

5. Schneider U. Concrete at high temperatures – a general review. Fire Saf J 1988;13:55–68.
6. Nielsen CV, Pearce CJ, Bicanic N. Theoretical model of high temperature effects on uniaxial concrete member under elastic restraint. Mag Concr Res 2002; 54:239–49. <http://dx.doi.org/10.1680/macr.54.4.239.38809>.
7. Li L, Purkiss J. Stress–strain constitutive equations of concrete material at elevated temperatures. Fire Saf J 2005; 40:669–86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2005.06.003>.
8. Terro MJ. Numerical modeling of the behavior of concrete structures in fire. ACI Struct J 1998; 95:183–93.
9. Fedorov V.S., Levitskiy V.E. Constitutive Relationships of Concrete and Reinforcing Steel under High Temperatures // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vols. 725-726. pp. 124 – 129.
10. Mindeguia J-C, Hager I, Pimienta P, Carré H, La Borderie C. Parametrical study of transient thermal strain of ordinary and high performance concrete. Cem Concr Res 2013;48:40–52.

© В. С. Федоров, В. Е. Левитский

**Ссылка для цитирования:**

В. С. Федоров, В. Е. Левитский. Нелинейное деформирование бетона в условиях режимного нагружения при кратковременном нестационарном нагреве// Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2019. № 4 (30). С. 89–93.

УДК 624.154.1; 624.154.8

## ФОРМООБРАЗОВАНИЕ КОНЦЕВЫХ УШИРЕНИЙ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ С УЧЁТОМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОГО И ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

*Н. В. Купчикова*

*Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань, Россия*

Аннотация: в статье анализируются основные предпосылки теории формообразования геометрии концевых уширений из втрамбованного щебня. В результате анализа технологий устройства свайных фундаментов с уширениями из щебня и по результатам экспериментальных исследований даны рекомендации по подбору расчётных схем концевых уширений в зависимости от конструктивного решения сваи, технологии её погружения и способа устройства концевого уширения, а также грунтовых условий. Выполнены численные расчёты в двухмерной и трёхмерной постановке для определения НДС фундамента с помощью программного комплекса MIDAS GTS\_NX, реализующем метод конечных элементов и разработанной для сложных геотехнических задач. Установлено, что формообразование концевых уширений происходит в зависимости от деформационно-прочностных параметров работы конструкции в целом, а именно диаметра сваи, фракции и объёма щебня, диаметра уплотнения грунтового полупространства, а также развития формы геометрии концевых уширений.

**Ключевые слова:** буронабивная микросвая, втрамбованный щебень, формообразование свай с уширениями.

## FORMATION OF END EXPANSIONS OF DRILLING PILES WITH ACCOUNT OF EXPERIMENTAL ANALYTICAL AND NUMERICAL RESEARCH METHODS

*N. V. Kupchikova*

*Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, Astrakhan, Russia*

Abstract: the article analyzes the basic premises of the theory of shaping the geometry of end broadening from rammed rubble. As a result of the analysis of the technologies for constructing pile foundations with broadenings from rubble and according to the results of experimental studies, recommendations are given on the selection of design patterns for end broadening depending on the design of the pile, the technology of its immersion and the method of end broadening, as well as soil conditions. Numerical calculations were performed in two-dimensional and three-dimensional formulations to determine the foundation VAT using the MIDAS GTS\_NX software package that implements the finite element method and was developed for complex geotechnical problems. It was established that the shaping of the end broadening occurs depending on the deformation-strength parameters of the structure as a whole, namely, the diameter of the pile, fraction and volume of crushed stone, the diameter of the compacted soil half-space, as well as the development of the geometry of the end broadening from rammed crushed stone in the form of a rotation ellipsoid.

**Keywords:** bored micro pile, compacted crushed stone, broadening shaping.

Возросшие объёмы строительства зданий и сооружений в соответствии с современными принципами устойчивого развития в проектировании требуют устройства фундаментов глубокого заложения с увеличенными прочностными показателями, как самой конструкции, так и основания, особенно структурно-неустойчивого. Зачастую для неустойчивых грунтов устраивают фундаменты глубокого заложения с уширениями.

В результате анализа практических технологий выявлено [1–27], что для образования уширения поперечного сечения сваи в конце ствола сваи используют различные способы: разбуривание, вдавливание, раскатывание грунта, физико-химическое инъецирование, буровзрывной способ, ис-

пользование разрядно-импульсной технологии, механического глубинного втрамбовывания, с помощью электрогидравлического эффекта, втрамбовывание щебня, гравия и т.д. Сложность устройства конструкций свай с уширениями определяется совокупностью конструктивных, технологических и стоимостных требований. В результате чего развитие системы принципов формообразования, как процесса создания и развития конструктивных форм, свайных фундаментов с уширениями в грунтовом массиве для площадок с различными инженерно-геологическими условиями является одной из актуальных и не решённых задач в современной геотехнике.

В научных работах [1–27] приведены результаты исследования формообразования и геометрических параметров уширений, изготовленных по различным вышеуказанным технологиям на конце готовых и набивных свай.

Как правило формообразование уширения на конце буронабивной сваи может развиваться в различном геометрическом направлении: сферическое, полусферическое, эллиптическое, цилиндрическое (рис. 1).

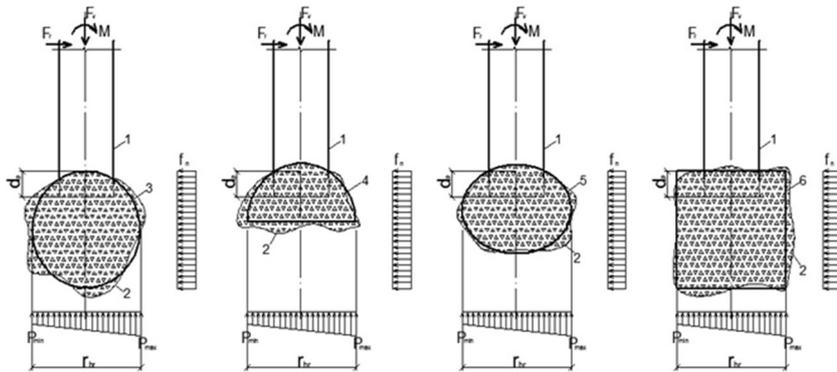


Рис. 1. Расчётные схемы формообразования уширений буронабивных свай на конце (слева на право сферическое, полусферическое, эллиптическое, цилиндрическое)

Многочисленные раскопки учёные проводили после процесса твердения материала и приобретения уширением структурно-устойчивой формы. Установлено, что уширения независимо от технологии изготовления имеют преимущественно развитие в вертикальном или горизонтальном направлении. При этом в поперечном сечении приобретают различную форму - усечённого конуса, эллипсоида, сферы, полусферы или цилиндра, что является одним из авжных становится затруднительным при выборе расчётной схемы конструкции сваи при проектировании. Природа формообразования концевых уширений сваи до конца не изучена, что зачастую приводит к широкому диапазону отличий и расхождений между расчетной моделью и реальной работой сваи.

Одним из эффективных конструктивно-технологических методов увеличения несущей способности фундамента и слабых оснований под нижним концом сваи является устройство буронабивных или щебёночных свай и образование у сваи концевого уширения за счёт втрамбовывания щебня.

Первые технологии устройства свайных фундаментов с уширениями из щебня шли по пути возведения в вытрамбованных котлованах с использованием трамбовок высотой 1,5-3,5 м с заострением нижнего конца под углом 60-900 [1] (рис. 2 а, б). В настоящее время глубинное вытрамбовывание фундаментов используют очень редко ввиду сложности проверки целостности ствола скважины, что сопоставляется расчётным и фактическим объёмом заполненного материала скважины, что не является надёжным, а также отсутствие достоверных способов оценки взаимодействия подошвы с основанием, кроме того, скважину может заполнять взрыленный или осыпавшийся грунт.

В работах Зоценко Н.Л., Бабенко В.А., Винникова Ю.Л. [2] проводились исследования поведения трубчатой микросваи в вытрамбованной скважине с уширением из щебня при усилении оснований и фундаментов реконструируемых зданий (рис. 2, г). По результатам опытных исследований с различными грунтами условиями учёными была получена зависимость несущей способности трубчатых микросвай от размеров жесткого уширения в их нижней части. При максимальном размере уширения 2,5 диаметра ствола микросваи несущая способность их грунта увеличивается в 1,7- 4,5раза по сравнению с микросваями без уширения. Однако при реконструкции оснований и фундаментов эксплуатируемых зданий и сооружений во многих случаях металлические трубчатые микросваи с втрамбованным в основание жестким материалом с целью создания уширения оказываются не совсем эффективным решением. Технология их изготовления с применением специального оборудования ударного действия может вызывать значительные сотрясения окологрунтового пространства под «старой» частью фундамента и самой конструкции, которая и без того с течением времени имеет деформации и разрушения.

В современных условиях для повышения физико-механических характеристик водонасыщенных грунтов выполняют щебёночные колонны путём вдавливания щебёночного материала в лидерные скважины [3]. В ходе возведения формируемая щебёночная колонна уплотняет грунт вокруг в радиальном направлении, что вызывает активизацию процесса консолидации из-за появления избыточного порового давления, что особенно эффективно в водонасыщенных грунтах.

В ЦНИИОМТП в 2002 году разработана технологическая карта на устройство буронабив-

ных свай в водонасыщенных грунтах для малоэтажных зданий и сооружений с уширенным основанием из втрамбованного щебня крупностью 20-40 мм и прочностью не менее 30 МПа.

Радиус уширения основания согласно [3] определяется по формуле:

$$r_{br} = k_{br} V_{cr}, \quad (1)$$

где  $k_{br}$  – коэффициент, учитывающий форму уширения и при расположении центра уширения на расстоянии  $0,5 h_1$  от основания за осмотренной части фундамента (см. рис. 1 а), принимаемый равным: для шара –  $k_{br} = 0,62$ ; эллипсоида с  $h_{br}/r_{br} = 1,4$  –  $k_{br} = 0,55$ ; эллипсоида с  $h_{br}/r_{br} = 1,8$  –  $k_{br} = 0,51$ ;  $V_{cr}$  – объем втрамбованного в дно жесткого материала,  $m^3$ .

Площадь уширенного основания из жесткого материала в его наибольшем сечении принимается равной

$$A_{br} = 3,14 r_{br}^2 \quad (2)$$

Толщина уплотненной зоны ниже уширенной части из втрамбованного материала определяется по формуле

$$h_s = r_s - r_{br} \quad (3)$$

Радиус уплотненной зоны определяется по формуле

$$r_s = \frac{0,95 * r_{br} * \rho_{ds}}{\rho_d - \rho_d} = r_{br} \eta_\rho \quad (4)$$

где  $\rho_d$  и  $\rho_{ds}$  – соответственно средние значения плотностей сухого грунта природного

слоения и уплотненного грунта;  $\eta_\rho$  – коэффициент, принимаемый по таблице.

Площадь сечения уплотненной зоны, образующейся при втрамбовании жесткого материала, в месте наибольшего уширения принимается равной

$$A_s = 3,14 r_s^2. \quad (5)$$

В результате многочисленных экспериментальных исследований автора по формообразованию уширений и зон уплотнения грунта в околосвайном пространстве под нижним концом буронабивных свай и свай-оболочек, полученных в результате втрамбовывания щебня, установлено, что уширения приобретают форму эллиптического цилиндра, параметры которого напрямую зависели от диаметра обсадной трубы, физико-химических характеристик грунта, объема щебня и его фракции, что отражено в соответствующих графиках зависимостей [19].

Следует отметить, что, несмотря на наличие нескольких методов определения осадки свай с концевыми уширениями, нагруженных вертикальными нагрузками, проблема обоснованного построения расчетной модели, наиболее точно отражающая физику взаимодействия грунта и свай с уширениями требует своего решения. Для построения расчетной модели необходимо сформулировать ряд предпосылок, позволяющих с единых методологических позиций оценить силовое сопротивление системы «свая-уширение-основание».

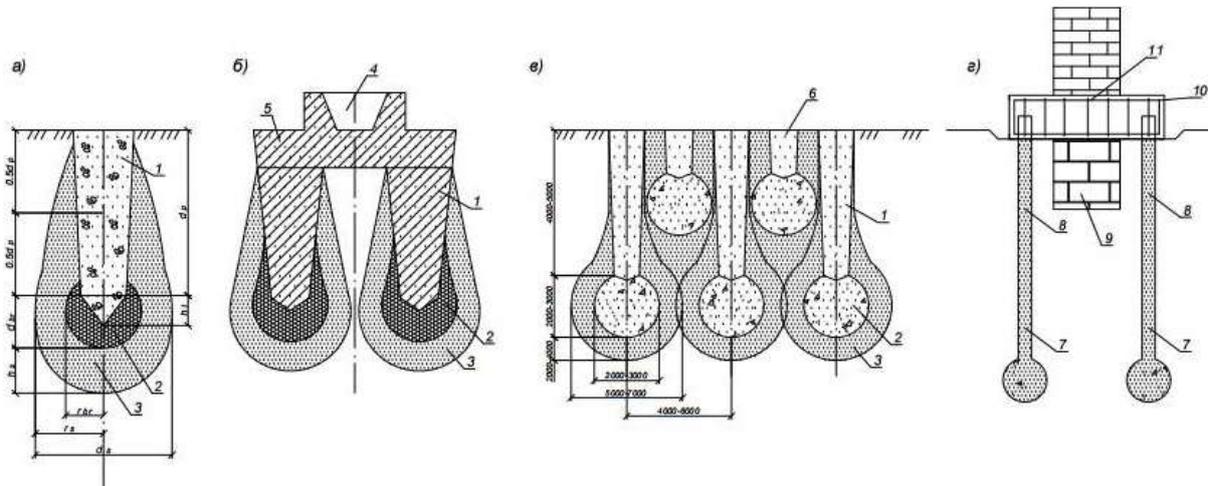


Рис. 2. Виды свайных фундаментов с уширением из втрамбованного щебня:

- а – одиночная свая; б – фундамент с ростверком; в – втрамбованные грунтовые подушки;
- г – способ усиления оснований и фундаментов реконструируемых зданий трубчатыми микросваями в втрамбованной скважине: 1 – 2 – 3 – 1 – втрамбованный котлован;
- 2 – уширение из щебня; 3 – уплотненная зона; 4 – уплотненный грунт или жесткий металл;
- 5 – буферная зона, уплотненная той же трамбовкой

Для построения такой расчетной модели анализ экспериментально-теоретических исследований позволяет принять предпосылку о расчетной схеме концевых уширений в зависи-

мости от конструктивного решения свай, технологии её погружения и устройства уширения, а также грунтовых условий, предложенных автором в работах [1, 7, 10, 19].

В работе по исследованию трубчатых микросвай с уширением в нижней части из втрамбованного жёсткого материала в твёрдом, полутвёрдом и мягкопластичном суглинке [19] для изучения параметров уширения были разработаны 24 опытные микросваи, с различными объёмами щебня. В результате натурных замеров установлено, что форма уширений близка к форме эллипсоида вращения, а соотношение его полуосей находится в прямой зависимости от степени влажности грунта, объёма единичных порций щебня, втрамбованного в нижнюю часть скважины. При этом уточнена формула определения радиуса эллипсоида:

$$r_{уш} = \sqrt[3]{\frac{3V_{щ.уш}}{4\pi\eta k_d}}, \quad (6)$$

где  $V_{щ.уш}$  – объём щебня в уширении, м<sup>3</sup>;  $k_d$  – коэффициент уплотнения щебня;  $\eta$  – отношение между полуосями эллипса уширения (вертикальной к горизонтальной).

Исследования формообразования и напряжённо-деформированного состояния буронабивной сваи выполняли с помощью метода конечных элементов и его реализации на ПК. Расчет выполнялся в программных комплексах MIDAS GTS\_NX и PLAXIS, реализующих метод конечных элементов. Параметры и свойства материалов в численном моделировании приняты соответствующими экспериментальным.

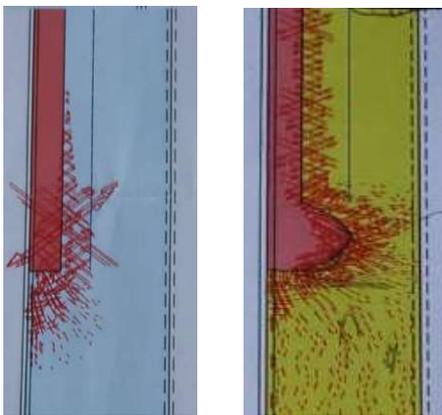


Рисунок 3 Главные векторы напряжений в грунтовом массиве при вертикальном нагружении сваи с концевым уширением (а) и без уширения (б)

На первом этапе анализировали степень уплотнения окологрунтового полупространства вокруг щебёночного уширения буронабивных свай.

На рисунке 3 стрелками показано направление развития деформаций (уплотнения) грунта при втрамбовывании щебня в нижний конец. Направление стрелок показывает уплотнение грунта от пяты и тела сваи с концевым уширением (а) и без него (б). Выброс грунта повлиял на изменение первоначальных физико-механических характеристик основания.

На втором этапе анализировали изополя вертикальных, горизонтальных и касательных напряжений от вертикального нагружения (рис. 4 и 5). Результаты численного моделирования несущей способности буронабивной сваи с уширением из щебня в сравнительном анализе с работой аналогичной сваи без уширения.

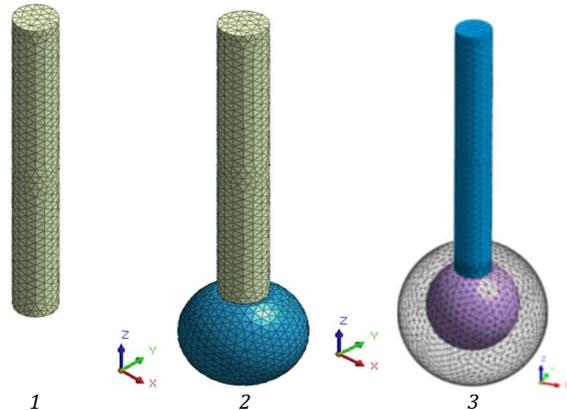


Рисунок 4 - Конечно-элементные модели сваи в GTS NX: 1 – без уширения, 2 – с уширением, 3 – с уширением и уплотнённым окологрунтовым пространством вокруг пяты

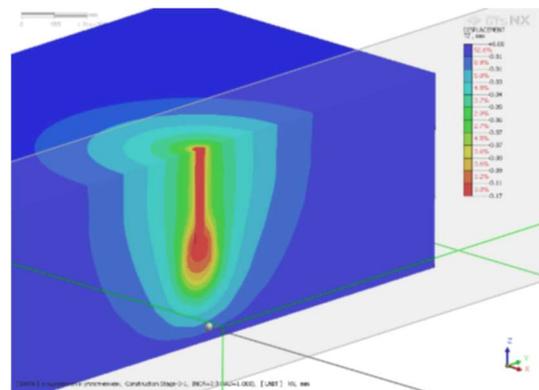


Рис. 5. Перемещения буронабивной микросваи диаметром 400 мм в GTS NX

Таблица  
Сопоставление результатов численного моделирования с учётом и без учета коэффициента уплотнения около грунтовой зоны

Осадка, мм	Диаметр буронабивной сваи			
	Ø100	Ø200	Ø300	Ø400
без учета коэффициента уплотнения около грунтовой зоны	0,86	0,35	0,24	0,19
с учётом коэффициента уплотнения около грунтовой зоны	0,77	0,33	0,23	0,17

На рис. 4 изображена конечно-элементная модель сваи с уширением из щебня и без него и конечно-элементная модель сваи с уширением из щебня и уплотнённым окологрунтовым пространством. На рисунке 5 - изополя деформаций в ограниченном массиве грунта от верти-

кального нагружения. В результате тщательного анализа всех принципов формообразования конструкций свай с уширением из втрамбованного щебня было выявлено, что результаты численных исследований на специализированных геотехнических комплексах показывают хорошую сходимость с результатами полевых испытаний, расхождение составляет 1-8%. Основным выводом можно сделать следующее утверждение - недоучёт коэффициента уплотнения около грунтовой зоны вокруг уширения из втрамбованного щебня приводит к большому расхождению результатов, что видно из сопоставления числовых параметров осадки с учётом и без учета коэффициента уплотнения около грунтовой зоны. Числовые результаты отражены в таблице сопоставления результатов численного моделирования с учётом и без учета коэффициента уплотнения около грунтовой зоны. На рисунке 6 представлен график зависимости осадки от вертикального нагружения буронабивной сваи с концевым уширением в виде втрамбованного щебня: 1, 2, 3, 4 – для сваи диаметром 100мм, 200 мм, 300 мм и 400 мм соответственно без учета коэффициента уплотнения около грунтовой зоны; 1', 2', 3', 4' – для сваи диаметром 100мм, 200 мм, 300 мм

и 400 мм соответственно с учетом коэффициента уплотнения около грунтовой зоны.

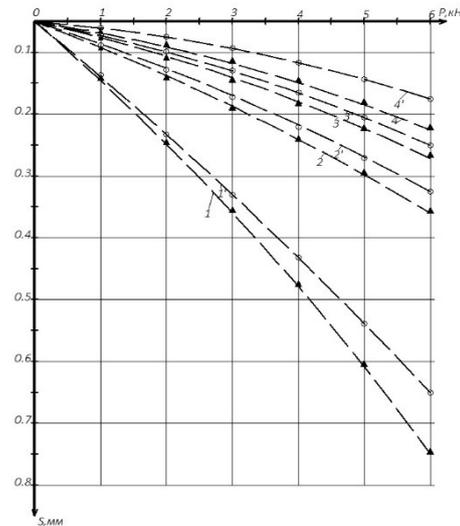


Рисунок 6 – График зависимости осадки от вертикального нагружения буронабивной сваи с концевым уширением в виде втрамбованного щебня по данным численного моделирования: 1, 2, 3, 4 – для сваи диаметром 100мм, 200 мм, 300 мм и 400 мм соответственно без учета коэффициента уплотнения около грунтовой зоны; 1', 2', 3', 4' – для сваи диаметром 100мм, 200 мм, 300 мм и 400 мм соответственно с учетом коэффициента уплотнения около грунтовой зоны

#### Список литературы

1. Купчикова, Н. В. Влияние уплотнения грунта со щебнем на жёсткость основания / Н. В. Купчикова // Журнал «Промышленное и гражданское строительство» №10 / -Москва, 2007 г.
2. Штоль, Т.М. Технология возведения подземной части зданий и сооружений: учеб. пособие для вузов: Спец.: «Пром. и гражд. стр-во»/ Т. М. Штоль, В. И. Теличенко, В. И. Феклин. – М.: Стройиздат, 1990. – 288с.
3. Зоценко Н.Л., Винников Ю.Л., Бабенко В.А. Усиление фундаментов общественного здания методом вдавливания свай //Реконструкция, Санкт-Петербург-2005г.: Материалы международного симпозиума. Ч.2.-С.Петербург, 1993.с.130-133.
4. Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве : тез.доклад на IX Всесоюзном науч.-техн.совещ. / - Москва : Стройиздат, 1978. – 368 с.
5. Далматов, Б. И. Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов / Б. И. Далматов, Ф. К. Лапшин, Ю. В. Россихин. – Л. : Стройиздат, 1975.
6. Далматов, Б. И. Проектирование и устройство фундаментов около существующих зданий / Б. И. Далматов. – Л. : ЛДНТП, 1976.
7. Купчикова Н.В. Учет сдвиговых деформаций свайных фундаментов с усиливающими элементами // Строительная механика и расчет сооружений. - № 3 (254). - 2014.- с. 17-22.
8. Вознесенский, В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях/ В. А. Вознесенский. Москва: Финансы и статистика, 1981. - 263 с.
9. Купчикова, Н. В. Особенности берегоукрепления набережной реки Волги свайными оболочками, каменной наброской и строительства на намывных грунтах вдоль береговой зоны Купчикова Н.В. Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 6. С. 36-39.
10. Федоров, В.С., Купчикова, Н. В. Конструктивные решения свайных фундаментов с поверхностными и концевыми уширениями для структурно-неустойчивых оснований / Вестник гражданских инженеров.- 2011. - №1. – С.88-91.
11. Егорушкин В.А., Городков А.В., Федоров В.С., Азаров В.Н.
12. Биосферная совместимость. Технологии внедрения инноваций. Города, развивающие человека // Промышленное и гражданское строительство. - № 10. - 2012. - с. 71-72.
13. Ключева Н.В., Федоров В.С. К анализу живучести внезапно повреждаемых рамных систем// Строительная механика и расчет сооружений. - № 3. - 2006.- с. 7-13.
14. Курбацкий, Е. Н. Методические указания по решению задач механики с использованием преобразования Фурье [Текст]: учебное пособие/Е. Н. Курбацкий. –Москва: МИИТ, 1979.
15. Курбацкий, Е.Н. Метод расчета строительных конструкций с использованием дискретного преобразования Фурье. В кн.: «Конструкции жилых зданий». М.: ЦНИИЭп жилища, 1987.
16. Pshenichkina V.A., Voronkova G.V., Rekunov S.S.
17. Research of the dynamical system “beam – stochastic base”// Procedia engineering. - Т. 150. - 2016.- с. 1721-1728.
18. Rytov, S . A. New geotechnical technologies/ Proceedings of the 15th European Young Geotechnical Engineers Conference. Dublin, Ireland. 11-14 September 2002.- с.311-315.
19. Lemanza, W. Lesmana, A/ Deep soil improvement technigue using combined deep mixing and iet grouting method// Proc. 17th Int. Conf/ on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering/ - Alexandra, Egypt, 5-9 october, 2009, с.2439/
20. Купчикова, Н. В. Численные исследования работы системы «свайное основание - усиливающие элементы» методом конечных элементов / Н. В. Купчикова // Журнал «Строительство и реконструкция» №6 (50) / -Москва, 2013 г. С.28-36.

21. Бабенко, В. А. Трубчатые микросваи с уширением в нижней части из втрамбованного жёсткого материала. : автореферат. дис. Кандидата технических наук : 05.23.02 – Днепропетровск, 1996 – 24 с.

© Н. В. Купчикова

**Ссылка для цитирования:**

Н. В. Купчикова. Формообразование концевых уширений буронабивных свай с учётом экспериментально-аналитического и численного исследования // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2019. № 4 (30). С. 93–98.

УДК 624

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЗОЛОШЛАКОВЫХ КОМПОНЕНТОВ,  
ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В БЕТОННОЙ СМЕСИ**

**В. С. Сви́нарев, Е. В. Шульженко, Е. С. Горбунова**

*Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия*

Представлены возможные направления улучшения строительно-технических свойств сухого пепла, образующегося в результате сжигания твердого топлива на тепловых электростанциях. Приведены результаты применения различных технологий обогащения золошлаков для расширения тенденций и увеличения объемов их использования в строительных материалах и изделиях.

**Ключевые слова:** бетонная смесь, прочность бетонного камня, золошлаковое вяжущее, замена инертных, экология, переработка золошлака.

**IMPROVING THE QUALITY OF ASH AND SLAG COMPONENTS USED IN THE CONCRETE MIX**

**V. S. Svinarev, E. V. Shulzhenko, E. S. Gorbunova**

*Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia*

Possible trends for improvement of the building-technical properties of dry ash characteristics formed as a result of solid fuel combustion at thermal power stations are presented. The results of application of different ash and slag beneficiation technologies to widen the trends and increase the volumes of their use in the construction materials and products are given.

**Keywords:** concrete mix, concrete stone strength, ash and slag binder, inert substitution, ecology, ash and slag processing.

Зола и шлак из-за разнообразия свойств энергетических углей и других видов твердого топлива и условий сгорания, а также различных способов их сбора и удаления имеют различный химический и минералогический состав, гранулометрический состав, химическую активность и температуру плавления. В соответствии с РД 34.09.603-88 по химическому составу золошлак можно разделить на кислотные и основные группы; по содержанию горючих веществ - золошлаков с низким, средним и высоким содержанием горючих веществ (потери при воспламенении ниже 5, от 5 до 10 и более 10% соответственно); по гранулометрическому составу - мелкий, средний и большой (удельная поверхность менее 150, от 150 до 300 и более 300 м<sup>2</sup> / кг соответственно); по температуре плавления - низкая, средняя и высокая (температура плавления ниже 1250, от 1250 до 1450 и более 1450 °С соответственно) [1].

Смола летучей золы, шлака и золошлаков, полученная при сжигании твердого топлива, может использоваться только в том случае, если их свойства соответствуют требованиям технических стандартов. Таким образом, в бетоне может использоваться только сертифицированная зола-унос, отвечающая требованиям стандарта ГОСТ 25818-91. Летучая зола, которая не соответствует тому или иному стандарту, может использоваться для других целей, если она соответствует необходимым требова-

ниям или может храниться на свалках. Из приведенной выше информации следует отметить, что качество переработки золы и шлака строго регламентирована. В то же время режимы сгорания на ТЭЦ не всегда способствуют производству золошлаков «стандартного набора» характеристик и свойств. По этой причине обогащение золы или шлака следует рассматривать как обычную операцию, выбирающую технологию переработки золы и шлака на ТЭС.

Размер частиц летучей золы влияет как на свойства золы портландцемента, так и на характеристики бетона, изготовленного из него. Проводя исследование Л.Ю. Гольдштейн [2] установил, что при замене 30% цемента (удельная поверхность 320 м<sup>2</sup> / кг) на кислотную мелкую золную пыль с удельной поверхностью 650 и 1050 м<sup>2</sup> / кг, образующуюся при дополнительном помоле в дробилке, текучесть растворной смеси уменьшается но прочность цемента увеличивается (см. таблицу 1) [2]. Таким образом, цемент с добавкой летучей золы, измельченный до удельной поверхности 1050 м<sup>2</sup> / кг, имеет прочность на сжатие, приблизительно равную соответствующему показателю для цемента без добавления после 28 дней отвердения. Однако в более поздний период твердения цемент с добавлением летучей золы, имеющей высокую удельную поверхность, получает на 20% более высокую прочность, чем цемент без каких-либо добавок. Высокая