

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФУНДАМЕНТОВ БАЛЛАСТНОГО ТИПА ДЛЯ БАШЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ

© Л. А. Токарева¹, Ю. М. Стрелков², Л. С. Сабитов³, Р. Д. Хусаинов⁴

^{1,3}КФУ, Казань, Россия

^{1,2,3,4}КГЭУ, Казань, Россия

Башенные конструкции в настоящее время получили широкое применение в качестве конструкций рекламного, коммуникационного и энергетического назначения. В связи с этим встает вопрос об определении и выборе конструкции с наилучшей несущей способностью, которая при этом будет обладать параметрами, актуальными для потребителя, – эстетические свойства, простота монтажа в сопоставлении с традиционными подходами к конструированию. Также одним из важнейших вопросов является ограничение на места установки башенных конструкций ввиду запрета их расположения в зонах массового нахождения людей, в местах расположения коммуникаций. Необходимость установки башенных конструкций в условиях указанных ограничений привела к возникновению новых конструктивных решений фундаментов, а именно – фундаменты балластного типа, устанавливаемые на поверхность земли без ограничений на установленное время. В данной статье приведен анализ существующих фундаментов балластного типа, предназначенных для сооружений башенного типа.

Ключевые слова: балластный фундамент, оптимизация, стоечные системы, конструкция, модульность.

Введение

Фундамент балластного типа для башенных сооружений является основным конструктивным элементом, который воспринимает все нагрузки от вышележащих конструкций и распределяет их по основанию. Также сборно-разборные фундаменты позволяют быстро и эффективно устанавливать башенные конструкции в сложных условиях городской застройки на специфических грунтовых условиях, когда разработка оснований грунтов под опору невозможна. Себестоимость его изготовления в структуре общей стоимости башенных сооружений достигает более 50%. В соответствии с этим поиск оптимального конструктивного решения фундамента для башенных сооружений является актуальной задачей в настоящее время [3, 4].

Методика

Особенностью современных тенденций во вводимых новых стандартах, касающихся башенных конструкций, являются [1, 3]:

1. Повышенные требования к демонтажу башенных конструкций, включая их фундаменты.
2. Снижение материалоемкости за счёт образования полости в каждом модуле и заполнения её грунтом.
3. Распределение массы фундамента в плане в соответствии с действием максимальных усилий.

Основная часть

Рассмотрим характерные конструктивные решения строительных конструкций с фундаментами балластного типа с указанием недостатков и преимуществ.

Первым вариантом является фундамент из монолитного железобетона, обладающий существенными размерами геометрических и весовых параметров, изготавливаемый на месте монтажа конструкции (рис. 1).

Среди недостатков данного вида фундамента выделяют невозможность его транспортирования ввиду значительной массы;



Рис. 1. Типовой фундамент балластного типа

сложность демонтажа; отсутствие требуемых эстетических свойств из-за невозможности изготовления в заводских условиях.

Вариант фундамента компании ООО «Сотка высоток» (рис. 2.) выполнен в виде монолитного железобетонного блока с анкерными болтами для крепления опорной стойки.

К основным достоинствам данного типа фундамента относятся:

- возможность транспортирования из-за незначительных весовых размеров;
- возможность изготовления в заводских условиях;
- простота демонтажа.

Среди недостатков можно выделить:

- ограничения по весу для транспортировки не позволяют использовать его для установки оборудования с большой ветровой площадью;

– недостаточные эстетические свойства. Как правило, нижняя часть закрывается обшивкой.

Третий вариант – это сборно-разборный балластный фундамент системы «Cell block», состоящий из однотипных железобетонных блоков, соединяемых в единую конструкцию с помощью винтовых стальных затяжек (рис. 3).

Основные достоинства системы:

- удобство монтажа и демонтажа;

- возможность использования под стоечно-балочные системы с различными размерами и габаритами и устанавливаемым оборудованием;

- достаточные эстетические качества вследствие изготовления.

Необходимость использования сложного технологического оборудования при монтаже конструкции фундамента является недостатком системы.

Проведенный анализ позволяет определить следующие оптимальные требования к фундаменту балластного типа:

1. Фундамент должен быть сборно-разборным, изготавливаемым в заводских условиях с достаточными эстетическими внешними качествами;

2. Монтаж фундамента должен быть возможен без применения сложного технологического оборудования;

3. Необходима современная инженерная методика подбора параметров фундамента под различное инженерное оборудование, навешиваемое на опорную стойку, позволяющая обеспечивать высокие технико-экономические показатели по расходу материалов и необходимый уровень ее надежности;



Рис. 2. Стоечно-балочная система компании ООО «Сотка высоток»



Рис. 3. Система сборно-разборного фундамента системы «Cell block».

4. Размеры фундаментов должны обеспечивать их применение для башенных конструкций, воспринимающих значительные ветровые нагрузки;

5. Для опор воздушных линий электропередач актуальным является конструктивное решение фундаментов опор, позволяющее быстро возводить новые опоры в труднодоступных местах, в сложных климатических условиях для ликвидации последствий аварий в виде падения опор отдельных участков воздушных линий электропередач.

Всем вышеперечисленным критериям отвечают сборно-разборные фундаменты балластного типа, которые позволяют быстро и эффективно установить высотные конструкции в сложных условиях городской застройки или специфических грунтовых условиях, в сложных климатических условиях, когда раз-

работка оснований грунтов под опоры невозможна.

Ниже представлены несколько вариантов сборно-разборных фундаментов, которые соответствуют представленным требованиям. Сборно-разборные элементы предлагаемых систем фундаментов собираются из типовых блоков до размеров, обеспечивающих несущую способность опор для различных ветровых районов и стоек различной высоты.

Потребителями «продукта» являются электросетевые компании, строительные, инновационные компании малой энергетики, рекламное производство, компании, обслуживающие городские электросети и освещение, департаменты внешнего благоустройства и предприятия дорожно-транспортной отрасли.

Сборно-разборный фундамент под опору реализуется следующим образом: железобе-

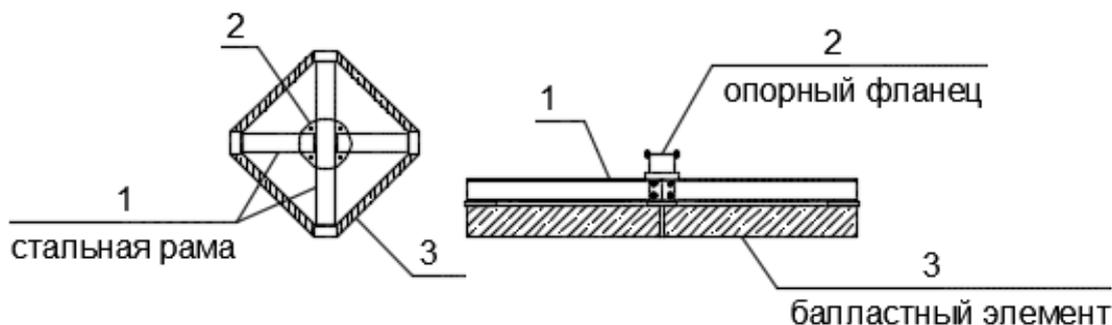


Рис. 4. Крестовая рамная сборка конструкций

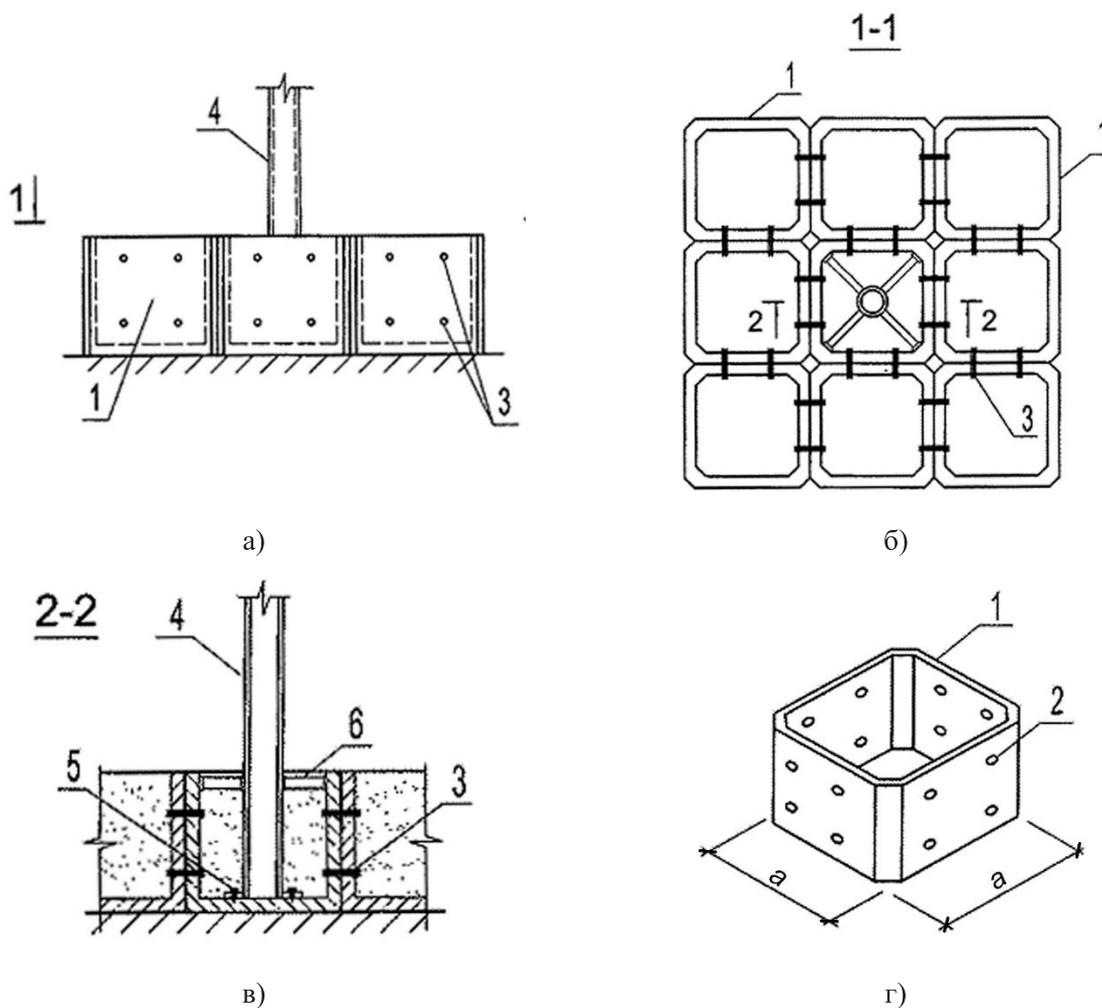


Рис. 5. Сборно-разборный фундамент под опору: а – общий вид; б – вид сверху, разрез 1-1; в – разрез 2-2; г – аксонометрия железобетонного блока в виде полых квадратной призмы с размерами дна «а».

тонные блоки в виде полых квадратных призм 1 устанавливаются на основание и стягиваются между собой болтами 3, устанавливаемые в отверстия 2 в стенках призм. Опора 4 устанавливается на днище центральной призмы и закрепляется анкерными болтами 5, а на уровне верха призмы распорками 6. Для повышения несущей способности фундамента на опрокидывание полость призм заполняется сыпучим инертным материалом, например щебнем. Демонтаж фундамента происходит в обратной последовательности: сначала из полостей призм убирается щебень 7, затем освобождаются распорки 6 и анкерные болты 5 опоры. После демонтажа опоры 4 освобождаются болты 3, стягивающие стенки призм [1, 5, 8].

Сборно-разборный фундамент позволяет уменьшить его массу при транспортировании и монтаже, а также снизить расход материалов и трудоемкость на крепление железобетонных блоков-призм и опоры. Главным преимуществом предлагаемого сборно-разборного фундамента является быстрота его возведения без проведения земляных работ и возможность более легкого демонтажа по сравнению с используемыми типами фундаментов. Данная особенность делает привлекательным использование данных фундаментов в стесненных (городских) условиях, в условиях ограничений на использование земляных работ, для быстрой ликвидации аварий участков ВЛ с необходимостью установки новых опор вместо раз-

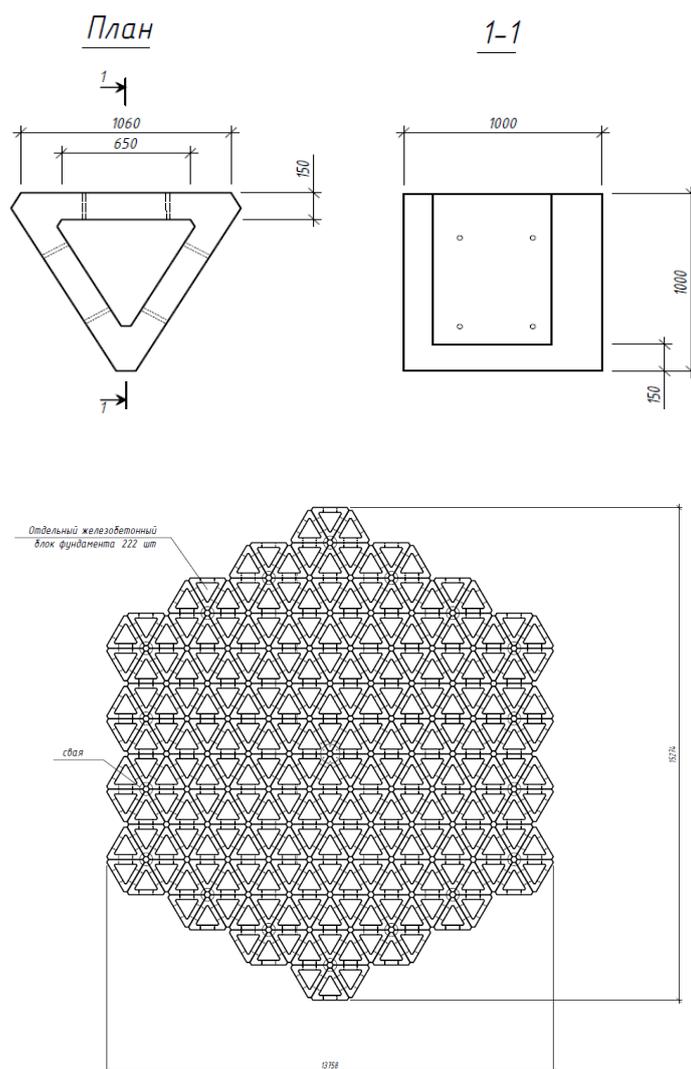


Рис. 6. План, разрез и армирование модулей фундамента для башенного сооружения

рушенных, для установки опор в удаленных и труднодоступных местах [1].

На рис. 5 а показан общий вид сборно-разборного фундамента. На фиг. 1 показан отдельный железобетонный блок в виде полого элемента с квадратным днищем и стенками кругового очертания. На фиг. 3 рис. 5 изображен поперечный разрез 1-1 на фиг. 2. На фиг. 4 рис. 5 показана опора на сборно-разборном фундаменте. На фиг. 5 рис. 5 показан общий вид анкера для опоры. Полости блоков заполнены инертным материалом 7.

На сборно-разборный фундамент в пределах блока кругового очертания 1 установлена опора 4. Для установки опоры на фундамент крепятся анкера 5 (фиг. 5 рис. 5), которые кре-

пятся болтами 6, соединяющими блоки кругового очертания 1 (фиг. 1,4 рис. 5). Сборно-разборный фундамент под опору позволяет упростить крепление блоков, имеющих сечение кругового очертания, а также упростить крепление опор при помощи анкерных устройств.

Для повышения устойчивости фундамента на опрокидывание полости круговых блоков заполняются инертным материалом, например щебнем, песком и т. д.

Для оценки возможности применения конструктивных решений фундаментов на рис. 4 и 5 были выполнены численные исследования в виде их расчета на действие расчетных ветровых нагрузок, вызывающих появление расчетных моментов до 10 тм для рекламных

типовых конструкций и от 2 до 7,5 тм для опор линий ВЛ (высоковольтных линий) от 6 до 10 КВт. При расчетах варьировали величину засыпки в пазухи фундамента. При этом рассматривались варианты засыпки из местного грунта. Расчетное грунта под подошвой фундамента принималось соответствующим наиболее вероятному и неблагоприятному варианту в виде насыпного грунта. Так как планируется использовать данный тип фундамента по многогранные опоры ВЛ, требующие для их опирания и крепления трубы диаметром от 245 до 530 мм, были выбраны 2 варианта ячеек размером 0,6x0,6x0,6 м и 1x1x1 м.

Конструктивная схема сборно-железобетонного фундамента модульного типа состоит из полых призматических блоков, стянутых между собой болтами. Размеры сооружения в плане составляют 15,274 x 13,758 м, высота фундаментной плиты – 1 м, толщина стенок сборных блоков – 150 мм, толщина стенок сборных блоков – 150 мм [8, 9]. В центральных блоках присутствуют отверстия для крепления мачты к фундаменту, во всех блоках имеется 4 отверстия для стягивания отдельных блоков между собой болтами. В качестве материала конструкций использовать бетон класса В25, арматура А500, А240.

Нагрузки на фундамент передаются от мачты в центральную часть фундамента, которая жёстко закреплена с шестью сборными железобетонными блоками. На мачту действуют нагрузки от ветра, которые усилиями

передаются на основание мачты. Вертикальная нагрузка составляет 974 т, горизонтальное усилие, возникающее от действия ветра на всю длину мачты, равняется 48 т. На поверхность фундамента действует нагрузка от вышележащего грунта толщиной 1 м, на боковую поверхность фундамента действует давление грунта.

Расчет фундамента был произведен с использованием программного комплекса «Ли́ра», в котором реализован метод конечных элементов – как наиболее эффективный численный метод решения задач механики. Результатом моделирования стала пространственная несущая система фундамента (рис. 9). Фундаментная плита моделировалась в виде пластинчатых 3-хугольных элементов. Основание здания задано в системе «ЛИРА-ГРУНТ»; для того чтобы ограничить горизонтальные перемещения сооружения, использованы специальные одноузловые конечные элементы, моделирующие трение грунта.

По результатам расчёта максимальное значение вероятной осадки плитного фундамента, полученное в программном комплексе при основном сочетании расчетных нагрузок, составило:

$$S_{max} = 83,3 \text{ мм} < [S] = 200 \text{ мм}.$$

Таким образом, максимальное значение вероятных деформаций, полученных в программном комплексе, также не превышает значения предельных деформаций основания.

Дальнейшим этапом развития сборно-раз-

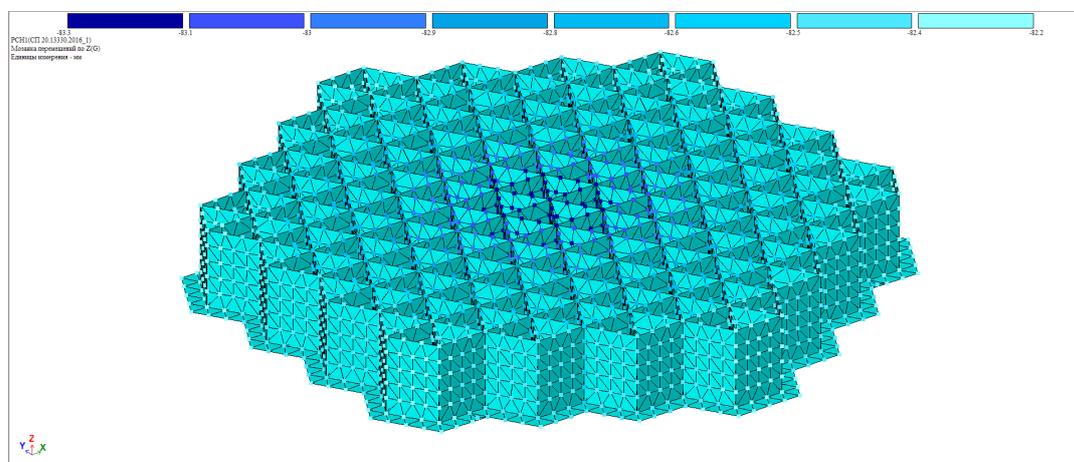


Рис. 7. Конечно-элементная схема расчётной модели фундамента из модульных элементов

борных фундаментов будет решение, состоящее в уменьшении числа болтов в креплении блоков, а также в упрощении крепления анкерных устройств к сборно-разборной опоре.

Выводы

По результатам проведенных численных исследований разработанных численных моделей сборно-разборных фундаментов можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотренные в работе модели сборно-разборных балластных фундаментов из полых круглых призм позволяют их использовать в качестве фундаментов опорных конструкций при расчетных моментах в диапазоне от 1 до 7.5 тм. К этому классу конструкций можно отнести массу широко используемых конструкций, включающих в себя столбы освещения, информационные дорожные указатели, столбы линий электропередач высотой до 11 м мощностью до 10 кВт. При увеличении количества сборных элементов до 16 (4x4) возможно применение фундаментов данного типа для рекламных щитов.

2. Проведенные исследования влияния фактора плотности засыпки полостей сборно-разборных фундаментов показали существенное влияние фактора плотности засыпки фундаментов на их несущую способность. Для рассмотренных моделей увеличение плотно-

сти засыпки от неплотного грунта, крупного гравия (1000 кг/м^3) до уплотненного грунта (1600 кг/м^3) привело к увеличению величины расчетного момента, воспринимаемого фундаментом, в 2 раза.

3. При определении влияния расчетного сопротивления грунта под подошвой фундамента на величину расчетного момента, воспринимаемого фундаментом, выявили существенное влияние данного фактора. Изменение расчетного сопротивления грунта от 1 Кг/см^2 (слабый насыпной грунт) до 3 кг/см^2 (грунт с хорошими средними по прочности характеристиками) приводило к увеличению расчетного момента, воспринимаемого фундаментом, в 1.5 раза. Данный фактор делает актуальным проведение специальных технологических мероприятий в виде уплотнения грунта в зоне установки сборно-разборного фундамента.

4. Приведено численное моделирование и конструктивные особенности изготовления и монтажа фундамента, реализованного по патенту 2633604 «Сборно-разборный фундамент под опоры» под реальную башню высотой 30 метров и мощностью ветроэлектрической установки 150 кВт. Результат состоит в том, чтобы повысить несущую способность фундамента на 20%, увеличить прочность, упростить монтаж конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хусаинов Д. М., Пеньковцев С. А., Хабибулина А. Г. Разработка фундаментов балластного типа для стоечных конструкций // Известия КГАСУ. 2017 №4. С. 204-213.
2. Стрелков Ю. М., Сабитов Л. С., Ключев С. В., Ключев А. В., Радайкин О. В., Токарева Л. А. Технологические особенности конструирования сборно-разборного фундамента под башенные сооружения // Строительные материалы и изделия. 2022. Том 5. №3. С. 17-26. DOI: 10.34031/2618-7183-2022-5-3-17-26
3. Машиян Л. Р., Языев С. Б., Сабитов Л. С., Коноплев Ю. Г., Радайкин О. В. Напряженно-деформированное состояние системы «комбинированная башня – железобетонный фундамент – грунт основания» высотных сооружений // Строительные материалы и изделия. 2019. Т. 2. №6. С. 29-37.
4. Сабитов Л. С., Кузнецов И. Л., Бадретдинов И. Р., Радайкин О. В. Исследование совместной работы стальной стойки-опоры и сборного железобетонного фундамента экспериментальным методом и с применением математического МКЭ-моделирования // Вестник гражданских инженеров. 2018. №6 (71). С. 37-44.
5. Патент 2633604 Российская Федерация, МПК E02D 27/42. Сборно-разборный фундамент под опору. Сабитов Л. С., Кузнецов И. Л., Хусаинов Д. М., Сабитов С. И., Ахунова З. Р., Стрелков Ю. М.; заявка 2016134679; опубл. 13.10.2017. Бюл. №29. 5 с.

6. Кузнецов И. В., Хусаинов Д. М., Хабибулина А. Г., Пеньковцев С. А. Разработка сборно-разборного фундамента балластного типа для стоечных конструкций // Известия КГАСУ. 2019 №4. С. 236-244.
7. Ахтямова Л. Ш., Сабитов Л. С., Маилян А. Л., Маилян Л. Р., Радайкин О. В. Технологические и конструктивные особенности проектирования модульного железобетонного фундамента под высотное сооружение различного типа // Строительные материалы и изделия. 2019. Т. 2. №6. С. 5.
8. Патент 2625060 Российская Федерация, МПК E02D 27/42. Модульный фундамент под опору. Кузнецов И. Л., Бадертдинов И. Р., Радайкин О. В., Сабитов Л. С., Ахтямова Л. Ш., Мезиков А. К., Киямов И. К.; заявка 2019121275; опубл. 15.11.2019. 5 с.
9. Муртазаев С. А. Ю., Саламанова М. Ш. Исследование стойкости цементного камня на бесклинкерных вяжущих щелочной активации // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2022. Т. 18. №2 (28). С. 98-107.

DESIGN FEATURES OF BALLAST TYPE FOUNDATIONS FOR TOWER STRUCTURES

L. A. Tokareva¹, Yu. M. Strelkov², L. S. Sabitov³, R. D. Khusainov⁴

^{1,3} Kazan Federal University, Kazan, Russia

^{1,2,3,4} Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Tower structures are currently widely used as structures for advertising, communication and energy purposes. In connection with this, the question arises of determining and choosing a structure with the best load-bearing capacity, which at the same time will have parameters that are relevant to the consumer – aesthetic properties, ease of installation in comparison with traditional design approaches. Also, one of the most important issues is the restriction on the installation sites of tower structures in view of the prohibition of their location in areas of mass presence of people, in the locations of communications. The need to install rack structures under the conditions of these restrictions has led to the emergence of new design solutions for foundations, namely, ballast-type foundations installed on the surface of the earth without restrictions for a set time. This article provides an analysis of existing ballast-type foundations intended for tower-type structures.

Keywords: ballast foundation, optimization, rack systems, design, modularity.

REFERENCES

1. Khusainov, D. M., Penkovtsev, S. A. and Khabibulina, A. G. (2017) ‘Razrabotka fundamentov ballastnogo tipa dlya stoechnykh konstruksii’ [Development of ballast-type foundations for rack-mount structures]. *Izvestiya KGASU*. №4, pp. 204-213.
2. Strelkov, Yu. M., Sabitov, L. S., Klyuev, S. V., Klyuev, A. V., Radaikin, O. V. and Tokareva, L. A. (2022) ‘Tekhnologicheskie osobennosti konstruirovaniya sborno-razbornogo fundamenta pod bashennye sooruzheniya’ *Stroitel’nye materialy i izdeliya*. [Technological features of designing a collapsible foundation for tower structures. Building materials and products], Volume 5. №3, pp. 17-26. DOI: 10.34031/2618-7183-2022-5-3-17-26

3. Mailyan, L. R., Yazyev, S. B., Sabitov, L. S., Konoplev, Yu. G. and Radaikin, O. V. (2019) 'Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie sistemy «kombinirovannaya bashnya – zhelezobetonnyi fundament – grunt osnovaniya» vysoknykh sooruzhenii'. *Stroitel'nye materialy i izdeliya* [Stress-strain state of the system “combined tower – reinforced concrete foundation – foundation soil” of high-rise structures. Building materials and products]. Vol. 2. №6, pp. 29-37.
4. Sabitov, L. S., Kuznetsov, I. L., Badretdinov, I. R. and Radaikin, O. V. (2018) 'Issledovanie sovmestnoi raboty stal'noi stoiki-opory i sbornogo zhelezobetonnoogo fundamenta eksperimental'nym metodom i s primeneniem matematicheskogo MKE-modelirovaniya' [Investigation of the joint work of a steel pillar-support and a prefabricated reinforced concrete foundation by an experimental method and using mathematical FEM modeling]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. №6 (71), pp. 37-44.
5. Sabitov L.S., Kuznetsov I.L., Khusainov D.M., Sabirov S.I., Akhunova Z.R. and Strelkov Yu.M. *Sbornorazbornyi fundament pod oporu* [Collapsible foundation for support], application 2016134679, publ. 10/13/2017. Bull. №29, 5 p, Russian Federation, IPC E02D 27/42, Patent 2633604.
6. Kuznetsov, I. V., Khusainov, D. M., Khabibulina, A. G. and Penkovtsev, S. A. (2019) 'Razrabotka sborno-razbornogo fundamenta ballastnogo tipa dlya stoechnykh konstrukttsii' [Development of a prefabricated ballast-type foundation for rack structures]. *Izvestiya KGASU*. №4, pp. 236-244.
7. Akhtyamova, L. Sh., Sabitov, L. S., Mailyan, A. L., Mailyan, L. R. and Radaikin, O. V. (2019) 'Tekhnologicheskie i konstruktivnye osobennosti proektirovaniya modul'nogo zhelezobetonnoogo fundamenta pod vysoknoe sooruzhenie razlichnogo tipa' [Technological and design features of the design of a modular reinforced concrete foundation for a high-rise structure of various types]. *Building materials and products*. Vol. 2. №6. P. 5.
8. Kuznetsov, I. L., Badertdinov, I. R., Radaikin, O. V., Sabitov, L. S., Akhtyamova, L. Sh., Mezikov, A. K. and Kiyamov, I. K. *Modul'nyi fundament pod oporu*. [Modular foundation for support], application 2019121275, publ. 11/15/2019., 5 p, Russian Federation, IPC E02D 27/42, Patent 2625060
9. Murtazaev, S.A. Yu. and Salamanova, M. Sh. (2022) 'Issledovanie stoikosti tsementnogo kamnya na besklinkernykh vyazhushchikh shchelochnoi aktivatsii'. *Vestnik GGNTU. Tekhnicheskie nauki*. [Study of the resistance of cement stone on clinker-free binders of alkaline activation. Herald of Gstou. Technical sciences.], V. 18, №2 (28), pp. 98-107.