчет по предельным состояниям первой группы должен обеспечивать прочность конструкции сваи-РИТ из условия, при котором усилия в ней от различных воздействий не должны превышать предельных усилий, которые могут быть восприняты свайей в рассматриваемом сечении.

Расчет по предельным состояниям второй группы при расчете свай-РИТ по материалу в настоящей работе не рассматриваются в связи с тем, что наличие значительных вертикальных нагрузок исключает необходимость данного расчета в фундаментах зданий повышенной этажности. Определяющим для свай-РИТ является расчет по второй группе предельных состояний грунтового основания, достижение которых может привести к непригодности эксплуатационных качеств здания.

В общем случае нагрузка на сваю определяется из расчета фундамента как рамной конструкции, воспринимающей вертикальные и горизонтальные нагрузки и изгибающие моменты.

Для расчета сваи по прочности материала необходимо определить усилия в её наиболее нагруженных сечениях на различных глубинах.

Расчет по прочности свай-РИТ по предельным усилиям в соответствии с [4] требует выполнения условия:

$$F \leq F_{ult}$$

где F - усилие от внешних нагрузок и воздействий в рассматриваемом сечении сваи;

F_{ult} - усилие, воспринимаемое свайей-РИТ в этом сечении.

Расчет свай на совместное действие момента, вертикальной и горизонтальной сил производится в соответствии с положениями [5] (Приложение Д).

Наибольшие усилия в сваях-РИТ от внешних нагрузок возникают в верхней её части и зоне сопряжения с ростверком.

В соответствии с технологией изготовления свая-РИТ в верхней части имеет круглое сечение. Конструктивно арматура в сечении сваи располагается равномерно по окружности с числом стержней не менее 6. Класс бетона не ниже В25, а для свай в основании высотных зданий В30.

В общем случае железобетонную сваю следует рассматривать как внецентренно сжатый элемент с эксцентриситетом продольной силы и влиянием продольного изгиба, в котором по условиям эксплуатации в фундаментах зданий повышенной этажности не допускается образование трещин. Для зданий повышенной этажности конструктивно должно быть

обеспечено отсутствие зоны растяжения в поперечных сечениях сваи от действия внешних нагрузок.

При этом учитывается случайный эксцентриситет - e_a , обусловленный возможными факторами: переменностью поперечного сечения ствола, искривлением продольной оси сваи, возможным смещением арматуры, неоднородностью состава бетона. Кроме того, следует учитывать возможное отклонение ствола сваи от вертикального положения и вызванные этим дополнительные напряжения в материале сваи. СНиП 3.02.01-87 [6] устанавливает допустимые отклонения оси скважины от вертикали $\pm 1\%$, т.е. допускаемое смещение сваи 1 см на 1 м ее длины.

Значение общего эксцентриситета продольной силы относительно центра тяжести рассматриваемого сечения e_o определяется при статическом расчете конструкции и принимается не менее e_a .

В общем случае для расчетного сечения значения эксцентриситета принимают по формуле:

$$e_o = M/N + e_a \quad (1)$$

где M и N – расчетные значения изгибающего момента и продольной силы.

Согласно п.1.21 [5] случайный эксцентриситет e_a принимается не менее 1/30 диаметра сваи, но не менее 1/600 длины сваи от ростверка до глубины, на которой свая принимается заземленной в грунте. В [9] отмечается, что случайный эксцентриситет обусловлен различными методами бурения и его рекомендуется принимать равным 3см.

Сваи допускается рассчитывать по недеформированной схеме, учитывая влияние прогиба ствола умножением эксцентриситета e_o на коэффициент η , определяемый по [8].

Определение необходимого количества продольной арматуры, а также проверку прочности для свай-РИТ допускается производить с помощью номограммы, представленной в [2].

Учитывая, что свая находится в грунте, необходимо определять усилия в сечениях сваи и перемещения с учетом отпора грунта (рис.6).

При расчете свай грунт, окружающий сваю, характеризуется коэффициентом постели c_z , кН/м³.

Расчетное значение коэффициента постели c_z , кН/м³, грунта на боковой поверхности сваи при отсутствии опытных данных может определяться по формуле:

$$c_z = Kz, \quad (2)$$

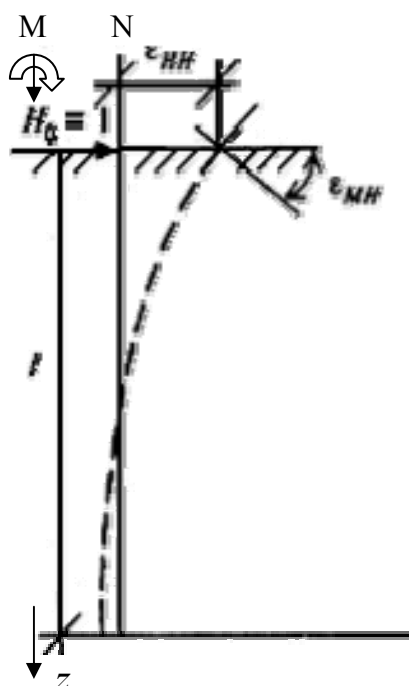


Рис.6. Схема нагрузок на сваю

где K - коэффициент пропорциональности, кН/м^4 , принимаемый в зависимости от вида грунта, окружающего сваю, по таблице Д1, представленной в [5].

z - глубина расположения сечения сваи в грунте, м, для которой определяют коэффициент постели, по отношению к подошве ростверка.

Учитывая, что для зданий повышенной этажности свайный фундамент выполняется с низким ростверком, при расчете сваи по прочности материала она рассматривается как стержень, жестко защемленный в плите ростверка и в грунте в сечении, расположенном от подошвы ростверка на расстоянии не менее l_1 , определяемом по формуле:

$$l_1 = \frac{2}{\alpha_\epsilon} \quad (3)$$

В соответствии с [5] расчетное давление σ_z , кПа, на грунт по контакту с боковой поверхностью сваи, возникающее на глубине z , а также расчетный изгибающий момент M_z , кН·м, поперечная сила Q_z , кН, продольная сжимающая сила N_z , кН, действующие на глубине z в сечении сваи, определяются по формулам:

$$\sigma_z = \frac{K}{\alpha_\epsilon} z \left(U_0 A_1 - \frac{\psi_0}{\alpha_\epsilon} B_1 + \frac{M_0}{\alpha_\epsilon^2 EI} C_1 + \frac{H_0}{\alpha_\epsilon^3 EI} D_1 \right); \quad (4)$$

$$M_z = \alpha_\epsilon^2 EI U_0 A_3 - \alpha_\epsilon EI \psi_0 B_3 + M_0 C_3 + \frac{H_0}{\alpha_\epsilon} D_3; \quad (5)$$

$$Q_z = \alpha_\epsilon^3 EI U_0 A_4 - \alpha_\epsilon^2 EI \psi_0 B_4 + \alpha_\epsilon M_0 C_4 + H_0 D_4; \quad (6)$$

$$N_z = N, \quad (7)$$

где A_1, B_1, C_1 и D_1 ; A_3, B_3, C_3 и D_3 ; A_4, B_4, C_4 и D_4 - коэффициенты, значения которых принимаются по таблице Д2, представленной в [5].

N – расчетная осевая нагрузка, кН, передаваемая на голову сваи;
 H_0 и M_0 – расчетные значения соответственно поперечной силы, кН, и изгибающего момента, кН·м, в рассматриваемом сечении сваи, принимаемые равными $H_0 = H$ и $M_0 = M$;
 H и M – расчетные значения поперечной силы, кН, и изгибающего момента, кН·м, действующие на голову сваи;
 U_0 и ψ_0 – горизонтальное перемещение, в м, и угол поворота поперечного сечения сваи, в рад, в уровне подошвы ростверка;
 α_ε – коэффициент деформации, 1/м;
 EJ – изгибная жесткость сваи, Н·м²;
 E – начальный модуль упругости бетона сваи при сжатии, кПа;
 J – момент инерции поперечного сечения сваи, м⁴.

Следует отметить, что в [5] продольная сила N_z принимается одинаковой по длине сваи, тогда, как свая-РИТ передает часть продольной силы на грунт за счет трения по боковой поверхности с учетом камуфлетных уширений по высоте сваи. Важность учета данного фактора при определенных условиях позволяет значительно снизить процент армирования сваи в нижней ее части. С учетом этого, формулу (7) рекомендуется записать в следующем виде:

$$N_z = N - \gamma'_f u \sum_{z_0}^z f_i h_i \quad (8)$$

где N_z – нормальная сила в сечении сваи на глубине z ;

γ'_f – коэффициент условий работы боковой поверхности свай-РИТ, в этом случае рекомендуется принимать $\gamma'_f = 0,8$;

u – периметр поперечного ствола сваи по буровому диаметру, м;

f_i – расчетное сопротивление трения боковой поверхности сваи, принимается по таблицам в [5] или в [3];

h_i – толщина i -го слоя грунта соприкасающегося с боковой поверхностью сваи, м, начиная от подошвы ростверка до глубины z ;

z_0 – начальная координата, от которой учитывается влияние сил трения от подошвы ростверка, в частном случае $z_0 = 0$.

На рис.7 показана эпюра нормального давления на сваю в конкретных инженерно-геологических условиях одного из объектов, строящегося в г.Москве. Расчет эпюры выполнен по формуле (8).

Проведенный анализ инженерно-геологических условий г. Москвы [1] показывает, что в сваях-РИТ, применяемых в данных условиях, возможно значительное снижение продольного усилия в нижней части сваи.

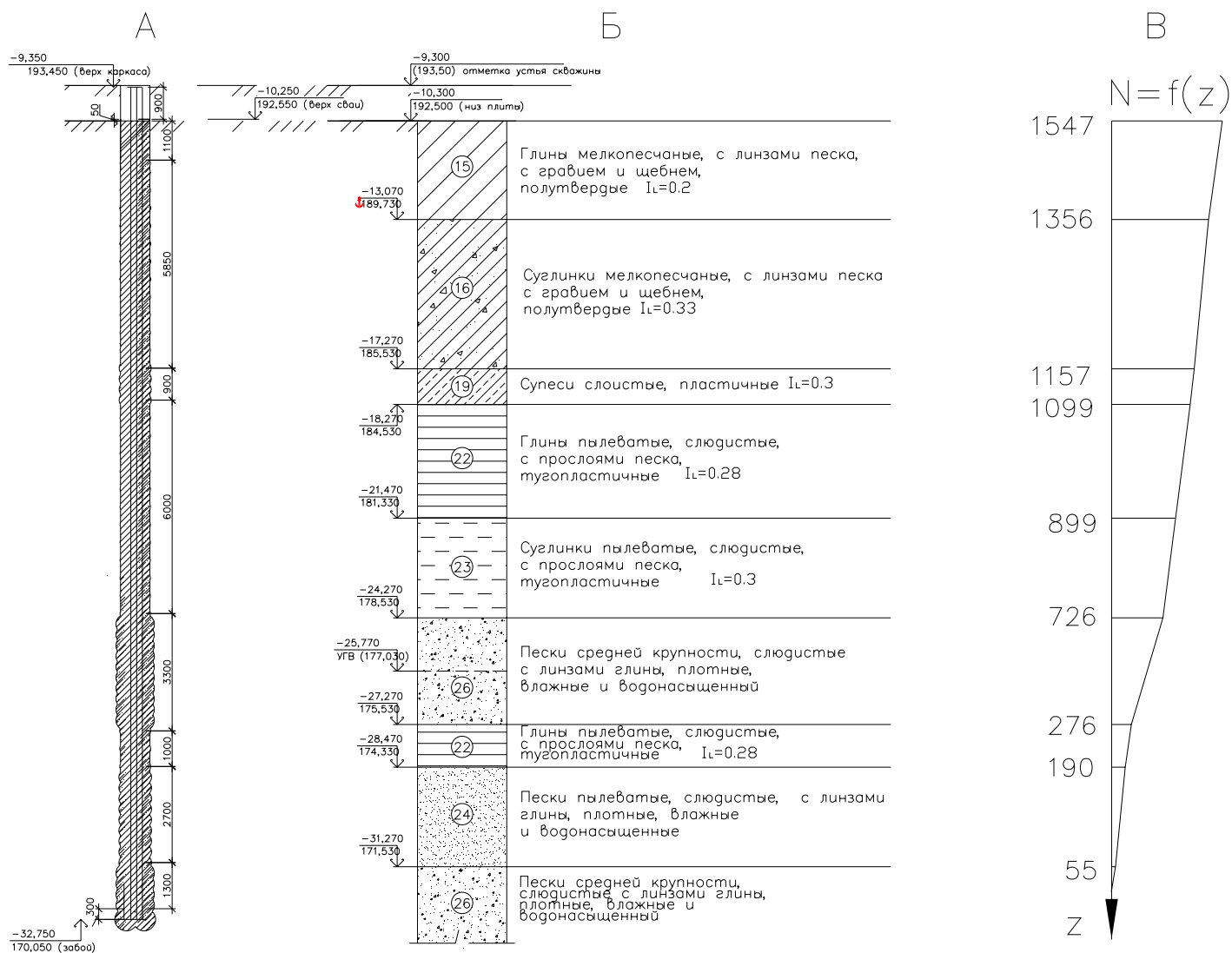


Рис. 7. Снижение продольной силы N по глубине сваи.

А – расчетная схема сваи РИТ; Б – инженерно-геологические условия площадки; В – эпюра нормального давления на сваю-РИТ по глубине, кН.

Для определения сопротивления грунта на боковой поверхности сваи при наличии в пределах длины сваи нескольких слоев грунта рекомендуется пользоваться одним приведенным значением коэффициента пропорциональности K , принимаемым в зависимости от вида грунтов, расположенных до глубины l_K , м, от подошвы ростверка.

$$l_K = 3,5d + \Delta, \quad (9)$$

где d - диаметр сечения сваи, м, принимается по диаметру бурения;
 Δ - коэффициент, принимаемый равным 1,5 м.

Учитывая, что верхняя часть ствола сваи-РИТ на длине около 2 м не обрабатывается электровзрывами, коэффициент пропорциональности на этом участке принимается как для буровых свай. На участке, подвергнутом РИТ-обработке, коэффициент пропорциональности принимается как для забивных свай.

Если в пределах глубины l_K расположено два слоя грунта или грунты обработанные электровзрывами, то приведенное значение K определяется по формуле:

$$K = \frac{K_I l_I (2l_K - l_I) + K_{II} (l_K - l_I)^2}{l_K^2}, \quad (10)$$

где l_I - толщина первого (верхнего) слоя грунта, м;

K_I и K_{II} - коэффициенты пропорциональности, принимаемые как для буровых свай в грунтах I и II слоев; допускается учитывать влияние РИО и принимать K , как для забивных свай по таблице Д1 Приложения Д, представленной в [5].

Расчеты свай по предельным состояниям выполняются с использованием значения приведенной глубины расположения сечения сваи в грунте $\bar{z}$, определяемой по формуле:

$$\bar{z} = \alpha_\varepsilon z \quad (11)$$

где z - действительная глубина расположения сечения сваи в грунте (см. ф-лу (4)), соответственно отсчитываемая от подошвы ростверка, м;

α_ε - коэффициент деформации, 1/м, определяемый по формуле:

$$\alpha_\varepsilon = \sqrt[3]{\frac{K b_p}{EI}}, \quad (12)$$

где K - коэффициент пропорциональности, определяемый по таблице, представленной в [5];

b_p - условная ширина сваи, м, принимаемая для верхнего сечения свай-РИТ

$$b_p = (1,5d + 0,5) \text{ м}; \quad (13)$$

d - диаметр сваи по диаметру скважины в плоскости, перпендикулярной действию нагрузки, м;

E - начальный модуль упругости бетона сваи при сжатии и растяжении, кПа;

I - момент инерции поперечного сечения сваи, м⁴.

После определения усилий M , N и H необходимо вычислить значение эксцентриситета по формуле (1).

Влияние прогиба ствола сваи на увеличение эксцентриситета учитывается умножением эксцентриситета e_o на коэффициент η , который определяется по формуле:

$$\eta = \frac{1}{1 - N / N_{\varepsilon\delta}}; \quad (14)$$

где, условная критическая сила $N_{\varepsilon\delta}$ определяется по [8] для мелкозернистого бетона группы Б при отсутствии преднапряжения:

$$N_{\varepsilon\delta} = \frac{5.6 A_b}{l_o^2} \left[\frac{J}{\varphi_l} \left(\frac{0.11}{0.1 + \delta_e} + 0.1 \right) + \alpha J_s \right] \quad (15)$$

где $\alpha = E_s / E_b$;

E_s - модуль упругости арматуры, МПа;

E_b - модуль упругости бетона, МПа; принимается по таблице, представленной в [8];

l_0 - расчетная длина участка внецентренно сжатой сваи, защемленной в ростверке и в слое грунта на глубине $l_1 = \frac{2}{\alpha_\epsilon}$;

J - момент инерции поперечного сечения сваи, м⁴;

J_s - момент инерции сечения арматуры относительно центра тяжести сечения сваи;

φ_1 - коэффициент, учитывающий влияние длительного действия нагрузки на прогиб элемента в предельном состоянии, равный:

$$\varphi_1 = 1 + \beta \frac{M_1}{M}, \quad (16)$$

но не более $1 + \beta$

здесь β - коэффициент, принимаемый в зависимости от вида бетона по таблице, представленной в [8] (для мелкозернистого бетона группы Б $\beta = 1,5$);

M - момент относительно наименее сжатой грани сечения от действия постоянных, длительных и кратковременных нагрузок;

M_1 - то же, от действия постоянных и длительных нагрузок;

Допускается принимать $\varphi_1 = 1 + \beta = 2,5$

δ_ϵ - коэффициент, принимаемый равным e_0 / h , но не менее

$$\delta_{\epsilon, \min} = 0,5 - 0,01 \frac{l_0}{h} - 0,01 R_b; \quad (17)$$

здесь $h = d$; R_b - в МПа.

Для мелкозернистого бетона группы А вместо значения 5,6 в формулу (15) подставляется значение 6,4.

Проверка прочности сечения нормального к продольной оси внецентренно сжатого железобетонного элемента (сваи-РИТ) в соответствии с [2] производится из условия:

$$\eta N_{\epsilon 0} \leq \frac{2}{3} R_b A_r \frac{\sin^3 \pi \xi_{\text{сж}}}{\pi} + R_s A_{s, \text{сж}} \left(\frac{\sin \pi \xi_{\text{сж}}}{\pi} + \varphi \right) F_s, \quad (18)$$

где r - радиус поперечного сечения;

R_b - расчетное сопротивление бетона осевому сжатию для первой группы предельных состояний;

R_s - расчетное сопротивление арматуры сжатию для первой группы предельных состояний;

A - площадь всего бетона в поперечном сечении, м²;

$\xi_{\text{сж}}$ - относительная площадь сжатой зоны бетона, определяемая следующим образом:

при выполнении условия

$$N \leq 0,77 R_b A + 0,645 R_s A_{s,tot} \quad (19)$$

из решения уравнения

$$\xi_{cir} = \frac{N + R_s A_{s,tot} + R_b A \frac{\sin 2\pi \xi_{cir}}{2\pi}}{R_b A + 2,55 R_s A_{s,tot}}; \quad (20)$$

при невыполнении условия (2.27) - из решения уравнения

$$\xi_{cir} = \frac{N + R_b A \frac{\sin 2\pi \xi_{cir}}{2\pi}}{R_b A + R_s A_{s,tot}}; \quad (21)$$

φ - коэффициент, учитывающий работу растянутой арматуры и принимаемый: при выполнении условия (19) $\varphi = 1,6(1 - 1,55\xi_{cir})\xi_{cir}$, но не более единицы; при невыполнении условия (19) $\varphi = 0$;

$A_{s,tot}$ - площадь сечения всей продольной арматуры;

r_s - радиус окружности, проходящей через центры тяжести стержней продольной арматуры.

Проверка прочности, а также определение необходимого количества продольной арматуры для свай-РИТ производится с использованием формул:

$$\eta Ne_0 \leq \alpha_m R_b Ar; \quad (22)$$

$$A_{s,tot} = \alpha_s \frac{R_b A}{R_s}, \quad (23)$$

где значения α_m и α_s определяются по номограмме, представленной в [2] в зависимости от значений: $\alpha_s = \frac{R_s A_{s,tot}}{R_b A}$ и $\alpha_m = \frac{Ne_0 \eta}{R_b Ar}$, а также $\alpha_n = \frac{N}{R_b A}$.

Для увеличения несущей способности сваи можно увеличить её диаметр или применить дополнительно жесткое армирование стальным прокатным элементом (труба, двутавр и т.д.) при значительной величине эксцентриситета в верхней части сваи.

В качестве примера выполнена оценка несущей способности по материалу свай-РИТ длиной 20,5 м диаметром 0,32 м в инженерно-геологических условиях г Москвы, представленных на рис.7. Материалом сваи служит мелкозернистый бетон группы Б класса В25 с рабочей арматурой класса А500С (6 стержней диаметром 25 мм). В результате расчета определено, что расчетная нагрузка на сваю по материалу составляет 1547 кН при эксцентриситете 2,75 см, что существенно ниже несущей способности сваи по грунту, составляющей 2247 кН в данных инженерно-геологических условиях. Анализ показывает, что в нижних сечениях сваи продольное усилие существенно снижается.

Заключение:

1. Имеется положительный опыт использования свай-РИТ в свайно-плитных фундаментах зданий повышенной этажности в г. Москве.
2. Анализ инженерно-геологических условий г. Москвы позволяет ожидать значительного уменьшения продольного усилия в сваях-РИТ за счет трения по боковой поверхности с учетом камуфлетных уширений по высоте свай.
3. С учетом вышеизложенного возможно снижение процента армирования в нижней части свай-РИТ.

Литература:

1. *Временные технические указания по расчету, проектированию и производству работ по свайным фундаментам зданий и сооружений в г. Москве.* М., 1988.
2. *Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения арматуры (к СНиП 2.03.01-84*).*
3. *СНиП 2.02.03-85 Свайные фундаменты*
4. *СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения*
5. *СП. 50 102-2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов.* М., 2004.
6. *СНиП 3.02.01-87 Земляные сооружения, основания и фундаменты*
7. *МГСН 2.07-01 «Основания, фундаменты и подземные сооружения».*
8. *СНиП 2.03.01-84* в настоящее время (с 01.03.04 г.) отменен, однако положения, изложенные в нем, проверены 20-ти летним опытом его практического применения, поэтому требования к проектированию железобетонных конструкций, не противоречащие СНиП 52-0-2003 и СП 52-101-2003, могут быть использованы при проектировании свай-РИТ.*
9. *Рекомендации по применению буроинъекционных свай.* М., НИИОСП им. Герсеева, 2001, 115с.
10. *Кубецкий В.Л. Еремин В.Я. (НИИМосстрой.)*