DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.09

УДК 624.154

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БАРРЕТ С ОСНОВАНИЕМ С УЧЕТОМ ИХ РАЗМЕРА И ФОРМЫ

В.В. Сидоров, К.Ю. Степанищев

Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет, Москва, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 01 июня 2017

Принята: 25 июля 2017

Опубликована: 29 сентября 2017

Ключевые слова:

баррета, зона влияния, несущая способность, форма, поперечное сечение, осадка

АННОТАЦИЯ

В связи с ростом количества строящихся высотных зданий в последнее время инженеры-геотехники сталкиваются с необходимостью выбора и обоснования фундаментов, воспринимающих нагрузки на основание немногим меньше 1 МПа. Этим обусловлено широкое применение фундаментов глубокого заложения из свай различной формы, в том числе баррет. Способные нести большие вертикальные и горизонтальные нагрузки, барреты нашли широкое применение во многих странах. Однако исследования особенностей их работы по сравнению с традиционными сваями сильно отстают от практики. В основном это связано с дороговизной и трудоемкостью проведения натурных экспериментов с данным видом фундаментов. В связи с этим в настоящее время исследования останавливаются на получении несущей способности, осадке и мобилизации сил сопротивления на поверхностях, которые получают с помощью датчиков, устанавливаемых на опытных барретах. Вместе с тем остаются интересными и малоизученными вопросы о взаимодействии баррет с грунтом на расстоянии от боковых поверхностей (проблемы влияния), выбора оптимальной формы (соотношения сторон), шага расстановки по двум направлениям, концентрации напряжений в угловых зонах. Такие задачи можно и нужно решать численными методами для получения качественных результатов, что впоследствии приводит уже к вещественной экономии на практике. ПК PLAXIS 3D позволяет успешно решать названные задачи и составлять алгоритмы для приближения проектных решений к оптимальным.

В статье представлены ход и результаты многочисленных конечно-элементных расчетов, направленных на изучение взаимодействия одиночной барреты и баррет в группе с основанием. Получены зоны влияния одиночной барреты по торцам, что позволяет принимать более эффективное их расположение в плане в составе фундамента, что показано путем решения тестовых задач, близких к реальным проектам.

© ПНИПУ

© **Сидоров Виталий Валентинович** – кандидат технических наук, доцент, e-mail: vitsid@mail.ru.
Степанищев Константин Юрьевич – магистрант, e-mail: stepanishchev2013@yandex.ru.

Vitalii V. Sidorov – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: vitsid@mail.ru.
Konstantin Iu. Stepanishchev – Master Student, e-mail: stepanishchev2013@yandex.ru.

STUDY OF INTERACTION BETWEEN BARRETTES AND SOIL BASE CONSIDERING THEIR SIZES AND SHAPES

V.V. Sidorov, K.Iu. Stepanishchev

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 01 June 2017

Accepted: 25 July 2017

Published: 29 September 2017

Keywords:

barrette, interaction zone, bearing capacity, shape, cross section, settlement

ABSTRACT

In case of an intensifying production of high-rise buildings, geotechnical engineers often face design problems related to high loaded soil bases with a load up to 1 MPa. This is the reason of a widespread use of deep foundations made of various shape piles including barrettes. Barrettes have become commonly used in many countries, as they are able to bear large vertical and horizontal loads. However, unlike the traditional piles, the studies of barrettes operational characteristics are far behind practice. This is mainly due to a high cost and complexity of full-scale experiments regarding this type of foundation. Therefore, in present investigations the researchers focus on studying the bearing capacity, settlement and mobilization of the shear forces on side surfaces that are obtained via sensors installed on the experimental barrettes. However, there are interesting and understudied questions about the interaction of barrettes with the soil at a distance from the side surfaces (the interaction problem), choosing an optimal shape (aspect ratio), placement pitch in two directions, and stress concentration in the corner areas. These problems can and must be solved by numerical methods to obtain high-quality results that can subsequently lead to real cost-cutting results. Finite element computer applications like PLAXIS 3D allow to successfully solve the aforementioned problems and make algorithms in order to produce optimal design solutions.

The article presents the course and results of numerous finite element calculations to study the interaction of a single and group barrette with its soil base. It became possible to determine the interaction zones of a single barrette along short and long sides, which allowed gaining a more efficient location of them in terms of the composition of the foundation. The results are shown by solving the test problems similar to real projects.

© PNRPU

Введение

При проектировании фундаментов высотных зданий особое внимание уделяется обеспечению их соответствия требованиям норм по существующим группам предельных состояний. Однако это не всегда позволяет рационально использовать элементы данных фундаментов, а соответственно, приводит к ненужному перерасходу материалов и в целом к увеличению сроков строительства.

В настоящее время в большинстве случаев в качестве фундаментов глубокого заложения под высотные комплексы применяются фундаменты, выполненные из буровых свай большого диаметра или баррет [1–3]. Это оправдано, поскольку данные фундаменты способны воспринимать большие нагрузки, нехарактерные для обычного строительства, для которого написано большинство норм и современной литературы.

Барреты как альтернативный вариант буровым сваям или опорам используются на многих уникальных объектах по всему миру и показывают достаточно высокие результаты на стадии проектирования, при испытаниях [4, 5], а также при эксплуатации зданий и сооружений. Несмотря на широкое применение баррет в качестве фундаментов глубокого заложения под здания повышенной ответственности, осталось достаточно много неизученных вопросов о правильной оценке НДС грунтового массива при взаимодействии с элементами барретных фундаментов. Более точное прогнозирование и проектирование данных фундаментов помогут сделать их более экономичным, экологичным, сократить время- и трудозатраты для достижения необходимого результата, что порой является приоритетной целью.

В связи с вышеизложенным возникает необходимость в совершенствовании методов расчета и конструирования барретных фундаментов с учетом взаимодействия с окружающим грунтовым массивом и характерными особенностями, присущими для баррет, – формой элементов и их шагов в группе.

1. Взаимодействие одиночных баррет разных длин с однородным грунтовым основанием

Первой проблемой в рассмотрении особенностей работы баррет с основанием является вопрос о том, влияет ли изменение формы баррет в плане соотношения сторон на напряженно-деформированное состояние (НДС) при взаимодействии с грунтом [6, 7], не падает ли эффективность применения баррет с ростом их длины. Для ответа на него было выполнено численное моделирование массива грунта с отдельными элементами барретных фундаментов разных длин. Расчеты выполнялись с применением ПК PLAXIS 3D, позволяющего в объемной постановке подробно и качественно описать решения поставленных задач.

Расчетная область подбиралась таким образом, чтобы исключить влияние торцевых и боковых стенок барреты от действия приложенной на поверхность элемента нагрузки на ее границы, где при соблюдении граничных условий перемещения грунтового массива должны сводиться к нулю. Исходя из размеров баррет, габариты расчетной области в плане составили 30×30 м.

В качестве однородного грунтового массива грунта был принят песок средней крупности в сухом состоянии с определенными по таблице Б.1 приложения Б СП 22.13330.2011 прочностными и деформационными характеристиками: $\varphi = 35^\circ$, $c = 1$ кПа, $E = 30$ МПа и $\nu = 0,3$. Удельный вес принимался $\gamma = 18$ кН/м³.

Исследуемыми элементами, как уже было сказано выше, являлись барреты различного поперечного сечения. Рассматривались барреты толщиной 0,8 м, глубиной 30 м и длиной от 2,8 до 9,8 м.

Для решения поставленной задачи по изучению влияния формы на изменение НДС грунтового массива было выполнено шесть численных расчетов для отдельных баррет, имеющих разные длины. Нагрузка на поверхность баррет определялась предварительным численным моделированием «исходной» барреты толщиной 0,8 м и длиной 2,8 м и составила 17 920 кН или 8000 кПа.

Нагрузка прикладывалась на оголовок одиночной барреты в виде распределенной нагрузки. С увеличением сечения барреты нагрузка возрастала пропорционально изменению ее длины и, соответственно, распределялась на большую площадь.

В таблице приведены исходные данные, используемые в процессе проведения численного моделирования для баррет разного поперечного сечения в однородном грунтовом основании.

Исходные данные для расчета
Initial data for calculation

Номер расчета	Толщина t , м	Длина l , м	Глубина H , м	Площадь S^* , м ²	Периметр P , м	Сосредоточенная нагрузка N , кН	Распределенная нагрузка P , кПа
1	0,8	2,8	30	2,24	7,2	17 920	8000
2	0,8	4,2		3,36	10	26 880	
3	0,8	5,6		4,48	12,8	35 840	
4	0,8	7		5,6	15,6	44 800	
5	0,8	8,4		6,72	18,4	53 760	
6	0,8	9,8		7,84	21,2	62 720	

Нагрузка подбиралась таким образом, чтобы достичь состояния условного «срыва», характеризующегося неограниченным развитием деформаций в основании барреты за счет мобилизации трения по боковым поверхностям и превышения реактивного давления грунта под пятой барретой [8, 9]. Данный факт свидетельствует об образовании зон предельного равновесия (пластических точек) и возникновении на контакте «баррета – грунт» предельных касательных напряжений по всему периметру барреты, описываемых известным законом Кулона $\tau^* = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c$ (поскольку в данной работе однородное основание представлено песком средней крупности, то формула записывается без учета удельного сцепления, т.е. $c = 0$).

Для сопоставления и анализа данных, полученных в ходе численного моделирования, был построен общий график зависимости нагрузки от вертикальных перемещений, который включает в себя результаты проведенных численных исследований для баррет разных длин, указанные выше. График состоит из шести кривых, наложенных на общие оси ($S - P$), и позволяет качественно оценить поведение баррет разных форм под нагрузкой. В качестве предельных нагрузок на оголовки баррет были приняты нагрузки, соответствующие осадке, равной 40 мм, согласно п. 7.3.5 СП 24.13330.2011. Общий график зависимости нагрузки от вертикальных перемещений, полученных по результатам численного моделирования в ПК PLAXIS 3D, для баррет разного поперечного сечения представлен на рис. 1.

Рис. 1. Общий график зависимости нагрузки от вертикальных перемещений, полученных по результатам численного моделирования в ПК PLAXIS 3D для баррет различного поперечного сечения

Fig. 1. General graph of dependence between the from vertical displacements (obtained by FEM solution in PLAXIS 3D) for barrettes with different cross-sections

На графике хорошо видно, что с увеличением длины элементов модели их способность воспринимать нагрузку возрастает, что говорит об увеличении общей несущей способности баррет за счет более развитых боковых поверхностей, а также большей площади опирания на грунтовое основание. Однако необходимо отметить, что увеличение длины, а следовательно, и возрастание общей несущей способности одиночных баррет не снижают прирост деформаций грунта, наоборот, по мере роста длины барреты они увеличивают-

ся (осадка одиночной барреты с размерами поперечного сечения $0,8 \times 2,8$ м составила 22 мм, а для барреты с габаритами $0,8 \times 9,8$ м – 50 мм при одинаковом значении распределенной нагрузки, равной 4800 кПа, приложенной к поверхности баррет разной площади).

Анализируя представленный на рис. 1 график, можно сделать вывод, что увеличение поперечного сечения барреты, а именно длины элемента, не оказывает предполагаемого эффекта, и с кратным возрастанием ее длины (в данном случае на 1,4 м) не происходит пропорционального увеличения несущей способности барреты.

Следовательно, для восприятия нагрузок, характерных для баррет больших длин, нет необходимости в устройстве длинных секций баррет, напоминающих форму всем известной «стены в грунте». Несущую способность данных секций можно обеспечить, представив их в виде отдельных элементов, расположенных с определенным шагом по направлению «стенки» и в сумме способных обеспечить требуемую несущую способность, сравнимую либо равную длинным секциям баррет.

На основании полученных выводов был сформирован алгоритм по проектированию и оптимизации барретного фундамента с точки зрения ограничения длины элементов.

2. Взаимодействие элементов барретного фундамента в зависимости от шага баррет в однослойном основании

Вторым вопросом, рассматриваемым в статье, является проблема взаимодействия отдельных баррет в группе. В настоящее время вопросы расстановки свай достаточно изучены [10, 11], и имеют подтверждения экспериментальными, численными и аналитическими методами исследований. Изучением НДС свайных фундаментов занимались такие ученые, как Е.Э. Девальтовский, Н.З. Готман, В.В. Знаменский [12], Н.М. Дорошкевич, J. Hanisch, R. Katzenbach [13] и др. Отражения данных исследований включены в соответствующие нормативные документы и применяются при строительстве зданий и сооружений. В отечественных нормах указан пункт (п. 8.13 СП 24.13330.2011), в соответствии с которым расстояние между осями забивных и вдавливаемых свай должно составлять не менее $3d$ (где d – диаметр круглого или сторона квадратного, или большая сторона прямоугольного поперечного сечения ствола сваи), между осями свай-стоек – не менее $1,5d$. В то же время расстояние в свету между стволами буровых, набивных свай и свай-оболочек должно быть не менее 1,0 м.

С целью изучения вопроса, посвященного исследованию напряженно-деформированного состояния однородного грунтового массива при взаимодействии с элементами барретного фундамента в зависимости от шага баррет, были произведены серии расчетов при разном расстоянии в свету между барретами. Учитывая геометрические характеристики баррет, а именно наличие четырех отдельных поверхностей, взаимодействующих с грунтовым массивом, было решено провести численное моделирование для торцевых и боковых поверхностей баррет, чтобы учесть шаг в продольном и поперечном направлениях.

В качестве «исходных» баррет были приняты барреты с размерами поперечного сечения $0,8 \times 2,8$ м и длиной 30 м. Рассматривались две барреты, расположенные на определенном расстоянии друг от друга и заглубленные в однослойный грунтовой массив размерами 30×30 м, представленный песком средней крупности.

На поверхность каждой из баррет прикладывалась равномерно распределенная нагрузка, равная по величине и соответствующая значению 5000 кПа. Отметим, что при постановке данной задачи не учитывалось наличие ростверка над оголовками баррет, т.е. барреты рассматривались как отдельные элементы барретного фундамента.

Изначально для сопоставления данных, полученных по результатам численного моделирования для баррет, расположенных с разным шагом, были выполнены расчеты одиночной «исходной» барреты. Результаты расчета показали, что осадка одиночной барреты составила 23,2 мм.

Для проведения численного моделирования для группы баррет за наименьшее расстояние в свету между элементами принималось расстояние, равное толщине меньшей боковой поверхности, являющейся торцом барреты. При дальнейшем описании расстановки баррет будет применяться термин «расстояние в свету», характерный для буровых свай и опор, с переводом в условные диаметры d (зоны уплотнения). С одной стороны, это оправдано, поскольку барреты устраиваются по месту в глубоких траншеях под защитой бентонитового раствора и не оказывают значительного влияния на окружающий массив грунта (например, по сравнению с забивными или вдавливаемыми сваями). В то же время необходимо учитывать тот факт, что при передаче эксплуатационных нагрузок на оголовки баррет вдоль элементов образуются обширные зоны уплотненного грунта (за счет развитых боковых поверхностей и их способности включать в работу наибольшее количество грунта), которые с удалением от поверхностей барреты уменьшаются.

Сравнение изополей перемещений и значений, полученных численным методом (рис. 2, 3), показывают различный характер влияния элементов модели на напряженно-деформированное состояние грунтового массива при их взаимодействии в зависимости от расположения. На рисунках хорошо видно, что при расстояниях от 0,8 до 8,8 м в поперечном и продольном (торцевом) направлениях происходит наложение областей деформаций грунта вдоль боковой поверхности и под острием баррет. При увеличении расстояния между барретами до 9,6 м влияние интенсивных областей ослабевает и происходит расхождение зон деформирования грунта, свидетельствующее о схожем характере работы баррет в группе с одиночной барретой [14, 15].

Рис. 2. Изополя вертикальных перемещений грунтового массива для баррет сечением $0,8 \times 2,8$ м в поперечном (относительно торцевой стороны) направлении при расстоянии между ними в свету 0,8 м (а) и 11,2 м (б)

Fig. 2. Isofields of vertical displacements of the soil massif with 0.8×2.8 m barrettes that are placed with a pitch of 0.8 m (a) and 11.2 m (b) in transverse direction with respect to the side surface

Рис. 3. Изополя вертикальных перемещений грунтового массива для баррет сечением $0,8 \times 2,8$ м в продольном (относительно длинной стороны) направлении при расстоянии между ними в свету $0,8$ м (а) и $11,2$ м (б)

Fig. 3. Isofields of vertical displacements of soil massif for barrettes with a 0.8×2.8 m cross-section that are placed with a pitch of 8 m (a) and 11.2 m (b) in the longitudinal direction with respect to the long side

По результатам расчетов был построен график зависимости влияния расстояний между барретами к величине осадки, основанный на полученных численных данных, при расположении баррет в составе группы в поперечном и продольных направлениях (рис. 4).

Рис. 4. График зависимости вертикальных перемещений грунтового массива от расстояний между барретами в свету при расположении баррет в продольном и поперечном направлениях

Fig. 4. The graph of dependences between vertical displacements of the soil massif and the distances for barrettes located in different directions, i.e. transverse (blue line) and longitudinal (red line) directions

На графике видно, что по мере увеличения расстояния между элементами модели происходит уменьшение величины осадки. Особенно это заметно при расстановке баррет в поперечном направлении, т.е. относительно длинной стороны барреты, где в интервале от $0,8$ до

4,8 м наблюдается значительное снижение деформаций. При дальнейшем увеличении расстояний между барретами происходит постепенная стабилизация осадок, значения вертикальных перемещений уменьшаются и располагаются в более длинном диапазоне перемещений.

Анализируя полученные результаты расчета, представленные в виде графиков и изополей вертикальных перемещений однослойного грунтового массива, вмещающего элементы модели в виде баррет, можно прийти к выводу, что при совпадении осадок барреты, расположенной в поперечном и продольном направлениях, а именно при достижении «общей» осадки (точка пересечения двух кривых), зона влияния по торцевой и длинной части барреты будет одинаковой и составит от 8,8 до 9,6 м, что подтверждается качественными данными, приведенными выше на рис. 2, 3. Если данные значения перевести в условные диаметры d (зоны уплотнения), характерные при описании свай, и, учитывая прямоугольную форму элементов, в качестве диаметра принять меньшую (торцевую) сторону барреты, то получится, что при шаге между осями, равном от 2 до $11d$, будет происходить взаимное влияние элементов барретного фундамента друг на друга, что соответствует работе баррет в составе группы (кустовой эффект). При увеличении шага до $12\text{--}13d$ влияние между элементами ослабевает и постепенно рассеивается, следовательно, они начинают работать как одиночные.

Таким образом, качественно подтверждается гипотеза о том, что для барретного фундамента значительно выгоднее применять отдельные «короткие» элементы вместо «длинных» стеновых. Это можно дополнительно проиллюстрировать расчетами тестовой задачи взаимодействия фундамента высотного здания из длинных в плане баррет и баррет ограниченной длины. На фундаменты была приложена одинаковая нагрузка интенсивностью 5000 кПа по всей площади плиты ростверка. Результаты (рис. 5) показали практически одинаковую осадку фундаментов при значительной экономии материала.

Рис. 5. Изополя вертикальных перемещений основания, взаимодействующего с фундаментом из длинных в плане и коротких баррет

Fig. 5. Isosurfaces of vertical displacements of the soil base in case of interaction between the foundation from long and short barrettes

Выводы

Качественные результаты проведенных расчетов позволяют прийти к следующим выводам:

1. Имеет место существенное различие в характере передачи нагрузки на оголовки баррет, имеющих различное поперечное сечение, а именно длину элементов. Одиночные барреты, представленные в виде длинных стенок, обеспечивают сравнимую либо равную несущую способность при сравнении с суммарной несущей способностью отдельных элементов, расположенных на определенном расстоянии по направлению стенки. Увеличение поперечного сечения отдельных (исходных) баррет или их количества по длине секции не оказывает положительного результата и требует использования дополнительных материалов для обеспечения общей несущей способности системы «баррета – грунт».

2. Определена предварительная зона влияния элементов в составе барретного фундамента для однородного грунтового основания в зависимости от характера поведения баррет под нагрузкой. Сравнение изополей вертикальных перемещений грунтового массива для двух нагруженных баррет показывает одинаковое распространение зон взаимного влияния элементов при расположении в продольном и поперечном направлениях вне зависимости от формы поперечного сечения элементов.

3. Несущая способность грунтового основания, вмещающего длинные стенки баррет, будет сравнима либо равна общей несущей способности системы, взаимодействующей с отдельными элементами барретного фундамента, при оптимальном расхождении деформаций и количестве элементов, расположенных с определенным шагом по длине секции в однородном грунтовом массиве.

Библиографический список

1. Опыт оптимизации стоимости фундаментов высотных зданий / Р. Каценбах, Ш. Леппла, М. Фоглер, Р.А. Дунаевский, Х. Куттиг // Жилищное строительство. – 2010. – № 5. – С. 7–13.
2. Ishihara K. Recent advances in pile testing and diaphragm wall construction in Japan // Geotechnical Engineering. – 2010. – № 41. – P. 97–122.
3. Шулятьев О.А. Основания и фундаменты высотных зданий. – М.: Изд-во АСВ, 2016. – 392 с.
4. O-cell testing and FE Analysis of 28m deep barrette in Manila, Philippines / B.H. Fellenius, A. Altaee, R. Kulesza, J. Hayes // Journal of Geotechnical and Environmental Engineering. American Society of Civil Engineering. – 1999. – Vol. 125, № 7. – P. 566–575.
5. Shulyatev O.A., Dzagov A.M., Bokov I.A. Correction of soil design parameters for the calculation of the foundation based on the results of barrettes static load test // Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Paris, 2013.
6. Hamza M., Ibrahim M.H. Base and shaft grouted large diameter pile and barrettes load tests // Proceedings Geotech – Year 2000, Developments in Geotechnical Engineering. – Bangkok, Thailand, 2000. – Vol. 2. – P. 219–228.
7. Ho K. Behaviour of the instrumented trial barrette for the Hang Seng Bank Headquarters Building // Spec. Proj. Report SPR 12/93, Geotechnical Engineering Office, Department of Civil Engineering. – Hong Kong, 1993.

8. Шулятьев О.А., Боков И.А. Особенности взаимодействия свай с грунтом и между собой в условиях свайного поля // Вестник НИЦ «Строительство». – 2014. – № 10. – С. 166–176.
9. Mangushev R.A. Analytical and field evaluation of the bearing capacity of deep piles and barrettes in soft soil at St. Petersburg // Architecture and Engineering. – 2016. – Vol. 1, № 1. – P. 54–59.
10. Готман Н.З. Определение параметров сплошного свайного поля из забивных свай // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2003. – № 2. – С. 2–6.
11. Бахолдин Б.В., Джантимиров Х.А., Разводовский Д.Е. Несущая способность свай в кусте // Свайные фундаменты. – М.: Стройиздат, 1991. – С. 41–44.
12. Знаменский В.В., Рузаев А.М. К вопросу об оптимизации проектирования свайных фундаментов // Вестник Моск. гос. строит. ун-та. – 2010. – № 1. – С. 511–515.
13. Дорошкевич Н.М., Знаменский В.В., Кудинов В.И. Инженерные методы расчета свайных фундаментов при различных схемах их нагружения // Вестник Моск. гос. строит. ун-та. – 2006. – № 1. – С. 119–132.
14. Lei G. Behaviour of excavated rectangular piles (barrettes) in granitic saprolites // Department of Civil Engineering Hong Kong University of Science and Technology. Clear Water Bay. – Kowloon, Hong Kong, 2001.
15. Чунниг Ф., Швайгер Х.В., Фрелих К. Трехмерный конечно-элементный анализ фундамента глубокого заложения на прямоугольных сваях-барретах // Геотехника. – 2012. – № 1. – С. 38–52.

References

1. Katsenbakh R., Leppla Sh., Fogler M., Dunaevskii R.A., Kuttig Kh. Opyt optimizatsii stoimosti fundamentov vysoknykh zdaniy [Experience in cost optimizing of the high-rise buildings foundations]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2010, no. 5, pp. 7-13.
2. Ishihara K. Recent advances in pile testing and diaphragm wall construction in Japan. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 2010, vol. 41, no. 3, pp. 1-43.
3. Shuliat'ev O.A. Osnovaniya i fundamenty vysoknykh zdaniy [Bases and foundations of the high-rise buildings]. Moscow, ASV, 2016, 392 p.
4. Fellenius B.H., Altaee A., Kulesza R., Hayes J. O-cell testing and FE Analysis of 28m deep barrette in Manila, Philippines. *Journal of geotechnical and environmental engineering. American Society of Civil Engineering*, 1999, vol. 125, no. 7, pp. 566-575.
5. Shulyatev O.A., Dzagov A.M., Bokov I.A. Correction of soil design parameters for the calculation of the foundation based on the results of barrettes static load test. *Proceedings of the 18th International conference on soil mechanics and geotechnical engineering*, Paris, 2013.
6. Hamza M., Ibrahim M.H. Base and shaft grouted large diameter pile and barrettes load tests. *Proceedings Geotech –Year 2000, Developments in Geotechnical Engineering*, Bangkok, Thailand, 2000, vol. 2, pp. 219-228.
7. Ho K. pp. Behaviour of the instrumented trial barrette for the Hang Seng Bank Headquarters Building. *Spec. Proj. Report SPR 12/93, Geotechnical Engineering Office, Department of Civil Engineering*, Hong Kong, 1993.
8. Shuliat'ev O.A., Bokov I.A. Osobennosti vzaimodeistviia svai s gruntom i mezhdu soboi v usloviyakh svainogo polia [Peculiarities of interaction of piles with soil and with each other under pile-field conditions]. *Vestnik NITs Stroitel'stvo. Nauchno-issledovatel'skii tsentr «Stroitel'stvo»*, 2014, no. 10, pp. 166-176.

9. Mangushev R.A. Analytical and field evaluation of the bearing capacity of deep piles and barrettes in soft soil at St. Petersburg. *Architecture and Engineering*, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 54-59.
10. Gotman N.Z. Opredelenie parametrov sploshnogo svainogo polia iz zabivnykh svai [Determination of the parameters of a continuous pile field made of driven piles]. *Osnovaniia, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2003, no. 2, pp. 2-6.
11. Bakholdin B.V., Dzhanimirov Kh.A., Razvodovskii D.E. Nesushchaia sposobnost' svai v kuste [Bearing capacity of piles in a group]. *Sbornik «Svainye fundamenty»*. Moscow, Stroiizdat, 1991, pp. 41-44.
12. Znamenskii V.V., Ruzaev A.M. K voprosu ob optimizatsii proektirovaniia svainykh fundamentov [On the issue of optimizing the design of pile foundations]. *Vestnik MGSU*, 2010, no. 1, pp. 511-515.
13. Doroshkevich N.M., Znamenskii V.V., Kudinov V.I. Inzhenernye metody rascheta svainykh fundamentov pri razlichnykh skhemakh ikh nagruzheniia [Engineering methods for calculating pile foundations under various schemes of loading]. *Vestnik MGSU*, 2006, no. 1, pp. 119-132.
14. Lei G. Behaviour of excavated rectangular piles (barrettes) in granitic saprolites. *Department of Civil Engineering Hong Kong University of Science and Technology. Clear Water Bay*, Kowloon, Hong Kong, August 2001.
15. Chunnig F., Shvaiger Kh.V., Frelikh K. Trekhmernyi konechno-elementnyi analiz fundamenta glubokogo zalozheniia na priamougol'nykh svaiakh-barretakh [Three-dimensional finite element analysis of the deep foundation on rectangular piles-barrettes]. *Geotekhnika*, 2012, no. 1, pp. 38-52.