



CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 11, № 1, 2020

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2020.1.03

УДК 624.151.5

## ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПЕСЧАНОЙ ПОДУШКИ ЗА СЧЕТ ПРЕНАПРЯЖЕНИЯ АРМИРУЮЩИХ СЛОЕВ ГЕОСИНТЕТИКА

**А.М. Ширанов, А.Л. Невзоров**

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 17 декабря 2019  
Принята: 25 января 2020  
Опубликована: 27 марта 2020

#### Ключевые слова:

армированная песчаная подушка, торф, искусственное основание, предварительное напряжение, физическое моделирование.

### АННОТАЦИЯ

Ускорить включение армирующих слоев геосинтетика в работу и тем самым повысить устойчивость и снизить деформации искусственного основания можно за счет их предварительного напряжения. В статье приводятся результаты исследований двух способов устройства армированных песчаных подушек. В первом из них эффект преднапряжения достигается за счет определенного порядка послойного уплотнения грунта подушки, во втором – закладкой в нее между контурами фундаментов набухающего материала.

Эксперименты проводились в лабораторном лотке с пневматическим загруженным устройством. На поверхности подушки размещались три штампа, объединенные общей рамой. Для оценки напряженно-деформированного состояния основания использовался бесконтактный метод цифровой трассерной визуализации. Результаты экспериментов представлены в виде графиков зависимости осадки штампов от давления и векторных полей перемещений частиц.

Моделирование подтвердило высокую эффективность предварительного напряжения. Предельное давление на основание с двухслойным горизонтальным армированием и преднапряжением армирующих слоев по первому способу составило 195 кПа, по второму способу – 165 кПа, тогда как при отсутствии предварительного напряжения эта величина составляла 110 кПа. Существенно снизились и деформации основания.

© ПНИПУ

© **Ширанов Алексей Михайлович** – аспирант, e-mail: alexeyshiranov@gmail.com.

**Невзоров Александр Леонидович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, OrcidID: 0000-0002-6547-2741, e-mail: a.l.nevzorov@yandex.ru.

**Alexey M. Shiranov** – Ph.D. Student, e-mail: alexeyshiranov@gmail.com.

**Alexandr L. Nevzorov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, OrcidID: 0000-0002-6547-2741, e-mail: a.l.nevzorov@yandex.ru.

## INCREASING THE STABILITY OF THE SAND CUSHION BY PRESTRESSING THE REINFORCING LAYERS OF GEOSYNTHETICS

A.M. Shiranov, A.L. Nevzorov

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 17 December 2019  
Accepted: 25 January 2020  
Published: 27 March 2020

#### Keywords:

reinforced sand cushion, peat, artificial foundation, prestressing, physical modeling.

### ABSTRACT

The use of prestressing of geosynthetics allows accelerate their inclusion in work, reduce deformations and gaining bearing capacity of artificial foundation. The article presents results of research of two methods of construction reinforced sand cushions. In the first case, the effect of prestressing is achieved due to a certain order of layer-by-layer soil compaction of the cushion, in the second – by laying of the swellable material between the contours of the foundations. The experiments were carried out in a laboratory tank with a pneumatic loading device. There are three stamps united by a common frame on the surface of the cushion. To assess the stress-strain state of the soil foundation, the non-contact digital tracer imaging method was used. The experimental results are presented in the graphs form of the dependence of the stamp settlement on pressure and vector fields of particle movements. Modeling has confirmed the high efficiency of prestressing. The ultimate pressure on the soil foundation with two-layer horizontal reinforcement and prestressing of the reinforcing layers in the first method was 195 kPa, in the second method – 165 kPa, whereas in the absence of prestressing this value was 110 kPa. Foundation deformations also decreased significantly.

© PNRPU

---

## Введение

Практика строительства на заболоченных территориях показывает, что при мощности слоя торфа до 3–4 м фундаменты на песчаной подушке, особенно для зданий с подвалом, могут быть более эффективными по сравнению с традиционно применяемыми свайными фундаментами. Армирование подушки геосинтетическими материалами позволяет сократить ее размеры и способствует выравниванию осадок фундаментов [1–4], однако включение слоев геосинтетика в работу, т.е. появление в них растягивающих напряжений, происходит по мере развития деформаций подушки и вмещающего ее торфа [5]. Ускорить этот процесс и тем самым повысить устойчивость и снизить деформации искусственного основания можно за счет предварительного напряжения армирующих слоев [6–8].

## Основная часть

Эксперименты А.М. Eltohamy в лабораторном лотке показали, что преднапряжение слоя геосинтетика всего лишь на 2 % от его предельной прочности на растяжение привело к двукратному увеличению несущей способности искусственного основания [9]. А.И. Dhattrak добился снижения общей осадки модели искусственного основания в два раза при преднапряжении слоя геоармирования на 4 % [10]. Преднапряжение геоармирования на 1,25 % от предельной прочности позволило Н.К. Aravind уменьшить осадки испытываемого искусственного основания в два раза [11]. Преднапряжение во всех отмеченных выше работах осуществлялось с помощью механических приспособлений.

Известен аналогичный способ преднапряжения полотнищ геосинтетика в основании резервуара, где концы полотнищ крепятся к кольцевым элементам, диаметр которых превышает диаметр резервуара [12]. В этом способе армирующий материал представляет собой закрепленную по контуру круглую натянутую мембрану.

Осуществить преднапряжение армирующего материала можно еще и путем отсыпки и уплотнения насыпи от центра к периферии, т.е. за счет возникающих в основании откосов горизонтальных перемещений грунта [13].

Авторами настоящей статьи запатентовано два способа преднапряжения армирующих слоев при устройстве искусственных оснований. В первом из них эффект достигается за счет определенного порядка послойного уплотнения грунта подушки (рис. 1) [14].

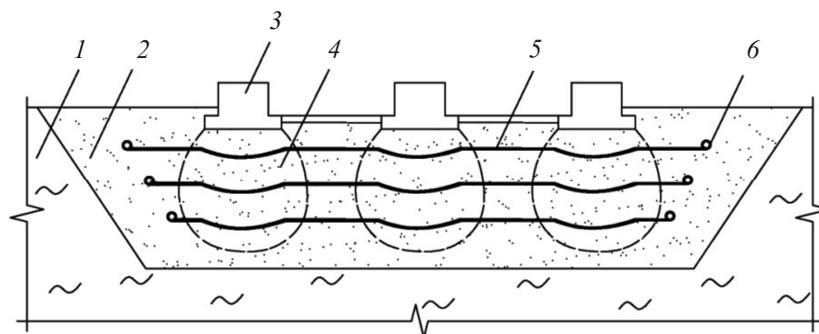


Рис. 1. Фундаменты, опирающиеся на песчаную подушку с преднапряженным армированием: 1 – слабый грунт; 2 – песок; 3 – фундамент; 4 – область действия создаваемых фундаментом вертикальных сжимающих напряжений; 5 – армирующий материал; 6 – анкерующий элемент

Fig. 1. Foundations based on a sand cushion with prestressed reinforcement:  
1 – soft soil; 2 – sand; 3 – foundation; 4 – range of vertical compressive stresses created by the foundation; 5 – reinforcing material; 6 – anchoring element

Отсыпка песка в подушку ведется послойно. Слой, подстилающий армирующий материал, уплотняется лишь между контурами запроектированных ленточных фундаментов. По его выровненной поверхности поперек котлована раскатываются полотнища геосинтетика, их концы оборачиваются вокруг труб, играющих роль анкеров. Слой песка, покрывающий полотнища, уплотняется по всей поверхности котлована, что приводит к появлению в геосинтетике прогибов над ранее не уплотненными участками подстилающего слоя, а значит, и к преднапряжению полотнищ.

Во втором способе преднапряжение обеспечивается закладкой в песок подушки на участках, расположенных вне контуров фундаментов, вещества увеличивающегося в объеме при увлажнении, например, расширяющегося цемента или набухающей глины [15]. Уплотнение подушки выполняется послойно и равномерно по всей площади котлована, анкеровка концов полотнищ выполняется как в первом способе. После достижения проектной отметки приступают к увлажнению подушки, например, прекратив водоотлив из котлована. Увеличение объема грунта приводит к формированию выгибов в армирующих слоях и их преднапряжению (рис. 2). После стабилизации деформаций поверхность подушки выравнивают и приступают к устройству фундаментов.

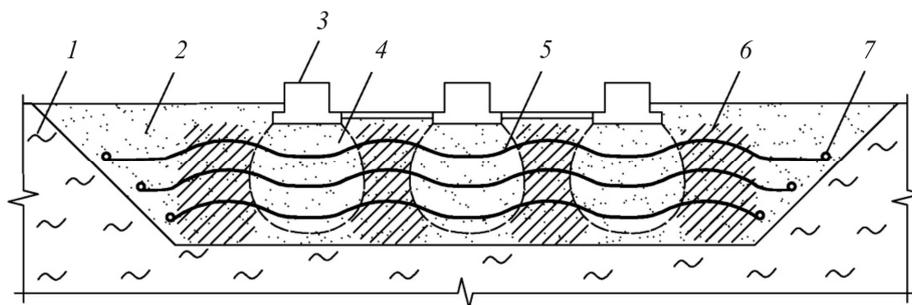


Рис. 2. Фундаменты на песчаной подушке с включениями набухающего вещества: 1 – слабый грунт; 2 – песок; 3 – ленточный фундамент; 4 – область действия вертикальных сжимающих напряжений; 5 – армирующий материал; 6 – песчаный грунт с добавлением увеличивающегося в объеме материала; 7 – анкерующий элемент

Fig. 2. Foundations on a sand cushion with inclusions of swelling material: 1 – soft soil; 2 – sand; 3 – strip foundation; 4 – range of vertical compressive stresses; 5 – reinforcing material; 6 – sand soil with the addition of increasing in volume material; 7 – anchoring element

В настоящей статье представлены результаты лабораторных экспериментов, подтвердивших эффективность предложенных способов преднапряжения армирующих слоев в песчаной подушке.

## Методика испытаний

Испытания проводились на лабораторном стенде, изготовленном компанией «ГЕОТЕК» (г. Пенза). Стенд включает лоток с прозрачными стенками, пневматическое загрузочное устройство, управляемое с помощью специального программного обеспечения, и датчики перемещений с точностью измерений до 0,01 мм. Размеры лотка в плане 72×16 см, высота 54 см.

Модель песчаной подушки формировалась из мелкого песка, ее уплотнение выполнялось послойно до коэффициента пористости 0,58–0,64. Влажность песка поддерживалась постоянной в пределах 5–6 %. Деформационно-прочностные характеристики песка при указанном значении коэффициента пористости были следующими: одометрический модуль деформации 11,8 МПа, угол внутреннего трения 32°, удельное сцепление равно нулю.

Для упрощения формирования моделей вместо торфа применяли поролон с модулем деформации  $E_{\text{oed}} = 0,6$  МПа, что позволило избежать попадания органических частиц в песок и снизить трудоемкость процесса моделирования при многократной загрузке-разгрузке лотка. Геосинтетик моделировался армированной полиэтиленовой пленкой толщиной 550 мкм с прочностью на разрыв 3,3 кН/м.

В качестве набухающего материала использовался высушенный осадок пруда-отстойника хвостохранилища одного из предприятий алмазодобывающей промышленности Архангельской области. В состав этих отложений входит более 60 % сапонита – минерала красноватого цвета, схожего по свойствам с монтмориллонитом [16]. Набухающий материал добавлялся в песок в количестве 25 мас. %.

На дно лотка укладывались слои щебня и песка, образующие минеральное дно болота. Затем устраивалась песчаная подушка. Поролон, заменяющий торф, размещался по ее краям. На верх подушки устанавливались три штампа шириной по 5 см, нагрузка на которые передавалась через распределительную раму. Компрессорная станция обеспечивала максимальное давление под штампами 265 кПа. Следует заметить, что подобные испытания

обычно проводятся с одним штампом. Использование трех штампов позволило учесть их взаимное влияние друг на друга и приблизить модель к типичному искусственному основанию жилого дома. При организации экспериментов масштабные коэффициенты не использовались, так как их целью была проверка эффективности преднапряжения армирующих слоев по сравнению с традиционными решениями [17, 18].

Испытывались 4 модели песчаной подушки:

- без армирования;
- с двухслойным горизонтальным армированием без преднапряжения;
- с преднапряжением геосинтетика за счет поочередного послойного уплотнения песка;
- с преднапряжением геосинтетика за счет использования набухающего материала.

Для оценки напряженно-деформированного состояния основания использовался бесконтактный метод цифровой трассерной визуализации – Particle Image Velocimetry, являющийся эффективным инструментом для исследования траектории перемещений частиц [19]. Принцип работы данного метода основан на измерении перемещений за единицу времени частиц-маркеров, находящихся в рассматриваемом сечении [20]. В нашем случае перемещения частиц песка регистрировались на цифровую камеру с частотой 1 кадр в секунду. Последующая обработка изображений в программе PIVview 2C заключалась в настройке области обработки и размера расчетной сетки, шага поиска, свойств векторов и др.

## Результаты экспериментов

На всех приведенных ниже рисунках слева вверху представлено исходное состояние модели, справа от нее – график зависимости осадки штампов  $S$  от давления на основание  $p$ , построенный не менее чем по трем испытаниям, внизу – векторное поле перемещений частиц в модели подушки, полученное при осадке штампов 10 мм.

1. *Модель без армирования.* В процессе нагружения, начиная с давления под штампами 14 кПа, наблюдалось развитие поперечных деформаций подушки, что привело к потере устойчивости основания (рис. 3). Осадка в 5 % высоты подушки была достигнута при 18 кПа, а 10 % – при 30 кПа.

На нижнем изображении выделены участки с различными величинами перемещения частиц песка при давлении под штампами 23 кПа (осадка 10 мм). Красным и фиолетовым цветом отмечены участки, имеющие наибольшие перемещения, тогда как зеленым и желтым – имеющие меньшие перемещения. Их очертание совпадает с так называемыми «луковицами» напряжений, создаваемых штампами. Отсутствие векторов в определенных зонах объясняется нулевыми перемещениями частиц-маркеров, а также наличием препятствий для их регистрации – бликов на стеклянной стенке лотка и решетки усиления. Смещение вправо грунта под подошвой центрального фундамента объясняется поперечными деформациями подушки, т.е. потерей ей устойчивости именно в этом направлении.

2. *Модель с двухслойным горизонтальным армированием без предварительного напряжения.* Армирование выполнялось двумя горизонтальными слоями, расположенными на глубине 50 и 100 мм (рис. 4).

График  $S = f(p)$  благодаря наличию армирующих слоев оказался более пологим по сравнению с графиком, полученным при испытаниях предыдущей модели. Предельное давление на основание существенно возросло и составило 110 кПа. При давлении 125 кПа фундаменты переместились на 5 % от высоты подушки, осадка в 10 % была достигнута при 186 кПа.

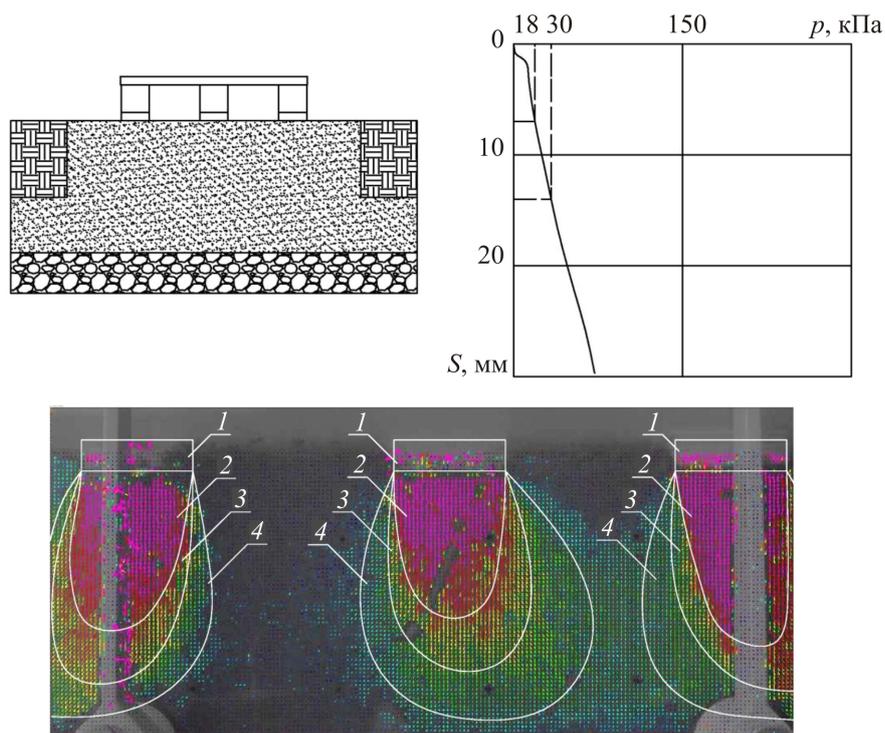


Рис. 3. Модель подушки без армирования: 1 – штампы; 2 – зоны максимальных перемещений; 3 – зоны средних перемещений; 4 – зоны минимальных перемещений частиц  
 Fig. 3. Cushion model without reinforcement: 1 – stamps; 2 – zones of maximum displacements; 3 – zones of medium displacements; 4 – zones of minimum displacements of particles

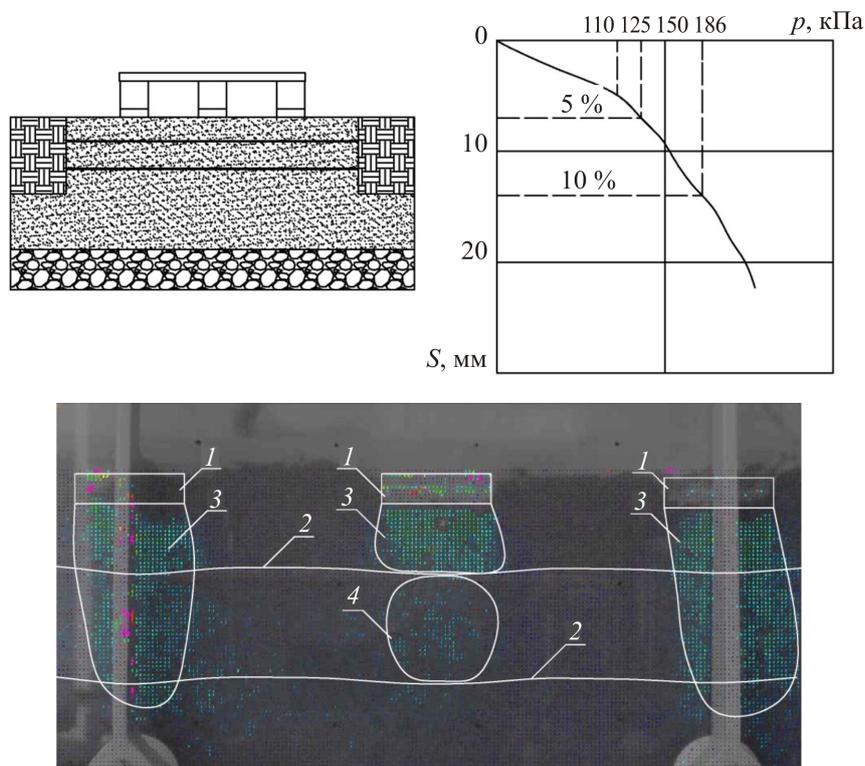


Рис. 4. Двухслойное армирование без предварительного напряжения: 1 – штампы; 2 – слои армирования; 3 – зоны средних перемещений; 4 – зоны минимальных перемещений частиц песка  
 Fig. 4. Two-layer reinforcement without prestressing: 1 – stamps; 2 – reinforcement layers; 3 – medium displacement zones; 4 – zones of minimal displacement of sand particles

На нижнем изображении, соответствующем осадке 10 мм и давлению под штампами 155 кПа, виден эффект армирования подушки. Разница в перемещениях частиц под подошвой центрального фундамента по сравнению с предыдущей моделью весьма существенна. Снизилась и перемещения частиц под первым и вторым слоями армирования. Сравнительно большие перемещения песка под крайними фундаментами объясняются поперечными деформациями подушки в краевых зонах.

3. Модель с преднапряжением армирующих полотнищ за счет очередности послойного уплотнения песка. Как и в предыдущей модели, в подушку укладывалось два слоя армирующего материала. Первоначальное уплотнение песка под ними выполнялось на участках вне контуров фундаментов – по краям модели и между фундаментами. Далее поверхность выравнивалась, укладывалось полотнище армирующего материала, отсыпался и равномерно по всей площади подушки уплотнялся следующий слой песка. Это приводило к возникновению прогибов и предварительному напряжению армирующего материала. Повторив данные операции необходимое количество раз, возводили подушку заданной высоты.

Стоит отметить значительное повышение несущей способности искусственного основания – до 195 кПа (рис. 5). Осадка подушки, равная 5 % ее первоначальной высоты, была достигнута при давлении под штампами 215 кПа, а 10 % – при давлении 255 кПа. Общая осадка модели не превысила 15 мм.

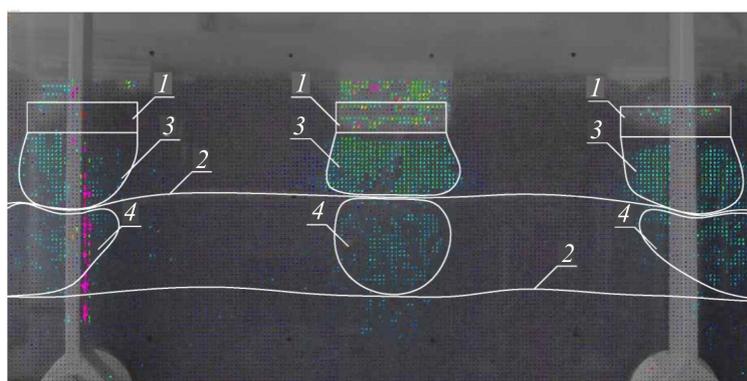
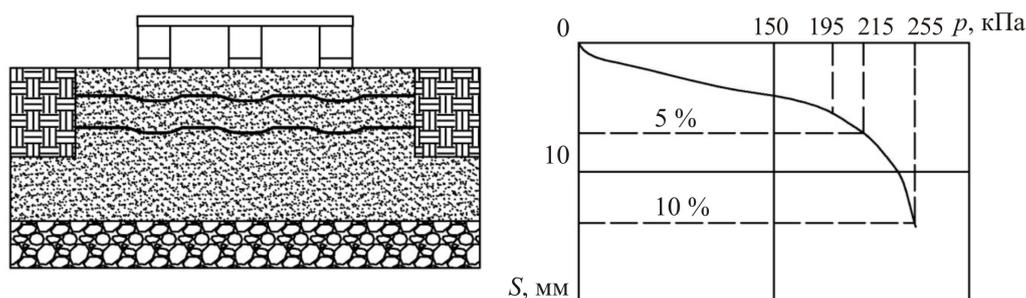


Рис. 5. Модель подушки с двухслойным армированием с предварительным напряжением армирующих слоев за счет очередности послойного уплотнения: 1 – штампы; 2 – слой армирования; 3 – зоны средних перемещений; 4 – зоны минимальных перемещений  
 Fig. 5. Cushion model with two-layer reinforcement with prestressing reinforcing layers due to the sequence of layer-by-layer compaction: 1 – stamps; 2 – reinforcement layer; 3 – zones of medium movements; 4 – zones of minimum movements

На векторном поле перемещений частиц размеры зон уплотнения грунта под штампами примерно совпадают с предыдущим рисунком (см. рис. 4), хотя изображение получено при давлении 245 кПа на нисходящем участке графика зависимости  $S = f(p)$ , что свидетельствует

об эффективности предварительного напряжения полотнищ армирующего материала. Следует отметить наличие горизонтальных перемещений грунта между слоями армирования в крайних зонах подушки.

4. Модель с преднапряжением армирующих полотен за счет использования набухающего материала. При устройстве подушки в зонах, расположенных вне контуров штампов, в песок добавлялся набухающий грунт (рис. 6). Уплотнение велось послойно и равномерно по всей поверхности модели. После достижения требуемой высоты устраивался технологический перерыв, необходимый для увлажнения подушки и набухания смеси.

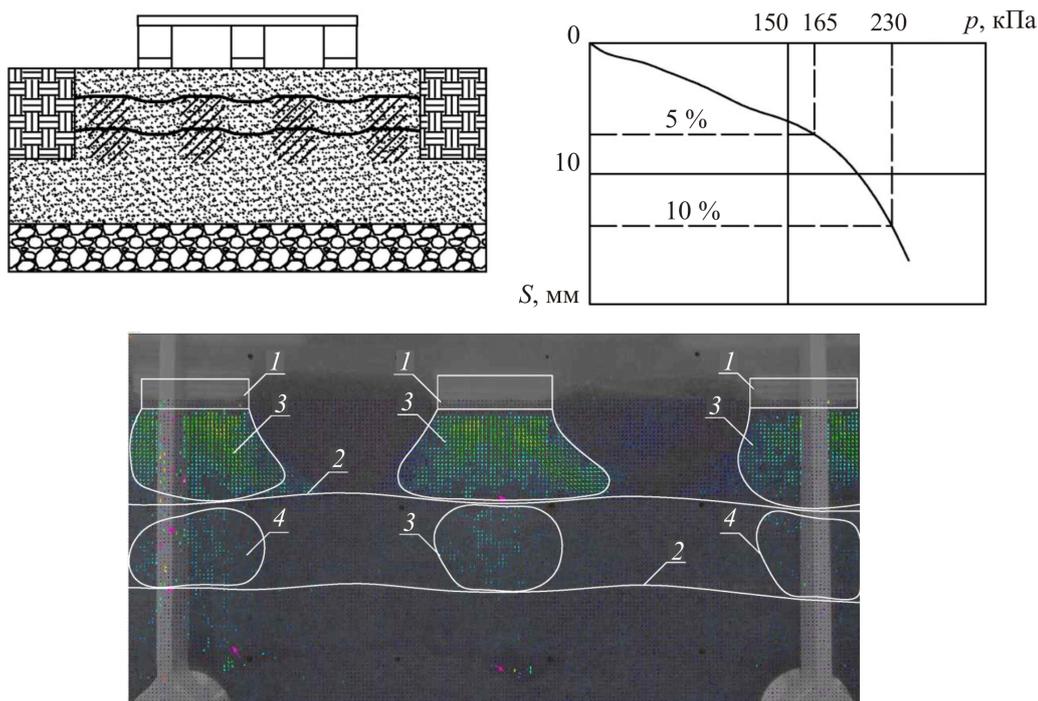


Рис. 6. Двухслойное армирование с преднапряжением армирующих слоев за счет добавки набухающего материала: 1 – штампы; 2 – зоны средних перемещений; 3 – зоны минимальных перемещений; 4 – расположение армирующих слоев  
Fig. 6. Two-layer reinforcement with prestressing reinforcing layers due to the addition of swelling material: 1 – stamps; 2 – zones of medium displacements; 3 – zones of minimal displacements; 4 – location of reinforcing layers

На нижнем изображении, полученном при осадке фундаментов 10 мм и давлении 200 кПа, зарегистрированы относительно большие перемещения частиц грунта по сравнению с предыдущей моделью.

При схожем характере деформаций наблюдались большие общие осадки, что объясняется разной степенью предварительного напряжения полотнищ армирования, хотя в целом наличие включений из набухающего грунта и дало положительный эффект. По сравнению с результатами испытаний второй модели, т.е. с армированием без преднапряжения, предельное давление на основание увеличилось в 1,5 раза и составило 165 кПа, боковые выпоры были незначительными. Осадка в 5 % высоты подушки достигнута при давлении 165 кПа, 10 % – при 230 кПа.

Таким образом, проведенные эксперименты по физическому моделированию показали, что предварительное напряжение армирующего материала позволяет уменьшить деформа-

ции искусственного основания и увеличить его несущую способность. Первый способ, в котором преднапряжение достигалось за счет определенной последовательности уплотнения слоев песка в подушке, оказался более эффективным по сравнению со вторым, где использовались добавки к песку набухающего грунта.

## **Заключение**

1. Проведенные эксперименты по физическому моделированию армированных песчаных подушек в лабораторном лотке показали, что преднапряжение армирующего материала позволяет уменьшить осадки и повысить несущую способность искусственного основания, эффект достигается за счет включения армирующего материала в работу уже на стадии возведения подушки.

2. Метод предварительного напряжения армирующих слоев за счет очередности послойного уплотнения грунта позволяет увеличить несущую способность подушки более чем на 70 %, по сравнению с моделью без преднапряжения. Метод, основанный на использовании набухающего грунта, дает эффект прироста несущей способности подушки на 50 %. Предварительное напряжение снижает общие осадки модели.

## **Библиографический список**

1. Recommendation for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements EBGeo. – Ernst & Sohn, 2011.
2. Mir B.A., Ashraf S. Evaluation of Load-Settlement Behaviour of Square Model Footings Resting on Geogrid Reinforced Granular Soils // Proceedings of the 2nd GeoMEast International Congress and Exhibition on Sustainable Civil Infrastructures, October, 2018. – Cairo, Egypt, 2018. – P. 103–126. DOI: 10.1007/978-9-030-01923-5
3. Singh A. Load-settlement behaviour of geogrid-reinforced sand cushion [Электронный ресурс] // сайт <https://www.researchgate.net/> URL: <https://www.researchgate.net/publication/331633683> (дата обращения: 10.12.2019). DOI: 10.5281/zenodo.2588323
4. Viki V. Behavior of Square Footing Resting on Weak Soil Reinforced with Geotextiles // International Journal for Scientific Research & Development. – 2017. – Vol. 5, iss. 03. – P. 758–762.
5. Jones B.R., Jacobsz S.W., van Rooy L. A qualitative model study on the effect of geosynthetic foundation reinforcement in sand overlying very soft clay // Journal of the South African Institution of Civil Engineering. – 2016. – Vol. 58, № 2. – P. 25–34.
6. Shukla S.K., Yin J.H. Fundamentals of Geosynthetic Engineering. – Taylor & Francis Group, UK, 2006. – 410 p.
7. Джоунс К.Д. Сооружения из армированного грунта. – М.: Стройиздат, 1989.
8. Lovisa J., Shukla S.K., Sivakugan N. Behaviour of prestressed geotextile reinforced sand bed supporting a loaded circular footing // Geotextiles and Geomembranes. – 2009. – Vol. 28. – P. 23–32.
9. Eltohamy A.M. The effect of geogrid reinforcement pre-stressing on the performance of sand bed supporting a strip foundation // International Journal of Civil and Environmental Engineering. – 2016. – Vol. 10 (8). – P. 1037–1042.
10. Dhatrak A.I., Khan Farukh A. Behaviour of Square footings on Prestressed Geosynthetic Reinforced Sand // The International Journal of Engineering and Science. – 2014. – Vol. 3, iss. 7. – P. 72–83.

11. Aravind H.K., Sreekumar N.R. Load settlement behavior of footing resting on prestressed geogrid reinforced sand overlying clay // 50th Indian Geotechnical conference, 17–19 December, 2015. – Pune, India, 2015.
12. Способ подготовки основания цилиндрического резервуара на слабых неравномерно сжимаемых грунтах: пат. Рос. Федерация / Шадунц К.Ш. – № 2308574, заявл. 19.01.2006; опубл. 20.10.2007.
13. Lackner C., Bergado D.T., Semprich S. Prestressed reinforced soil by geosynthetics – Concept and experimental investigations // *Geotextiles and Geomembranes*. – 2013. – Vol. 37. – P. 109–123.
14. Способ подготовки основания здания на слабых грунтах: пат. Рос. Федерация / Невзоров А.Л., Ширанов, А.М., Коршунов А.А. – № 2674488; заявл. 15.03.2018; опубл. 11.12.2018.
15. Способ подготовки основания здания на слабых грунтах: пат. Рос. Федерация / Невзоров А.Л., Ширанов, А.М. – № 2684558; заявл. 14.06.2018; опубл. 09.04.2019.
16. Влияние природы электролита на процесс коагуляции сапонит-содержащей суспензии / А.С. Тутьгин, М.А. Айзенштадт, А.М. Айзенштадт, Т.А. Махова // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. – 2012. – № 5. – С. 470–474.
17. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. – М.: Высш. шк., 1985. – 352 с.
18. Насонов И.Д. Моделирование горных процессов. – М.: Недра, 1969. – 207 с.
19. Процедура определения полей деформаций в песчаных и глинистых грунтах методом PIV / А.В. Мельников [и др.] / ООО НПП «Геотек». – Пенза, 2012. – 24 с.
20. Руководство пользователя программы Actual Flow / Институт теплофизики СО РАН. – Новосибирск, 2008. – 165 с.

## References

1. Recommendation for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements EBGEO. Ernst & Sohn, 2011.
2. Mir B.A., Ashraf S. Evaluation of load-settlement behavior of square model footings resting on geogrid reinforced granular soils. *Proceedings of the 2nd GeoMEast International Congress and Exhibition on Sustainable Civil Infrastructures*, October, 2018, Cairo, Egypt, 2018, pp. 103–126. DOI: 10.1007 / 978-9-030-01923-5.
3. Singh A. Load-settlement behavior of geogrid-reinforced sand cushion, available at: <https://www.researchgate.net/publication/331633683> (accessed 10 December 2019). DOI: 10.5281/zenodo.2588323.
4. Viki V. Behavior of square footing resting on weak soil reinforced with geotextiles. *International Journal for Scientific Research & Development*, 2017, vol. 5, iss. 03, pp. 758-762.
5. Jones B.R., Jacobsz S.W., van Rooy L. A qualitative model study on the effect of geosynthetic foundation reinforcement in sand overlying very soft clay. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 2016, vol. 58, no. 2, pp. 25-34.
6. Shukla S.K., Yin J.H. *Fundamentals of geosynthetic engineering*. Taylor & Francis Group, UK, 2006, 410 p.
7. Dzhouns K.D. *Sooruzheniya iz armirovannogo grunta [Reinforced earth structures]*. M. Strojizdat, 1989.
8. Lovisa, J., Shukla, S.K., Sivakugan, N. Behavior of prestressed geotextile reinforced sand bed supporting a loaded circular footing. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, no. 28, pp. 23-32.

9. Eltohamy A.M. The effect of geogrid reinforcement pre-stressing on the performance of sand bed supporting a strip foundation. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2016, vol. 10 (8), pp. 1037-1042.
10. Dhatrak A.I., Khan Farukh A. Behavior of Square footings on Prestressed Geosynthetic Reinforced Sand. *The International Journal of Engineering and Science*, 2014, vol. 3, iss. 7, pp. 72-83.
11. Aravind H.K., Sreekumar N.R. Load settlement behavior of footing resting on prestressed geogrid reinforced sand overlying clay. *50th Indian Geotechnical conference*, December 17–19, 2015, Pune, India.
12. Shadunts K.S. Sposob podgotovki osnovaniya tsilindricheskogo rezervuara na slabykh neravnomerno szhimaemykh gruntakh [The method of preparation of the soilbase in tank corner on weak unevenly compressible soils]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2308574 (2007).
13. Lackner C., Bergado D. T., Semprich S. Prestressed reinforced soil by geosynthetics - Concept and experimental investigations. *Geotextiles and Geomembranes*, 2013, vol. 37, pp. 109-123.
14. Nevzorov A.L., Shiranov A.M., Korshunov A.A. Sposob podgotovki osnovaniia zdaniia na slabykh gruntakh [The method of preparing the soil base of the building on soft soils]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2674488 (2018).
15. Nevzorov A.L., Shiranov A.M. Sposob podgotovki osnovaniia zdaniia na slabykh gruntakh [The method of preparing the soil base of the building on soft soils]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2684558 (2019).
16. Tutygin A.S., Ayzenshtadt M.A., Ayzenshtadt A.M., Makhova T.A. Vliianie prirody elektrolita na protsess koaguliatsii saponit-soderzhashchei suspenzii [The effect of the electrolyte on the coagulation process of a saponite-containing suspension]. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2012, no. 5, pp. 470-474.
17. Ivanov L.P. Grunty i osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzhenij [Soils and foundations of hydraulic structures]. Moscow, Vysshaya shkola, 1985, 355 p.
18. Nasonov I.D. Modelirovanie gornykh protsessov [Modeling of mountain processes]. Moscow, Nedra, 1969, 207 p.
19. Melnikov A.V. [et al.]. Procedura opredeleniya polej deformacij v peschanyh i glinistykh gruntah metodom PIV [The procedure for determining the deformation fields in sandy and clay soils using the PIV method]. Penza, OOO NPP «Geotek», 2012, 24 p.
20. Rukovodstvo pol'zovatelia programmy «ActualFlow» versii 1.16 [Actual Flow User Guide Version 1.16]. Novosibirsk: Institute of Thermophysics SB RAS, 2008, 165 p.