

## Расширение области применения фундаментов с криволинейной формой контактной поверхности

А.Д. Дроздов<sup>1</sup>, М.А. Цыганкова<sup>2</sup>, И.Г. Осипенкова<sup>1</sup>, О.Г. Ступакова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

<sup>2</sup>Тюменский индустриальный университет

**Аннотация:** Объектом исследования являются технологические процессы устройства ленточно-оболочечных фундаментов, предмет исследования - устройство подоболочечного массива, обеспечивающего криволинейное очертание конструкции. Традиционно конструкция фундамента устраивается по грунту естественного заложения, который, в силу своих физико-механических характеристик, может ограничивать область применения данных типов фундаментов. Используя функцию желательности Харрингтона, были оценены шесть моделей грунтовых массивов с различными физико-механическими и технологическими свойствами. В результате проведенных исследований предложенные варианты были оценены на оценку «удовлетворительно» и ниже. В связи с этим, возникла необходимость улучшения качества подоболочечного массива и совершенствование технологии устройства данных типов фундамента при помощи использования экономичных и быстровозводимых грунтоцементных блоков.

**Ключевые слова:** здания, прочность, строительная отрасль, фундамент, грунт, желательность, технология.

### Введение

Одной из основных задач современного домостроения является правильный выбор конструкции фундамента с учетом инженерно-геологических условий строительной площадки и несущей способности грунта основания [1, 2]. Объектом исследования являются технологические процессы, выполняемые при строительстве фундаментов с криволинейной формой контактной поверхности (ленточно-оболочечных фундаментов – ЛОФ). ЛОФ представляет собой конструкцию с расположением монолитных ленточных фундаментов вдоль несущих осей здания, объединенных плитами переменной жесткости, устроенных по выпуклому вверх цилиндрическому (рис.1) или осесимметричному грунтовому основанию [3], закрепленными в ленточных фундаментах по двум (четырем – для осесимметричного)

сторонам вдоль образующих. Конструкция ЛОФ обладает свойством активного регулирования их взаимодействия с грунтовым основанием. Согласно рекомендациям СТО СРОП 001-2015, данную конструкцию фундамента применяют при определенных инженерно-геологических условиях и нагрузках на основание, что ограничивает область применения данных типов фундаментов.

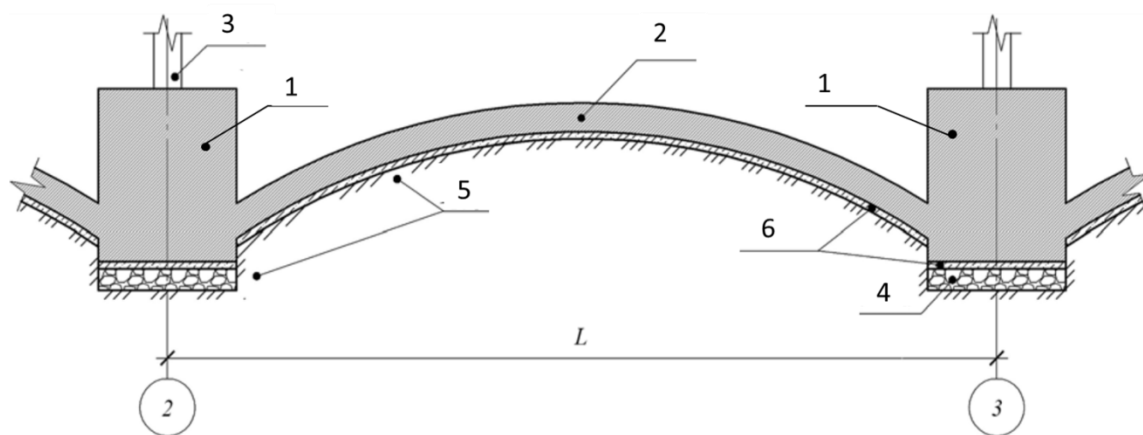


Рис. 1. – Конструкция ленточно-оболочечного фундамента

1 – ленточный фундамент (опорный контур), 2 – железобетонная полая цилиндрическая оболочка, 3 – несущие стены (колонны), 4 – щебеночная подготовка, 5 – подоболочечный массив (грунтовой (щебеночный) целик), 6 – бетонная подготовка.

Опыт применения конструкций ленточного фундамента мелкого заложения, объединенных пологими железобетонными оболочками широко известен в г. Тюмени и Тюменской области [4], также известна конструкция и технология строительства ленточных цилиндрических фундаментов с использованием мембран, известна конструкция осесимметричных фундаментов, сборных ленточных фундаментов с ломаным очертанием краевой зоны [5], свайно-оболочечных фундаментов и плитных фундаментов с демпфирующим слоем на грунтовом основании. Результаты численного моделирования и экспериментальные данные исследования взаимодействия фундаментов-оболочек с грунтовым основанием подтверждают эффективность данного типа конструкции.

Технология устройства пологих цилиндрических ленточно-оболочечных фундаментов заключается в производстве механизированной разработки грунта экскаватором до верхней отметки оболочки с учетом недобора грунта для последующего формирования грунтового массива; затем производят механизированную разработку грунта в траншеях под опорные контуры; затем вручную производят формирование грунтового массива под железобетонную оболочку с последующей доработкой грунта на дне траншей; затем производят щебеночную подготовку дна траншей с последующей бетонной подготовкой по щебню и по выпуклой вверх поверхности грунтового массива; затем устанавливают опалубку для последующего армирования ленточных опорных контуров и торцевую опалубку для оболочек; после этого производят армирование ленточных фундаментов и оболочки с последующим одновременным бетонированием конструкции фундамента.

Ленточно-оболочечный фундамент является альтернативой традиционной конструкции сплошного плитного фундамента; технический эффект данной конструкции достигается за счет снижения материалоемкости фундамента, а именно - уменьшения объема бетона и арматуры по сравнению со сплошным плитным фундаментом; снижения прямых затрат на устройство фундамента; уменьшения осадок фундамента [6]. Но при этом возникает увеличение затрат труда на производство земляных работ ручным способом (работы, связанные с формированием криволинейной формы грунтового массива под железобетонную оболочку), и, как следствие, увеличение продолжительности работ.

Снижение прямых затрат на устройство ленточно-оболочечного фундамента объясняется уменьшением объемов монолитных работ. На рисунке 2а представлена диаграмма сравнения прямых затрат двух моделей фундаментов: сплошного плитного фундамента высотой 0,6м и ленточно-

---

оболочечного высотой опорных лент 1,2м, высотой стрелы подъема оболочки – 0,75м, имеющих одинаковые размеры в крайних осях 6,0мх12,0м. Как видно из диаграммы, ленточно-оболочечный фундамент является экономически выгодной конструкцией по сравнению с конструкцией сплошного плитного фундамента в области производства монолитных работ. На рисунке 2б представлена диаграмма сравнения затрат труда, требуемых при устройстве данных моделей фундамента. Как видно из диаграммы, ленточно-оболочечный фундамент уступает сплошному плитному фундаменту по трудоемкости в части производства ручных земляных работ, связанным с формированием криволинейной поверхности грунта, а также с производством монолитных работ. Вследствие этого происходит увеличение продолжительности работ (рис.3).

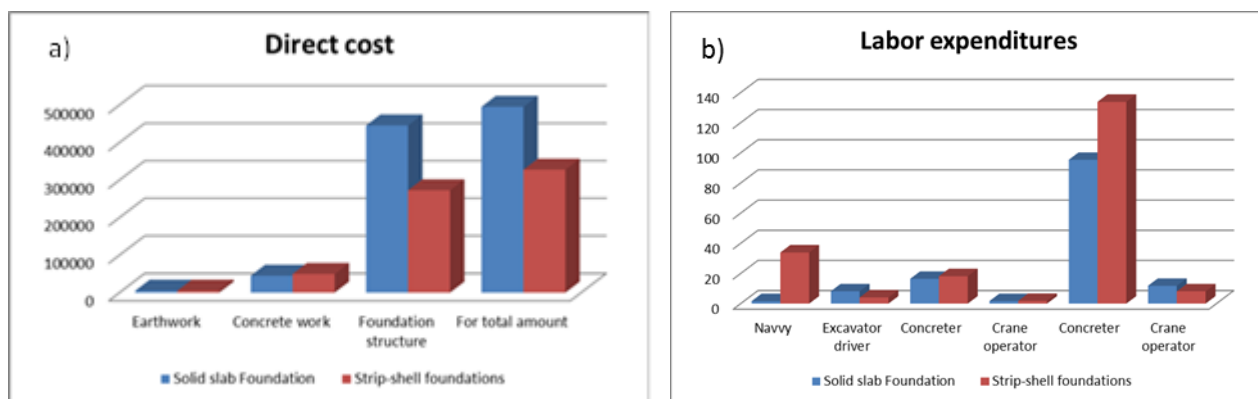


Рис. 2. – Диаграммы сравнения затрат труда фундаментов:

а) прямые затраты; б) затраты труда

В целях расширения области применения фундаментов с криволинейной формой контактной поверхности, в условиях, не отвечающих определенным требованиям по инженерно-геологическим изысканиям и нагрузкам на фундамент, авторами статьи предлагается оценить существующие грунтовые условия с использованием функции желательности Харрингтона и усовершенствовать технологию строительства ЛОФ путем

замены грунтового основания ненадлежащего качества подооболочечного массива на искусственный материал, отвечающий требованиям по прочности, несущей способности, и имеющий лучшие технико-экономические показатели.

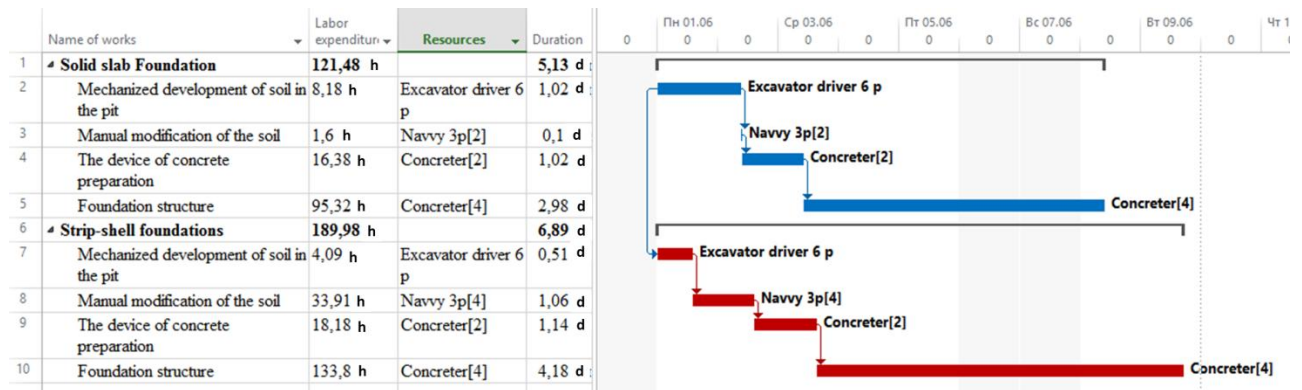


Рис. 3. – Календарные планы сравниваемых моделей фундаментов

## Методы

Вследствие того, что конфигурация фундамента имеет геометрически нестандартную форму поперечного сечения, одним из наиболее трудоемких процессов является процесс формирования криволинейной поверхности грунта. При этом грунт, служащий основанием под железобетонную оболочку, находится в естественном залегании и может не обладать желаемыми свойствами, в том числе, может быть трудно разрабатываемым, сыпучим, водонасыщенным, что увеличивает общие трудозатраты на его формирование или исключает устройство ЛОФ.

Авторами статьи был произведен анализ шести моделей подооболочечных массивов размером  $6 \times 12$  м с характерной стрелой подъема  $f = (1/5 \div 1/12)L$  из грунтов естественного сложения, отличающихся физико-механическими характеристиками:

первый вариант грунтового целика – суглинок тугопластичный (плотность грунта  $P=1,86$  г/см<sup>3</sup>, степень влажности,  $Sr=0,75$  д. ед, модуль

деформации  $E=11$  Мпа, удельное сцепление  $C=21$  кПа, угол внутреннего трения  $\varphi=29^\circ$ );

второй вариант грунтового целика – суглинок тугопластичный (плотность грунта  $P=1,87$  г/см<sup>3</sup>, степень влажности,  $Sr=0,82$  д.ед, модуль деформации  $E=9$  Мпа, удельное сцепление  $C=18$  кПа, угол внутреннего трения  $\varphi=28^\circ$ );

третий вариант грунтового целика – песок мелкий, водонасыщенный (плотность грунта  $P=1,96$  г/см<sup>3</sup>, степень влажности,  $Sr=0,9$  д.ед, модуль деформации  $E=21$  Мпа, удельное сцепление  $C=1$  кПа, угол внутреннего трения  $\varphi=33^\circ$ );

четвертый вариант грунтового целика – суглинок мягкопластичный (плотность грунта  $P=1,91$  г/см<sup>3</sup>, степень влажности,  $Sr=0,96$  д.ед, модуль деформации  $E=5$  Мпа, удельное сцепление  $C=14$  кПа, угол внутреннего трения  $\varphi=24^\circ$ );

пятый вариант грунтового целика – глина мягкопластичная (плотность грунта  $P=1,88$  г/см<sup>3</sup>, степень влажности,  $Sr=0,88$  д.ед, модуль деформации  $E=8$  Мпа, удельное сцепление  $C=33$  кПа, угол внутреннего трения  $\varphi=20^\circ$ );

шестой вариант грунтового целика – песок мелкий влажный (плотность грунта  $P=1,82$  г/см<sup>3</sup>, степень влажности,  $Sr=0,21$  д.ед, модуль деформации,  $E=25$  Мпа удельное сцепление  $C=2$  кПа, угол внутреннего трения  $\varphi=32^\circ$ ).

При этом у трех моделей стрела подъема оболочки  $f = (1/8)Ll$ , при  $Ll=6$ м, а у номеров 2, 3, 4 – варьировалась в пределах  $(1/5 \div 1/7)Ll$ .

В зависимости от физико-механических свойств грунта, исследуемые образцы были отнесены к I (песчаные грунты) и II (глина и суглинок) группам грунта по трудности разработки. Трудность разработки грунта является весомым фактором, учитывая, что формирование криволинейной поверхности осуществляется рабочими вручную при помощи совковых и

---

штыковых лопат и подлежит тщательному контролю качества. От качества поверхности подбололочного массива зависит качество железобетонной оболочки и соблюдение проектных решений.

Крутизна откосов также учитывалась при определении оценки качества исследуемых образцов, так как данный параметр свидетельствует о способности грунта выдерживать угол естественного откоса, что необходимо при формировании грунтового массива.

Экспериментальные данные по исследуемым выходным параметрам представлены в табл.1.

Таблица №1

Экспериментальные данные по выходным параметрам

№ у <sub>i</sub>	Показатели выходных параметров	Номер варианта грунтового целика					
		1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6	7	8
у1	Отношение f/l, при l=6 м	1/8	1/6	1/5	1/7	1/8	1/8
у2	Степень влажности, Sr, д.ед	0,75	0,82	0,90	0,96	0,88	0,21
у3	Модуль деформации, E, Мпа.	11	9	21	5	8	25
у4	Удельное сцепление, C, кПа	21	18	1	14	33	2
у5	Угол внутреннего трения, град.	29	28	33	24	20	32
у6	Группа грунта по трудности разработки	II	II	I	II	II	I
у7	Крутизна откосов при глубине разработки выемки от 3 до 5м	1:0,75	1:0,75	1:1	1:0,75	1:0,5	1:1

В целях оценки качества подбололочных массивов показатели выходных параметров (отклики), имеющие различные размерности, были преобразованы в частные желательности при помощи «функции желательности Харрингтона» (табл.2) [7].

Для перевода натуральных значений частных откликов в безразмерную шкалу желательности (предпочтительности) были использованы стандартные отметки:

отметки на шкале желательности от 0,00÷0,20 – очень плохо;

отметки на шкале желательности от 0,20÷0,37 – плохо;

отметки на шкале желательности от 0,37÷0,63 – удовлетворительно;

отметки на шкале желательности от 0,63÷0,80 – хорошо;

отметки на шкале желательности от 0,80÷1,00 – очень хорошо;

Обобщенная функция желательности Харрингтона  $D$  представляет собой среднее геометрическое частных желательностей и рассчитывается по формуле:

$$D = \sqrt[n]{\prod_{u=1}^n d_u}$$

При производстве расчетов значения:

$$D_1 = \sqrt[7]{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3 \cdot d_4 \cdot d_5 \cdot d_6 \cdot d_7} - \text{обобщенная функция}$$

желательности по всем откликам;

$$D_2 = \sqrt[3]{d_1 \cdot d_6 \cdot d_7} - \text{обобщенная функция желательности по}$$

технологическим откликам.

Таблица № 2

Натуральные и обобщенные по функции желательности отклики

№	Натуральные значения откликов							Частные желательности							D <sub>1</sub> / Оценка	D <sub>2</sub> / Оценка
	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>5</sub>	y <sub>6</sub>	y <sub>7</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	d <sub>5</sub>	d <sub>6</sub>	d <sub>7</sub>		
1	0,75	0,75	11	21	29	2	0,75	1	0,35	0,3	0,42	0,56	0,37	0,35	0,439/ Удовл.	0,506/ Удовл.
2	1	0,82	9	18	28	2	0,75	1	0,28	0,26	0,37	0,53	0,37	0,35	0,407/ Удовл.	0,506/ Удовл.
3	0,83	0,9	21	1	33	1	1	1	0,21	0,5	0,1	0,61	1	0,2	0,386/ Удовл.	0,585/ Удовл.
4	1,17	0,96	5	14	24	2	0,75	1	0,18	0,2	0,31	0,47	0,37	0,35	0,352/ Плохо	0,506/ Удовл.
5	0,75	0,88	8	33	20	2	0,5	1	0,26	0,24	0,61	0,40	0,37	0,5	0,433/ Удовл.	0,570/ Удовл.
6	0,75	0,21	25	2	32	1	1	1	0,7	0,63	0,12	0,6	1	0,2	0,483/ Удовл.	0,585/ Удовл.



## Результаты и обсуждение

В результате произведенных расчетов было установлено, что грунты естественного залегания не в полной мере отвечают всем техническим требованиям, предъявляемым к грунтовому массиву. Ни один из сравниваемых образцов не получил отметки выше «удовлетворительно».

Анализ полученных данных и оценок экспериментальных моделей свидетельствует о необходимости улучшения свойств и качеств подбололочечного массива, в целях повышения прочностных характеристик, упрощения и снижения трудоемкости производства работ, улучшения качества поверхности грунтового целика и расширения области применения ЛОФ.

Проанализировав данные таблицы 2, мы выделили натуральные значения откликов, имеющие оценку по  $D_1$  – хорошо, по  $D_2$  – очень хорошо (см. табл.3), которые приняты, как «эталонные» для принятия решения по выбору нового материала подбололочечного массива.

Такой материал должен являться качественным основанием под железобетонную оболочку, создавать и сохранять геометрическую форму поверхности, согласно проектной документации; иметь физико-механические свойства, повышающие прочность и устойчивость подбололочечного массива; снижать трудозатраты на устройство фундамента; быть доступным и экономичным.

Таблица № 3  
Натуральные и обобщенные по функции желательности отклики  
эталонного образца

№ вар.	Натуральные значения откликов							Частные желательности							D <sub>1</sub> / Оценка	D <sub>2</sub> / Оценка
	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>5</sub>	y <sub>6</sub>	y <sub>7</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	d <sub>5</sub>	d <sub>6</sub>	d <sub>7</sub>		
Эталон	0,75	0,21	25	33	33	1	0	1	0,7	0,63	0,61	0,61	1	1	0,77/ Хорошо	1,00/ Очень хорошо

С учетом имеющихся ориентировочных (эталонных) показателей, авторами статьи предлагается формировать подбололочечное пространство из

сборных грунтоцементных блоков, имеющих прочность на сжатие меньше прочности железобетонной оболочки, но больше прочности на сжатие грунта [8]. Грунтоцемент широко используется в современном строительстве в качестве оснований под дорожное полотно, в качестве устройства фундаментов глубокого заложения, а также - в устройстве оснований и различных строительных конструкций [9-10]. Изготовление сборных грунтоцементных блоков в специальных формах на прилегающем к строительной площадке полигоне, укладываемых краном на подготовленное основание, обеспечивает снижение трудоемкости устройства и повышение качества подбололочного пространства.

Физико-механические свойства грунтоцементной смеси во много раз превосходят свойства грунтов, например, при содержании цемента  $i=5\%$  грунтоцемент обладает значением модуля деформации  $E=134,7$  МПа, плотность  $P=1,36$  т/м<sup>3</sup>, призмная прочность  $R^H=1,027$  МПа.

Поверхность грунтоцементных блоков обеспечивает ровное и прочное основание под железобетонную оболочку, в связи с чем возможна отмена устройства подготовки из тощего бетона.

Технология устройства пологих цилиндрических фундаментов с применением грунтоцементных блоков включает следующие технологические операции:

- 1) срезка растительного слоя грунта механизированным способом при помощи бульдозера, вывоз или сохранение плодородного грунта в пределах строительной площадки;
  - 2) производство планировочных работ бульдозером по выравниванию естественного рельефа грунта;
  - 3) разработка грунта в котловане до отметки подошвы фундамента с учетом недобора грунта;
  - 4) доработка механизированным и ручным способом дна котлована;
-

- 5) щебеночная подготовка основания фундамента (засыпка и уплотнение);
- 6) монтаж грунтоцементных блоков;
- 7) установка опалубки ленточных фундаментам и торцевых частей оболочек;
- 8) армирование ленточных фундаментам и оболочек;
- 9) послойное бетонирование ленточных фундаментам и оболочек;
- 10) уход за бетоном и распалубливание конструкции.

Дополнение фундамента грунтоцементными блоками, имеющими прочность на сжатие меньше прочности железобетонной оболочки, но больше прочности на сжатие грунта, с установкой их в подоболочечном пространстве в пролетной зоне, обеспечивает повышение качества подоболочечного пространства, снижение трудозатрат на производство земляных работ, обеспечивает возможность выполнения работ при воздействии атмосферных осадков; сохраняет технологическую простоту производства фундаментам с криволинейной формой контактной поверхности.

### **Выводы**

Анализ существующих грунтовых условий строительных площадок показывает необходимость улучшения качеств подоболочечных массивов.

Использование грунтоцементных блоков по сравнению с технологией устройства ЛОФ по грунту имеет ряд преимуществ:

- расширяет область применения фундаментам с криволинейной формой контактной поверхности при прочных, но сыпучих грунтах;
- расширяет область применения фундаментам с криволинейной формой контактной поверхности при трудно разрабатываемых грунтах;

- расширяет область применения фундаментов с криволинейной формой контактной поверхности независимо от погодных условий, в том числе, осадков;
- повышает прочностные характеристики фундамента;
- ведет к снижению объема бетона и арматуры опорных контуров;
- снижает общую осадку фундамента в момент строительства и эксплуатации здания;
- в условиях массовой застройки повышает технологичность фундамента;
- повышает качество криволинейной поверхности, соприкасающейся с железобетонной оболочкой;
- повышает качество геометрической формы подболовчатого массива.

### Литература

1. Korolev K.V Terminal (maximum) bearing capacity of the saturated bed of a strip foundation // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2013. Pp. 1–7.
  2. Korolev K.V. Intermediate bearing capacity of saturated bed of strip foundation // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2014. № 1(51). Pp. 1–8.
  3. Пронозин Я.А., Мельников Р.В. Результаты экспериментально-теоретических исследований взаимодействия осесимметричного фундамента-оболочки с грунтовым основанием // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2010. №5. С.114-119.
  4. Ким Б.Г., Пронозин Я.А., Цыганкова М.А., Волосюк Д.В. Опыт возведения ленточных фундаментов мелкого заложения, объединенных пологими оболочками в сложных инженерно-геологических условиях г. Тюмени // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. URL: [science-education.ru/111-10407](http://science-education.ru/111-10407).
-

5. Крахмальный Т.А. Исследование влияния увеличения периметра ленточного фундамента на несущую способность основания// Инженерный вестник Дона, 2011. - № 1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2009/128.

6. Rachkov D.V., Pronozin Ya.A., Chikishev V.M. Qualified method of layer-by-layer summation to define the settlement of foundation. Magazine of Civil Engineering. 2017. No 4 (72). Pp. 36-45.

7. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. - 139 с.

8. Исаев Б.Н., Бадеев С.Ю., Логутин В.В., Кузнецов М.В. Проектирование оснований, усиленных структурными армоэлементами из цемента-грунта // Инженерный вестник Дона, 2011. - № 1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2011/336/.

9. Вагидов М.М., Зоценко Н.Л. Грунтоцементные основания и фундаменты // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. № 26, 2012. С. 94-102

10. Кірічек Ю. О., Комісаров Г.В. Конструкції з грунтоцементу для зведення фундаментів будівель і споруд // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури, 2019, № 3 (253-254) ISSN 2312-2676. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.040719.42.462

### References

1. Korolev K.V Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2013. Pp. 1–7.
  2. Korolev K.V. Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2014. № 1(51). Pp. 1–8.
  3. Pronozin Ya.A., Melnikov R.V. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitelstvo. 2010. № 5. Pp.114-119.
  4. Kim B.G., Pronozin Ya.A., Tsygankova M.A., Volosyuk D.V. Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. 2013. № 5. URL: science-education.ru/111-10407.
-



5. Krakhmal'nyj T.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. № 1. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2009/128](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2009/128).
6. Rachkov D.V., Pronozin Ya.A., Chikishev V.M. Magazine of Civil Engineering. 2017. No 4 (72). Pp. 36-45.
7. Adler Yu.P., Markova E.V, Granovsky Yu.V. Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy [Experiment planning when searching for optimal conditions Experiment planning when searching for optimal conditions]. M: Nauka. 1976. 139 p.
8. Isaev B.N., Badeev S.Yu., Lagutin V.V., Kuznetsov M.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. № 1. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2011/336/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2011/336/).
9. Vagidov M.M., Zotsenko N.L. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. No 26. 2012. Pp. 94-1024750/9.
10. Kirichek Yu. O., Komiscarov G.V. Visnik Pridniprovskoï derzhavnoï akademiiï budivnitstva ta arkhitekturi. 2019. No 3 (253-254). DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.040719.42.46