Е.А. Исакова, Т.М. Бочкарева

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА РАБОТЫ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ, УСИЛЕННОГО ПЛОСКОСТНЫМ ГЕОМАССИВОМ ПО МЕТОДУ СМОЛИЗАЦИИ

Представлен анализ погрешности при выполнении серии штамповых модельных испытаний уплотненного песчаного основания, а также предложено новое конструктивное решение снижения деформаций слабых или просадочных оснований по методу смолизации путем создания искусственного геомассива состава песок-смола.

Для объективной оценки улучшения деформационных свойств усиленного основания была проведена серия пробных штамповых испытаний, состоящая из трех экспериментов без усиливающего элемента. После этого в целях исследования характера работы искусственно усиленного основания путем создания в песчаном грунте геомассива состава «песок – эпоксидная смола» под штампом был проведен эксперимент с плоскостным геомассивом. По окончании испытания получены значения осадок при соответствующей нагрузке на штамп и их графическая зависимость, а также сделан вывод об эффективности конструктивного решения создания искусственного геомассива под подошвой фундамента (осадки снизились примерно в два раза) и целесообразности дальнейшей разработки тонкостенного плоскостного элемента усиления основания на слабых и просадочных грунтах.

Ключевые слова: штамповые модельные испытания, слабые грунты, песчаное основание, снижение осадок, искусственно усиленное основание, эпоксидная смола, искусственный геомассив состава песок – смола.

E.A. Isakova, T.M. Bochkareva

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

RESEARCH OF THE YIELDING OF BASE WITH WAS CONSOLIDATED BY MANUFACTURED PLANE EPOXY ELEMENT

Problems of the weak soil base are actual for the Perm Territory and for other regions of the Russian Federation and foreign countries. In Europe methods of improving deformation properties of the bases with resin grows rapidly. This method reduces yielding of base, create ground water cutoff or create hoisting building. A traditional method of improving deformation properties of the bases with resin use limitedly in Russia because it is high priced. That's why the world need that this method was improved for reduces yielding of base, create ground water cutoff or create hoisting building.

In this article we can see review of an error which was appeared when plate-bearing model tests were performed. Also we can see a new structural of reduction settlement scheme. This is manufactured plane element what contains a resin.

Was carry-out three plate-bearing model tests with loose sand base for an objective assessment of improving deformation properties of the bases with resin. This model tests consisted of three experiments. Base was sand. In the next stage of working was carry-out plate-bearing model tests with manufactured plane element what contains a resin. Manufactured plane element was located underneath foundation. After the end of test authors had value yielding of base and dependency diagrams "yielding of base – soil pressure". This is new structural of reduction settlement scheme was effective. Value yielding of base decreased twofold.

Keywords: plate-bearing model tests, lose ground, foundation, yielding of base, sand base, soil stabilization, consolidated base, epoxy, manufactured element with epoxy and sand.

Проблемы слабых грунтовых оснований и оснований, обладающих просадочными свойствами (например, лессовые грунты), актуальны как для Пермского края, так и для других регионов Российской Федерации и зарубежных стран. В Европе активно возрождается такой метод улучшения деформационных свойств оснований, как смолизация, который позволяет снизить осадки, а также создать противофильтрационную завесу или закрепить грунты от просадок. Но поскольку традиционный метод использования смол является ограниченно применимым для российского рынка в силу большой стоимости, необходимы его совершенствование и рационализация в качестве эффективного метода усиления слабых оснований и уменьшений осадки зданий.

Смолизация представляет собой инъектирование в грунты растворов синтетических смол и отвердителя. Одним из новых направлений создания искусственно улучшенных оснований путем использования метода смолизации является инъекция пенорастворов, которые представляют собой вспененные пластические массы. Другим новым направлением метода смолизации является подача под фундаменты в вертикальные и наклонные пробуренные скважины через инъекторы расширяющейся геосинтетической смолы, которая позволяет осуществлять подъем сооружений [1]. На сегодняшний день патенты и нормативно-техническая литература предлагают большое количество составов на основе смол, которые можно инъектировать в грунт: это термоактивные смолы, такие как мочевиноформальдегидные [2, 3], эпоксидные и фенольные. Реже применяются термопластические смолы, такие как полиуретановые и акриловые. В качестве конструктивных схем усиления нормативно-техническая литература предлагает вертикальные и наклонные¹ [4, 5] элементы, содержащие химические

¹ СНиП 3.02.01–84. Пособие по химическому закреплению грунтов инъекцией в промышленном и гражданском строительстве.

растворы (смолы), расположенные в плане как с определенным шагом, так и по всей площади подошвы фундамента. На основании исследований патентов и научно-технической литературы авторы статьи предлагают новое конструктивное решение для создания искусственно улучшенного основания по методу смолизации в целях снижения осадок ленточного фундамента. Данное конструктивное решение относится к области создания искусственного геомассива состава песок – смола под фундаментом.

Рис. 1. Схема проведения пробного эксперимента

Для объективной оценки улучшения деформационных свойств усиленного данным способом основания была проведена серия штамповых модельных испытаний. Первая серия пробных испытаний, состоящая из трех экспериментов, была проведена без усиливающего элемента под штампом. Схема реализации пробного эксперимента представлена на рис. 1.

При проведении испытаний принимаются следующие приближения:

Приближение № 1. Для моделирования испытания используется масштаб 1:30, т.е. штамп (шириной 50 мм, длиной 156 мм) рассматривается как ленточный фундамент (шириной 1,5 м и длиной 4,68 м).

Приближение № 2. В качестве грунта используется песок – однородная среда, с конкретными [6] характеристиками (табл. 1).

Таблица 1

Физико-механические характеристики песка

№ п/п	Характеристика грунта	Обозначение, ед. изм.	Значение
1	Плотность грунта	ρ , г/см ³	1,63
2	Плотность частиц грунта	ρ_s , г/см ³	2,65
3	Удельный вес грунта	γ , кН/м ³	15,974
4	Удельный вес частиц грунта	γ_s , кН/м ³	25,97
5	Коэффициент пористости	e , кПа	0,63
6	Пористость	n	0,385
7	Удельное сцепление	c , кПа	2,4
8	Угол внутреннего трения	φ , град	32,8
9	Модуль общей деформации	E_0 , МПа	32,67

Приближение № 3. Нагружение штампа ступенями моделирует рост нагрузки при поэтапном возведении здания или в течение срока его эксплуатации.

Приближение № 4. В качестве аналога-заменителя кварцевого песка (плотность 2–2,6 г/см³) для создания цветной прослойки между отсыпаемыми слоями песка применяется поваренная соль тонкого помола NaCl (плотность 2,165 г/см³).

В пространство станда для модельных штамповых испытаний выполняется отсыпка песчаного грунта слоями по 2 см с послойным уплотнением ручной трамбовкой. Слои разделены прослойками на глубину от подошвы штампа, равную $6b = 6 \cdot 50 = 30$ мм, – это глубина, на которой сказывается влияние сжимающих напряжений интенсивностью 0,1 внешней нагрузки. Осадки грунта по результатам эксперимента можно наблюдать на рис. 2.

Нагружение для песчаного основания² увеличивается ступенью давления $p = 0,025$ МПа до нагрузки в 350 кПа (или до выпора грунта из-под штампа). Время выдержки каждой последующей ступени нагружения принято не менее времени выдержки предыдущей ступени и соответствует условной стабилизации деформаций грунта. За критерий условной стабилизации деформаций принимается скорость осадки штампа, не превышающая 0,1 мм за время $t = 1$ ч.

Рис. 2. Результаты эксперимента: *а* – внешний вид станда для испытаний и отсыпанных слоев до приложения давления; *б* – осадка основания по результатам пробного эксперимента № 1

² ГОСТ 20276–99. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости.

По окончании серии испытаний получены значения осадок в зависимости от соответствующей нагрузки на штамп и их графическая зависимость. Результаты приведены в табл. 2 и на рис. 3. Анализ результатов первой серии пробных испытаний позволяет сделать вывод о погрешности измерений значений экспериментальных данных.

Результаты серии пробных экспериментов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты пробных штамповых испытаний

№ п/п	Нагрузка на штамп P , кПа	Осадка S_1 , мм (испытание № 1)	Осадка S_2 , мм (испытание № 2)	Осадка S_3 , мм (испытание № 3)	Среднее значение осадки $S_{\text{ср}}$, мм
1	2	3	4	5	6
1	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2	25	-1,412	-0,018	-0,25	-0,56
3	50	-2,597	-0,607	-0,5	-1,23
4	75	-3,604	-1,399	-0,75	-1,92
5	100	-4,455	-2,181	-1,1	-2,58
6	125	-5,344	-3,050	-1,5	-3,30
7	150	-5,645	-3,985	-1,8	-3,81
8	175	-6,1	-4,120	-2,25	-4,16
9	200	-6,43	-4,689	-2,7	-4,61
10	225	-6,808	-5,456	-3,25	-5,17
11	250	-7,225*	-5,988	-3,5	-5,57
12	275	–	-6,324	-4,0	-5,16
13	300	–	-7,371*	-4,5*	-5,94

* происходит выпор грунта из-под штампа или приложена нагрузка в 350 кПа.

Рис. 3. Зависимость «давление P , кПа – осадка S , мм» по результатам пробных штамповых испытаний и среднее значение осадки

По результатам зависимости средней осадки S , мм, пробных испытаний от давления штампа на грунт P , кПа, выполнена аппроксимация. По наименьшему значению среднеквадратичного отклонения при аппроксимации полиномами первой, второй и третьей степени в качестве аппроксимирующей функции принимается полином второй степени (парабола) вида

$$s = 0,15998 - 0,03165 \cdot p - 0,00004 \cdot p^2. \quad (1)$$

Графически аппроксимация представлена на рис. 4.

После исследования характера работы неусиленного уплотненного песчаного основания была проведена серия штамповых испытаний в целях исследования характера работы искусственно улучшенного основания путем создания в песчаном грунте геомассива состава песок – смола под штампом. При приготовлении искусственного геомассива использовались такие компоненты, как песок (П), с характеристиками, аналогичными грунту основания (см. табл. 1), эпоксидная смола (Э) марки D.E.R. и отвердитель ПЭПА Полиэтиленполиамин (О). Объемное соотношение О:Э:П составляет 1:9:15 [3]. В процессе отверждение смолы (набора прочности) происходит экзотермическая реакция, сопровождающаяся обильным выделением тепла.

Рис. 4. Аппроксимируемая и аппроксимирующая функции по результатам пробных штамповых испытаний

В первом эксперименте с искусственным геомассивом конструкция элемента усиления представляла собой прямоугольник в плане размерами $3b \times 156 \text{ мм} = 150 \times 156 \text{ мм}$ [7]. Толщина искусственного геомассива принималась на основании следующего требования п. 4.11: «Величина расчетного радиуса закрепления при ... смолизации грунтов назначается в зависимости от вида и водопроницаемости грунтов согласно табл. 8. При однорастворной двухкомпонентной смолизации ... радиус закрепления R_3 грунта колеблется от 300 до 1000 мм» [8]. В целях уменьшения сметной стоимости строительства и расхода компонентов на создание элемента усиления толщина искусственного геомассива $\delta_{г.см}$ принимается по наименьшему диаметру закрепления в соответствии с п. 4.11 [8]:

$$\delta_{г.см} = 2R_3 = 2 \cdot 300 = 600 \text{ мм}, \quad (2)$$

где R_3 – минимальный радиус закрепления грунта [8].

Толщина элемента усиления в масштабе эксперимента

$$\delta_3 = \frac{\delta_{г.см}}{M_3} = \frac{600}{30} = 20 \text{ мм}, \quad (3)$$

где M_3 – коэффициент масштабирования для масштаба 1:30.

Искусственный геомассив укладывается в грунт на глубину h_3 :

$$h'_3 = 0,3b = 0,3 \cdot 50 = 15 \text{ мм}, \quad (4)$$

где b – ширина жесткого металлического штампа, равная 50 мм [7].

В ходе проведения эксперимента при давлении в 200 кПа произошел разлом искусственного геомассива (рис. 5). Геомассив «завис» на стенках стенда при нагружении основания, перестал опускаться в направлении осадки и работать на сжатие, при этом включился в работу на изгиб.

В связи с этим для проведения второго испытания с искусственным геомассивом была произведена корректировка размеров элемента усиления в плане в целях исключения его «зависания» на стенках экспериментального стенда. Искусственный геомассив представляет собой в плане квадрат размерами $150 \times 150 \text{ мм}$. Конструкция представлена на рис. 6.

Схема эксперимента для второго испытания с искусственным геомассивом приведена на рис. 7.

Рис. 5. Разлом геомассива размерами $156 \times 150 \times 20$ мм в процессе первого испытания с искусственным геомассивом

Рис. 6. Конструкция геомассива из эпоксидной смолы и песчаного основания второго испытания с искусственным геомассивом

Рис. 7. Схема эксперимента второго испытания с искусственным геомассивом

По окончании серии испытаний получены значения осадок при соответствующей нагрузке на штамп и их графическая зависимость. Результаты экспериментов и сравнение их со средними значениями осадки $S_{\text{ср}}$, мм, по результатам пробных испытаний приведены

в табл. 3 и на рис. 8. Осадка при усилении основания под штампом искусственным геомассивом уменьшилась в среднем в 2 раза по сравнению с осадкой неусиленного грунта.

Таблица 3

Результаты пробных штамповых испытаний и испытания
с искусственным геомассивом

№ п/п	Нагрузка на штамп P , кПа	Среднее значение осадки неусиленного песчаного основания S_{cp} , мм	Осадка основания, усиленного искусственным геомассивом из эпоксидной смолы $S_{г.см}$, мм
1	0	0,00	0,00
2	25	-0,56	-0,21
3	50	-1,23	-0,60
4	75	-1,92	-1,02
5	100	-2,58	-1,19
6	125	-3,30	-1,31
7	150	-3,81	-1,42
8	175	-4,16	-1,55
9	200	-4,61	-1,71
10	225	-5,17	-1,88
11	250	-5,57	-2,00
12	275	-5,16	-2,12
13	300	-5,94	-2,23
14	325	—*	-2,36
15	350	—	-2,46

* происходит выпор грунта из-под подошвы фундамента (штампа).

Рис. 8. Графики зависимости «давление на штамп P , кПа – осадка S , мм» по результатам экспериментов с неусиленным песчаным основанием и основанием с, усилением искусственным геомассивом

По наименьшему значению среднеквадратичного отклонения в качестве аппроксимирующей функции зависимости осадки от давления по результатам испытаний с искусственным геомассивом принимается полином второй степени (парабола) вида

$$s = 0,02929 - 0,01166 \cdot p - 0,00001 \cdot p^2. \quad (5)$$

Графически зависимость, полученная в результате эксперимента, и аппроксимирующая ее функция представлены на рис. 9.

Рис. 9. Аппроксимируемая и аппроксимирующая функции по результатам второго испытания с искусственным геомассивом

Из анализа полученных результатов характера работы неусиленного песчаного и искусственно улучшенного оснований следует вывод об эффективности конструктивного решения создания искусственного геомассива под подошвой фундамента и целесообразности дальнейшей разработки тонкостенного плоскостного элемента усиления основания на слабых и просадочных грунтах.

На основании приведенной аппроксимации экспериментальных данных можно математически описать зависимости осадки от давления (формулы (1) и (5)). В практическом смысле это позволит вычислить осадки для других значений давления штампа на грунт.

Также по результатам серии экспериментов с использованием геомассива (а именно – его разлома в эксперименте № 1) можно сделать вывод о том, что сопротивление эпоксидной смолы D.E.R в тан-

деме с песком на изгиб $R_{и}$ меньше ее сопротивления на сжатие $R_{сж}$ (примерно в 2 раза). Важно отметить, что такое соотношение наблюдается не для всех видов смол. Например, для эпоксидной смолы ЭД-20 $R_{сж} = 100...200$ МПа, $R_{и} = 80...140$ МПа, тогда как для акриловой смолы $R_{сж} = 120...130$ МПа, $R_{и} = 130...140$ МПа [7]. Таким образом, при подборе состава для химического закрепления грунта методом смолизации, согласно конструктивному решению, предложенному авторами данной статьи, необходимо использовать смолы с бóльшим сопротивлением на сжатие.

Как уже было отмечено, геомассив позволяет снизить осадку в 2 раза. В целях экономии расхода смолы необходимо уменьшать толщину усиливающих элементов и создавать эффективные конструктивные решения, не используя эпоксидную смолу в «нерабочих» зонах.

Библиографический список

1. Способ и устройство для укрепления грунта и/или для подъема сооружений: пат. № RU 2467124 Рос. Федерация / Лиевонен Туомас, Хякиннен Сами.
2. Способ получения мочевиноформальдегидных смол: пат. SU 790718 Рос. Федерация / В.В. Карпов, А.Г. Газизов, Е.С. Дунюшкин, Б.Я. Аксельрод, Н.С. Абрамова, Г.С. Матвелашвили, Е.С. Потехина, О.Е. Мустафина, Е.С. Лагучева, И.М. Гумарн.
3. Способ получения карбамидоформальдегидной смолы: пат. № 2305685 Рос. Федерация / Н.А. Янковский, В.А. Степанов, В.В. Порталенко, С.В. Зубарев.
4. Verfahren zum Erhöhen der Belastbarkeit eines Fundamentsbodens für Bauwerke: pat. EP0851064 A1 / C. Canteri.
5. Verfahren zum Anfertigen eines Fundaments: pat. EP 0264998 A1 / Bijsterveld J.J. Van.
6. Пономарев А.Б., Калошина С.В., Сычкина Е.Н. Инженерная геология и механика грунтов: метод. указания к лабораторным работам. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – 36 с.
7. Клевекко В.И. Оценка напряженно-деформированного состояния армированных оснований в пылевато-глинистых грунтах: дис. ... канд. техн. наук / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2002. – 152 с.

8. Справочник по общестроительным работам. Основания и фундаменты / М.И. Смородинов, Б.С. Федоров, Б.А. Ржаницын [и др.]; под общ. ред. М.И. Смородинова. – М.: Стройиздат, 1974. – 372 с.

9. Эпоксидная смола ЭД-20 [Электронный ресурс]. – URL: <http://sanfarm.ru/ed-20-epoksidnaya-smola> (дата обращения: 05.02.2015).

References

1. Lievonen Tuomas, Hjakkinen Sami. Sposob i ustroistvo dlia ukrepleniia grunta i/ili dlia pod"ema sooruzhenii [A method and apparatus for soil stabilization and/or for lifting structures]. *Patent № RU 2467124 Rossiiskaia Federatsiia*.

2. Karpov V.V., Gazizov A.G., Duniushkin E.S., Aksel'rod B.Ia., Abramova N.S., Matvelashvili G.S., Potekhina E.S., Mustafina O.E., Lagucheva E.S., Gumarn I.M. Sposob polucheniia mochevinoformal'degidnykh smol [A method of producing carbamide-formaldehyde resins]. *Patent SU 790718 Rossiiskaia Federatsiia*.

3. Iankovskii N.A., Stepanov V.A., Portalenko V.V., Zubarev S.V. Sposob polucheniia karbamidoformal'degidnoi smoly [A method of obtaining a carbamide-formaldehyde resin]. *Patent № 2305685 Rossiiskaia Federatsiia*.

4. Canteri C. Verfahren zum Erhöhen der Belastbarkeit eines Fundamentsbodens für Bauwerke. *Patent EP0851064 A1*.

5. Bijsterveld J.J. Van. Verfahren zum Anfertigen eines Fundaments. *Patent EP 0264998 A1*.

6. Ponomarev A.B., Kaloshina S.V., Sychkina E.N. Inzhenernaia geologiia i mekhanika gruntov [Engineering Geology and soil mechanics]. Perm: Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2009. 36 p.

7. Kleveko V.I. Otsenka napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia armirovannykh osnovanii v pylevato-glinistykh gruntakh [Evaluation of stress-strain state of reinforced bottoms in silty-clay soils]. Ph.D. degree dissertation, Perm, 2002. 152 p.

8. Smorodinov M.I., Fedorov B.S., Rzhantsyn B.A. [et al.] Spravochnik po obshchestroitel'nym rabotam. Osnovaniia i fundamenty [Handbook on repairs. Bases and foundations]. Ed M.I. Smorodinov. Moscow: Stroiizdat, 1974. 372 p.

9. Epoksidnaia smola ED-20 [Epoxy resin ED-20], available at: <http://sanfarm.ru/ed-20-epoksidnaya-smola> (accessed: 05.02.2015).

Получено 27.06.2015

Об авторах

Исакова Елена Александровна (Пермь, Россия) – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29), инженер ОАО «Нью Граунд» (614089, г. Пермь, ул. Кронштадтская, 35, e-mail: can_88@list.ru).

Бочкарева Татьяна Михайловна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: tsp-btm@mail.ru).

About the authors

Elena A. Isakova (Perm, Russian Federation) – Master student, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation), Engineer, OJSC “New Ground” (35, Kronshtatskaya st., Perm, 614089, Russian Federation, e-mail: can_88@list.ru).

Tatiana M. Bochkareva (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Building Production and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: tsp-btm@mail.ru).