



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.01

Оценка несущей способности железобетонной плиты пола цеха на армированном грунтовом ОСНОВАНИИ

С.А. Тумаков, Г.Н. Голубь*

Сергей Анатольевич Тумаков, Григорий Николаевич Голубь

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

*sergtum1958@yandex.ru, golubgn@ystu.ru**



Предложен метод расчета конструкции пола производственного здания на компенсационной грунтовой подушке по основанию, армированному вертикальными элементами. Основание представлено слабыми грунтами и усилено забивными железобетонными сваями. Компенсационная подушка выполнена из песчаных грунтов, уплотненных до требуемого модуля деформации. Расчет выполнен численным методом в программном комплексе SCAD. Получена информация по напряженно-деформированному состоянию свай, грунта подушки и плиты пола. Проведена проверка грунта компенсационной подушки на выполнение условий прочности по А.И. Боткину. Определена возможность эксплуатации железобетонной плиты пола производственного здания.

Ключевые слова: компенсационная грунтовая подушка, вертикальное армирование основания, плита пола, сваи, предельное состояние, численные методы

Для цитирования:

Тумаков С.А., Голубь Г.Н. Оценка несущей способности железобетонной плиты пола цеха на армированном грунтовом основании // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 4. С. 8-19. URL: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4_2023



SCIENTIFIC ARTICLE

Assessment of the load-bearing capacity of the existing reinforced concrete floor slab of the workshop on a reinforced soil foundation

S.A. Tumakov, G.N. Golub*

Sergey A. Tumakov, Grigoriy N. Golub

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

*sergtum1958@yandex.ru, golubgn@ystu.ru**

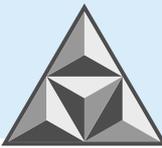


A method for calculating the floor structure of an industrial building on a compensatory soil cushion on a base reinforced with vertical elements is considered. The foundation is composed of weak soils and reinforced with driven reinforced concrete piles. The compensation cushion is made of sandy soils compacted to the required deformation modulus. The calculation was performed using the numerical method in the SCAD software package. Information was obtained on the stress-strain state of piles, pad soil and floor slab. The soil of the compensation cushion was tested to meet the strength conditions of A.I. Botkin. The possibility of using a reinforced concrete floor slab of an industrial building has been determined.

Keywords: compensatory soil cushion, vertical reinforcement of the base, floor slab, piles, limit state, numerical methods

For citation:

Tumakov, S.A. & Golub, G.N. (2023) Assessment of the load-bearing capacity of the existing reinforced concrete floor slab of the workshop on a reinforced soil foundation for new design loads, *Smart Composite in Construction*, 4(4), pp. 8-19 [online]. Available at: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4_2023



ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния железобетонной плиты пола существующего производственного цеха и изучению ее несущей способности на новые проектные нагрузки. Особенностью рассматриваемой конструкции является размещение на компенсационной подушке из слоя уплотненного песчаного грунта. Подушка, в свою очередь, устроена по грунтовому основанию, армированному вертикальными элементами.

На текущий момент инженерные методы расчета, учитывающие взаимодействие армирующих свай с окружающим грунтом, разработаны недостаточно полно. Нормативные документы СП 22.13330.2016 и СП 24.13330.2021 содержат, в основном, расчетные положения по предварительному вычислению деформаций армированных оснований, а окончательные расчеты, в том числе – по первой группе предельных состояний, предписывают выполнять численными методами. Так, в технической [1, 2] и научной литературе [3-7] расчет оснований, армированных вертикальными элементами, рассмотрен достаточно подробно. Численные методы совместного расчета зданий и армированных вертикальными элементами грунтовых оснований даны в [8-13], в том числе – с использованием программных средств Plaxis, Ansys, Лира, базирующихся на методе конечных элементов.

Объектом исследования является строительство зданий и сооружений на слабых грунтовых основаниях. Предметом исследования является напряженно-деформированное состояние конструкций на слабых грунтовых основаниях, армированных вертикальными элементами.

Цель работы – определение возможности эксплуатации железобетонных плит пола сооружения на слабом грунтовом основании, укрепленном путем армирования вертикальными элементами.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

При выполнении практической работы по техническому переоснащению производственного цеха в г. Ростове (Ярославская обл.) было установлено, что здание цеха выполнено с железобетонными колоннами, металлическими несущими конструкциями покрытия, со свайными фундаментами и железобетонными полами на грунтовой компенсирующей подушке по грунтовому основанию, армированному вертикальными железобетонными сваями. В задачу практической исследовательской работы входило определить достаточность несущей способности железобетонной плиты пола на новые нагрузки.

При исследовании существующего здания цеха, его конструкций, основания и анализе исполнительной документации было установлено, что железобетонная плита пола толщиной 250 мм изготовлена из бетона класса В25 и армирована верхней и нижней арматурой класса А400 диаметром 12 мм (ячейка 150x150 мм). Защитные слои бетона – 3 см; толщина грунтовой компенсирующей подушки – 1.6 м. Подушка из грунта с углом внутреннего трения не ниже 35 град. уплотнена до $E = 30$ МПа. Армирующие вертикальные элементы представлены сваями длиной 10 м и сечением 0.3x0.3 м, с сеткой 2.4x2.5 м. Несущая способность сваи – 510 кН. Разрез здания показан на рис. 1.

В свою очередь, фрагмент схемы расположения свай под компенсирующей грунтовой подушкой приведен на рис. 2.

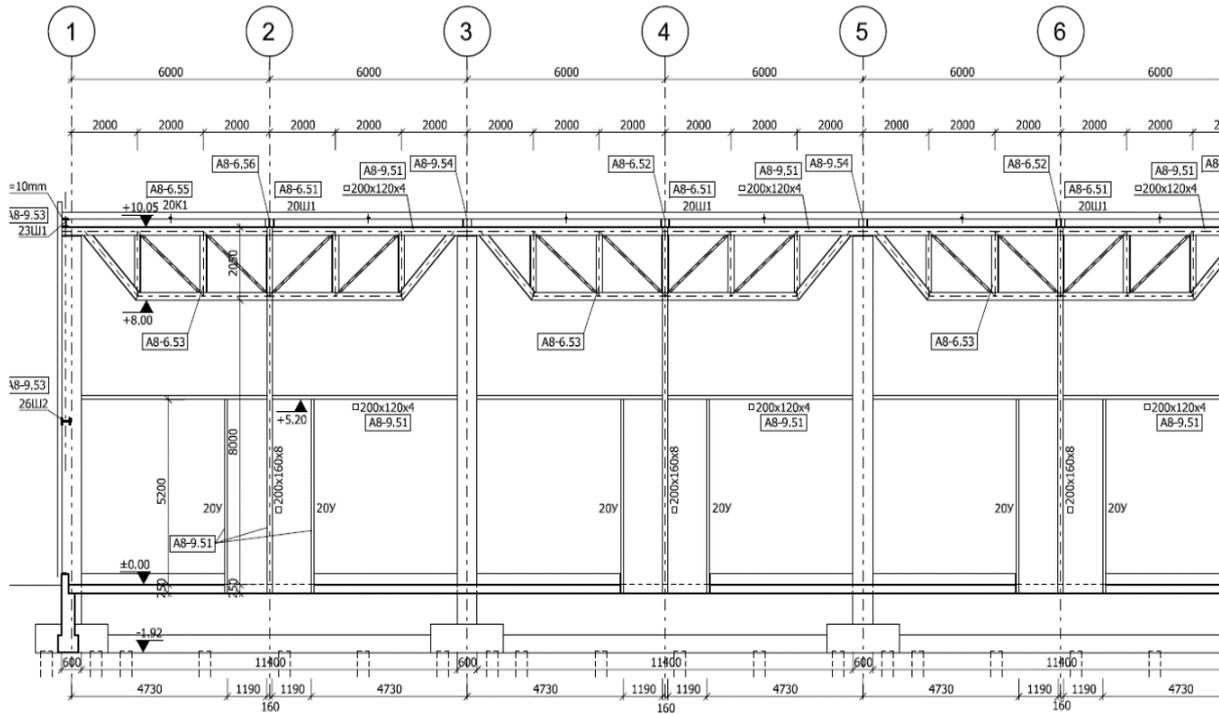
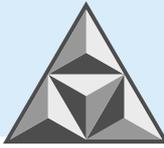


Рис. 1. Разрез. Несущие конструкции цеха. Грунтовая компенсирующая подушка. Свайные фундаменты.

Усиление основания пола армированием вертикальными элементами (сваями)

Fig. 1. Section. Bearing structures of the workshop. Ground compensating bedding. Pile foundations.

Reinforcement of the floor base by reinforcing with vertical elements (piles)

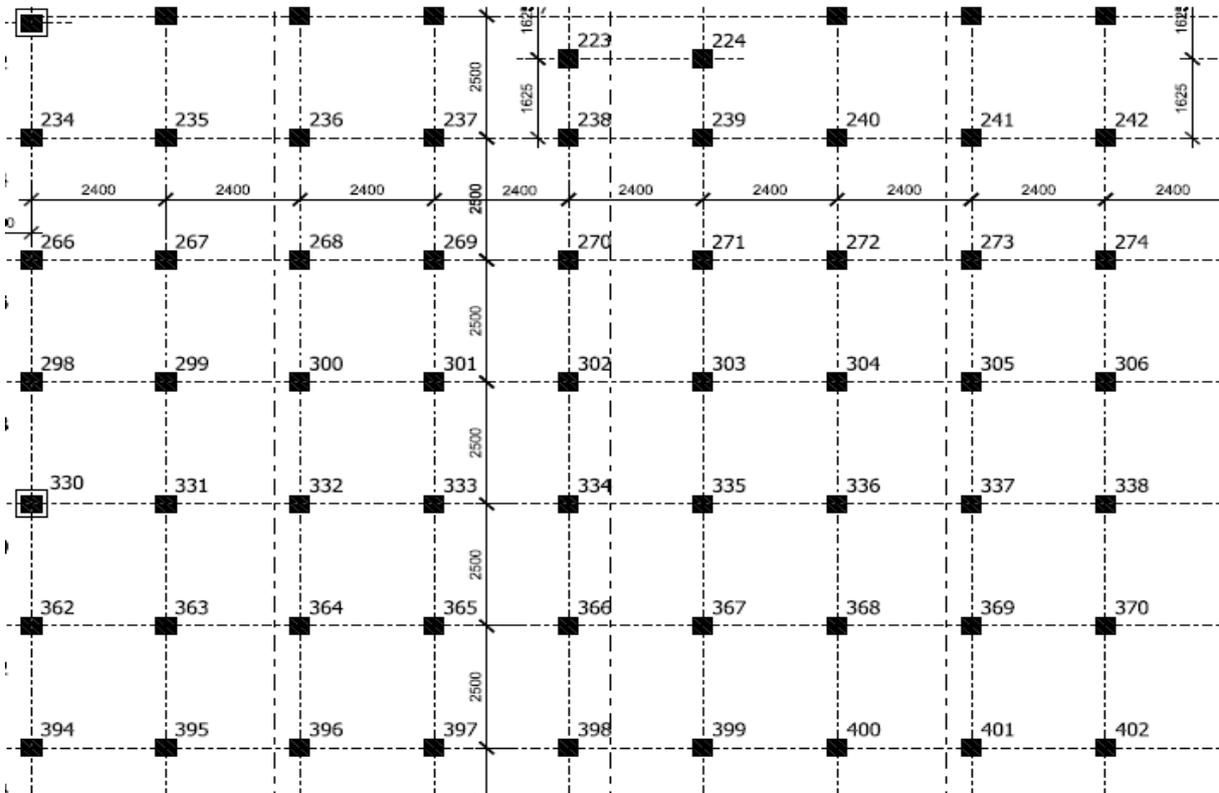


Рис. 2. Схема расположения армирующих элементов (свай)

Fig. 2. Layout of reinforcing elements (piles)



В современном строительстве армирование грунтового основания вертикальными элементами применяется довольно часто. Такое техническое решение представляет собой комбинацию грунта и армирующих элементов. В качестве армирующих элементов применяются готовые и буровые железобетонные и бетонные сваи с включением цемента, песков или щебня. Вертикальное армирование используется для улучшения свойств оснований, имеющих в своем составе слабые грунты, а также снижения деформаций как самого сооружения, строящегося на армированном основании, так и окружающей застройки при возведении здания в непосредственной близости от существующих зданий. Отличительной чертой армированного основания от свайного является то, что нагрузка на него передается через компенсирующую грунтовую подушку. Это позволяет использовать несущую способность грунтового основания в полном объеме и, в случае строительства в сейсмоопасных районах, избежать передачи значительных горизонтальных воздействий на армирующие элементы.

Для определения достаточности несущей способности железобетонной плиты пола на новые нагрузки применяли пакет SCAD Office 21, лицензия № 12447. Моделирование плиты пола на армированном сваями основании осуществлено в соответствии с п. 7.5 СП 24.13330.2021. Оценка усилий и проверка армирования железобетонной плиты пола проведены на ЭВМ с описанием взаимодействий плита – компенсирующая грунтовая подушка – армированное основание. Расчетная модель конструкции плиты пола выполнена из оболочечных элементов, лежащих на компенсационной грунтовой подушке. Подушка моделирована объемными элементами с опиранием на грунтовое основание, армированное железобетонными сваями. Грунтовое основание под компенсирующей грунтовой подушкой в модели учтено введением коэффициентов постели у оболочечных «фиктивных» элементов предельно малой толщины, связанных в узлах с объемными элементами, моделирующими компенсирующую подушку. Сваи в расчетной модели заданы как пространственные стержни, опирающиеся острием на упругую связь. Упругая связь под острием сваи моделирована конечным элементом КЭ-51. При расчете рассматривалось только действие вертикальных нагрузок.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Жесткость связи под острием сваи при действии только вертикальных нагрузок вычислена вручную по соотношению нагрузка/осадка $R_z = N/s$, где N – нагрузка на сваю; s – осадка, определенная в соответствии с СП 24.13330.2021 для отдельной сваи с номером i , с учетом влияния соседних свай, по формуле

$$s = \beta \frac{N_i}{G_{1l}} + \sum_{j \neq i} \delta_{ij} \frac{N_j}{G_{1l}}, \quad (1)$$

где первое слагаемое – осадка одиночной сваи с номером i ; δ_{ij} – коэффициенты влияния, рассчитываемые в зависимости от расстояния между i - и j -сваями; $N_{i(j)}$ – нагрузка на $i(j)$ -сваю.

Геологические условия осуществления строительства рассмотрены по результатам двух отчетов об инженерно-геологических изысканиях 2009 и 2019 годов. На рис. 3 показаны условия по отчету 2009 г.

Характеристики грунтов приведены в табл. 1.

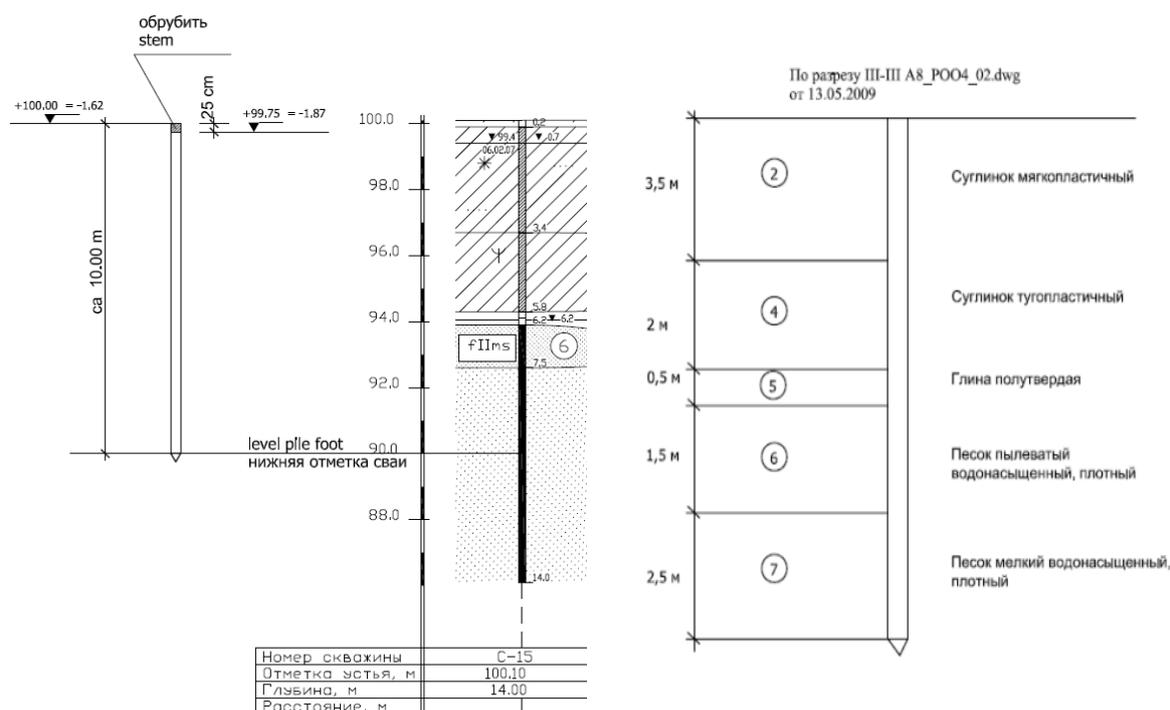


Рис. 3. Геологические условия площадки

Fig. 3. Geological site conditions

Таблица 1. Характеристики грунтов

Table 1. Soil characteristics

Наименование, номер слоя	E , МПа	ν	h_i , м
Суглинок мягкопластичный, № 2	7	0.35	3.5
Суглинок тугопластичный, № 4	7	0.30	2.0
Глина полутвердая, № 5	10	0.36	0.5
Песок пылеватый водонасыщенный, плотный, № 6	28	0.34	1.5
Песок мелкий водонасыщенный, плотный, № 7	38	0.30	2.5

Коэффициенты β и δ зависят от неизменяемых характеристик грунта, геометрических параметров сваи и модуля ее упругости. В пределах вычисленного расстояния влияния 4.34 м они равны: $\beta = 0.691$, $\delta_1 = 0.094$, $\delta_2 = 0.035$, $G_1 = 6.85$ МПа.

На рис. 4 показана модель плиты железобетонного пола на компенсационной грунтовой подушке и грунтовом основании с армированием железобетонными сваями (нагрузки показаны только от оборудования).

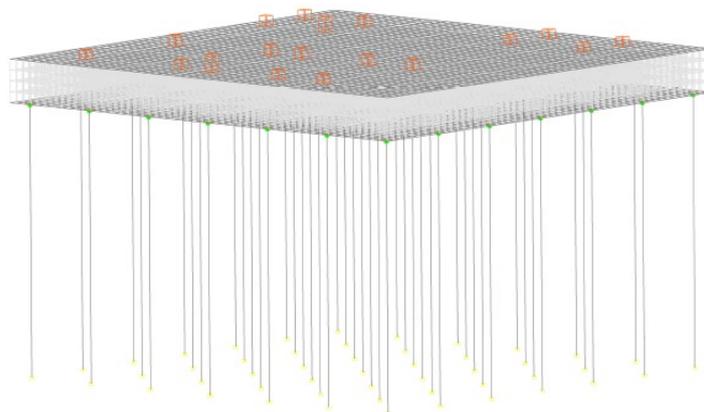
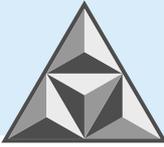


Рис. 4. Модель железобетонного пола на компенсационной грунтовой подушке и грунтовом основании с армированием железобетонными сваями (нагрузки показаны только от оборудования)

Fig. 4. Model of reinforced concrete floor on a compensating ground bed on a ground base reinforced with reinforced concrete piles (loads shown are from equipment only)



При выполнении расчетов использован стандартный итерационный метод по выравниванию давлений на грунт основания и деформаций грунта основания под компенсирующей подушкой обменом данных между расчетным модулем SCAD и сателлитом Кросс. Первоначально нагрузка на сваи была принята по грузовой площади. В последующих итерациях усилия в сваях принимались по результатам расчета. Поскольку усилия в сваях при выполнении этих итераций также менялись, жесткость связи КЭ-51 пересчитывалась вручную. Связь между узлом конечного элемента сваи и узлами объемных элементов компенсирующей подушки осуществлена при помощи абсолютно жесткого тела «паука». На каждой итерации контролировались усилия в сваях. Установлено, что при новых проектных нагрузках с учетом собственного веса конструкций и оборудования эти усилия были намного меньше несущей способности свай. Максимальное усилие на последней итерации зафиксировано для сваи элемента с номером 3986 (рис. 5): $N = 152 \text{ кН} \ll Fd = 510 \text{ кН}$. При этом вертикальная деформация острия сваи составила 2.7 мм; жесткость связи КЭ-51 $Rz = 58500 \text{ кН} \cdot \text{м}^{-1}$.

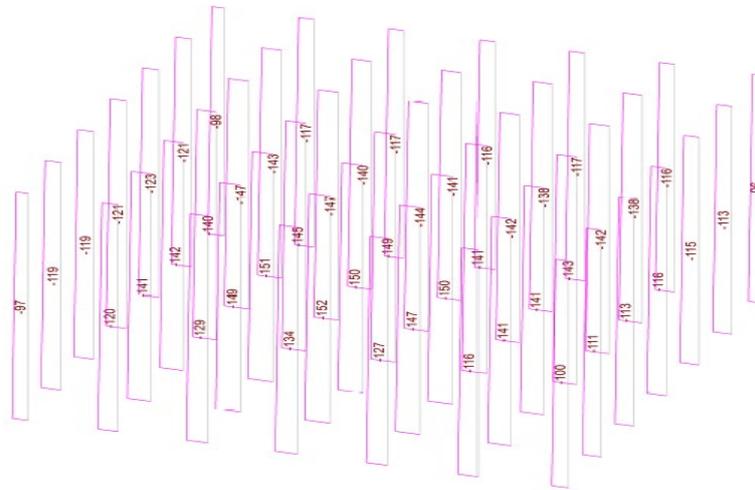


Рис. 5. Усилия N в элементах свай, кН

Fig. 5. N forces in pile elements, kN

Произведена проверка предельного состояния грунтовой компенсирующей подушки по условию А.И. Боткина [14] для сложного напряженного состояния

$$\tau_{\text{окт}} = \text{tg} \varphi \cdot \sigma_{\text{окт}}, \quad (2)$$

$$\text{где } \sigma_{\text{окт}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \text{ и } \tau_{\text{окт}} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (3)$$

В процессе проверки не выявлены элементы грунтовой компенсирующей подушки, для которых было достигнуто предельное состояние. Покажем для некоторых элементов с экстремальными тензорами главных напряжений выполнение условия. Элемент с номером 1023: получен тензор главных напряжений $\sigma_1 = 17.7 \text{ кПа}$, $\sigma_2 = 23.6 \text{ кПа}$ и $\sigma_3 = 66.6 \text{ кПа}$; предельное состояние не достигается:

$$\tau_{\text{окт}} = 21.8 \text{ кПа} < \text{tg} \varphi \cdot \sigma_{\text{окт}} = 25.2 \text{ кПа}.$$

Элемент с номером 8846: получен тензор главных напряжений $\sigma_1 = 25.7 \text{ кПа}$, $\sigma_2 = 28.1 \text{ кПа}$ и $\sigma_3 = 86.0 \text{ кПа}$; предельное состояние не достигается:

$$\tau_{\text{окт}} = 27.8 \text{ кПа} < \text{tg} \varphi \cdot \sigma_{\text{окт}} = 32.6 \text{ кПа}.$$

В качестве примера на рис. 6 показано распределение главных напряжений σ_1 в грунтовой компенсирующей подушке.

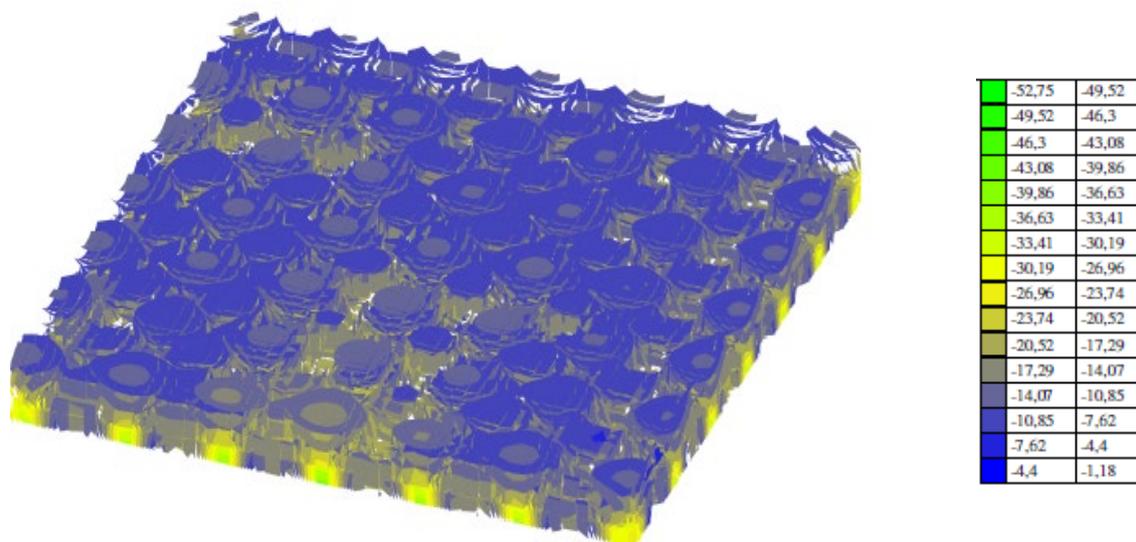


Рис. 6. Главные напряжения σ в грунтовой компенсирующей подушке, кПа

Fig. 6. Major stresses σ in the ground compensating bed, kPa

В результате расчета получены размеры требуемого армирования железобетонной плиты пола цеха на новые проектные нагрузки. В качестве примера на рис. 7 показано требуемое нижнее армирование по оси ординат. Установлено, что при заданном шаге верхней и нижней арматуры 150 мм, соответствующем фактическому шагу установленной арматуры в плите, максимальный диаметр требуемой арматуры не превышает 9 мм.

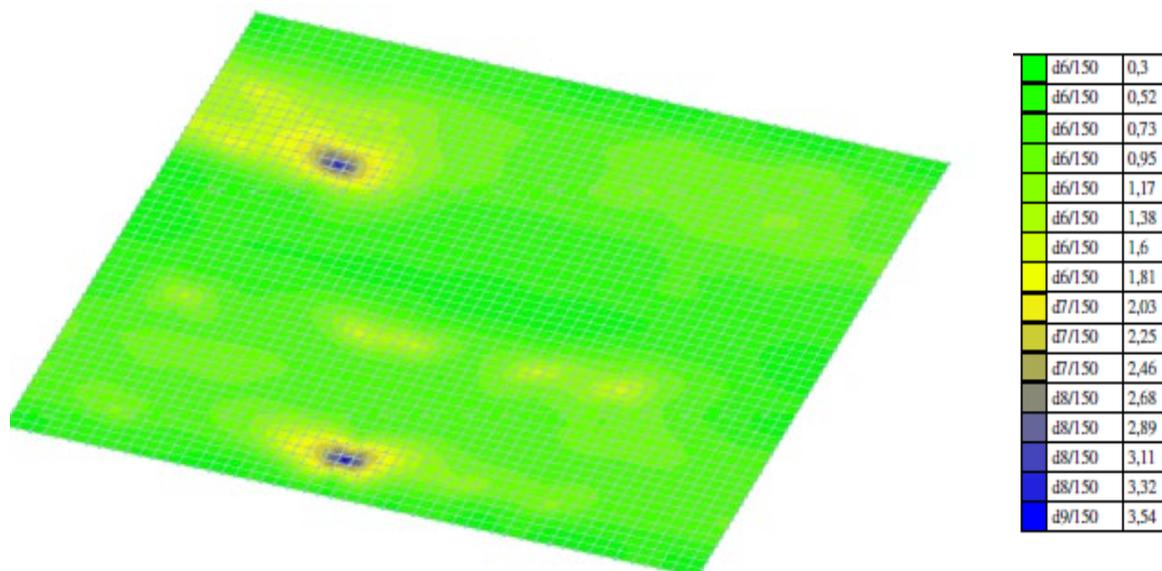


Рис. 7. Требуемая арматура нижняя по оси ординат

Fig. 7. Required bottom reinforcement on Y-axis

Таким образом, можно считать обеспеченной несущую способность железобетонной плиты пола цеха, армированной верхней и нижней арматурой диаметром 12 мм, установленной с шагом 150 мм. При проведении натурных изысканий установлены фактические характеристики материалов и конструкций; проанализированы схемы расстановки оборудования и определены новые проектные нагрузки по плану технического перевооружения цеха.



ВЫВОДЫ

Предложена методика расчета железобетонной плиты пола цеха с учетом наличия компенсирующей грунтовой подушки на армированном железобетонными сваями грунтовым основании.

В программном комплексе SCAD Office 21 замоделирована рассчитываемая конструкция и выполнен расчет, на основании анализа которого сделан вывод об обеспечении требуемой несущей способности железобетонной плиты пола цеха, армированной верхней и нижней арматурой диаметром 12 мм, на новые проектные нагрузки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Горбунов-Посадов М.И., Ильичев В.А., Крутов В.И.** Основания, фундаменты и подземные сооружения: Справочник проектировщика. М.: Стройиздат, 1985. 479 с.
2. **Paul Teng T.** An introduction to the deep mixing methods as used in geotechnical application: Tech Report // US Department of transportation, federal highway administration: [сайт]. 2000. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/99138/99138.pdf>
3. **Федоровский В.Г., Безволев С.Г.** Метод расчета свайных полей и других вертикально армированных грунтовых массивов // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 1994. № 3. С. 11-15.
4. **Попов А.О.** Расчет конечной осадки глинистых оснований, армированных вертикальными элементами // *Инженерно-строит. журн.* 2015. № 4(56). С. 19-27. DOI 10.5862/МСЕ.56.3.
5. **Нуждин Л.В., Кузнецов А.А.** Армирование грунтов основания вертикальными стержнями // *Тр. Межд. сем. по механике грунтов, фундаментостроению и транспортным сооружениям*. М.: Изд-во МГСУ, 2000. С. 204-206.
6. **Мирсаяпов И.Т., Попов А.О.** Экспериментально-теоретические исследования работы армированных грунтовых массивов // *Изв. КГЛСУ*. 2008. № 2(10). С.75-80.
7. **Кравцов В.Н.** Проектирование вертикально армированных оснований плитных фундаментов // *Геотехника Беларуси: наука и практика: мат. Межд. науч.-техн. конф., посв. 60-летию каф. оснований, фундаментов и инженерной геологии и 90-летию со дня рожд. проф. Юрия Александровича Соболевского (Минск, 23–25 октября 2013)*. Минск: БНТУ, 2013. С. 141-149.
8. **Караулов А.М.** Методика расчета вертикально армированного основания плитного фундамента // *Материалы межд. науч.-практ. конф. ПГАСА*. Пенза: Изд-во ПГАСА, 2002. С. 66-69.
9. **Van Eekelen S.J.M., Bezuijen A.** Dutch research on basal reinforced piled embankments // *Geo-Congress*. 2013. DOI: 10.1061/9780784412787.184 9. URL: <https://biblio.ugent.be/publication/2132929>
10. **Мариничев М.Б.** Оценка эффективности свайно-плитных фундаментов с промежуточной подушкой на примере высотных зданий в сейсмических районах Краснодарского края // *Вестник Томского гос. арх.-строит. ун-та*. 2017. № 2(61). С. 182-191.
11. **Мариничев М.Б., Ткачев И.Г., Шлее Ю.** Практическая реализация метода вертикального армирования неоднородного основания для компенсации неравномерной деформируемости грунтового массива и снижения сейсмических воздействий на надземное сооружение // *Политем. сет. электр. науч. журн. Кубан. гос. аграр. ун-та*. 2013. № 94. С. 279-299.
12. **Smith M., Filz G.** Axisymmetric numerical modeling of a unit cell in geosynthetic reinforced, column supported embankments // *Geosynthetics International*. 2007. Vol. 14, no. 1. P. 13-22.
13. **Chen Y., Cao W., Chen R.P.** An experimental Investigation of Soil Arching within Basal Reinforced and Unreinforced Piled Embankments // *Geotextiles and geomembranes*. 2008. No. 26. P. 164–174.
14. **Боткин, А.И.** О прочности сыпучих и хрупких материалов // *Изв. НИИ гидротехники*. М.: Гостехиздат, 1940. Т. XXVI. С. 205-236.

Поступила в редакцию 29.11.2023

Одобрена после рецензирования 18.12.2023

Принята к опубликованию 22.12.2023



REFERENCES

1. **Gorbunov-Posadov, V.A. Il'ichev, V.I. & Krutov.** (1985) *Foundations, foundations and underground structures: The Designer's Handbook*. M.: Stroyizdat (in Russian).
2. **Paul Teng, T.** (2000) An introduction to the deep mixing methods as used in geotechnical application, *US Department of transportation, federal highway administration* [online]. Available at: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/99138/99138.pdf>
3. **Fedorovskiy, V.G. & Bezvolev, S.G.** (1994) Method of calculation of pile fields and other vertically reinforced soil massifs, *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, (3), pp. 11-15 (in Russian).
4. **Popov, A.O.** (2015) Calculation of the final precipitation of clay bases reinforced with vertical elements, *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal*, 4(56), pp. 19-27. DOI: 10.5862/MCE.56.3 (in Russian).
5. **Nuzhdin, L.V. & Kuznetsov, A.A.** (2000) Reinforcement of the foundation soils with vertical rods, *Tr. Mezhd. sem. po mekhanike gruntov, fundamentostroyeniyu i transportnym sooruzheniyam*. M.: Izd-vo MGSU, pp. 204-206 (in Russian).
6. **Mirsayapov, I.T. & Popov, A.O.** (2008) Experimental and theoretical studies of the operation of reinforced soil massifs, *Izv. KGLSU*, 2(10), pp.75-80 (in Russian).
7. **Kravtsov, V.N.** (2013) Design of vertically reinforced slab foundations, *Geotekhnika Belarusi: nauka i praktika: Mat. mezhd. nauch.-tekhn. konf., posv. 60-letiyu kafedry osnovaniy, fundamentov i inzhenernoy geologii i 90-letiyu so dnya rozhd. Prof. Yuriya Aleksandrovicha Sobolevskogo (Minsk, 23–25 oktyabrya 2013)*. Minsk: BNTU, pp. 141-149 (in Russian).
8. **Karaulov, A.M.** (2002) The method of calculating the vertically reinforced base of the slab foundation, *Mat. Mezhd. nauch.-prak. konf. PGASA*. Penza: Izd-vo PGASA, pp. 66-69 (in Russian).
9. **Van Eekelen, S.J.M. & Bezuijen, A.** (2013) Dutch research on basal reinforced piled embankments // *Geo-Congress*. DOI:10.1061/9780784412787.1849 [online]. Available at: <https://biblio.ugent.be/publication/2132929>
10. **Marinichev, M.B.** (2017) Evaluation of the effectiveness of pile-slab foundations with an intermediate cushion on the example of high-rise buildings in seismic areas of the Krasnodar Territory, *Vestnik Tomskogo gos. arkh.-stroit. universiteta*, 2(61), pp. 182-191 (in Russian).
11. **Marinichev, M.B., Tkachev, I.G. & Shleye, Yu.** (2013) Practical implementation of the method of vertical reinforcement of an inhomogeneous base to compensate for the uneven deformability of the soil mass and reduce seismic impacts on an above-ground structure, *Politemat. set. elektr. nauch. zhur. Kuban. gos. agrar. universiteta*, (94), pp. 279-299 (in Russian).
12. **Smith, M. & Filz, G.** (2007) Axisymmetric numerical modeling of a unit cell in geosynthetic reinforced, column-supported embankments, *Geosynthetics International*, 14(1), pp. 13-22.
13. **Chen, Y., Cao, W. & Chen, R.P.** (2008) An experimental Investigation of Soil Arching within Basal Reinforced and unreinforced Piled Embankments, *Geotextiles and geomembranes*, (26), pp. 164–174.
14. **Botkin, A.I.** (1940) On the strength of loose and brittle materials, *Izv. NII gidrotekhniki*. M.: Gostekhizdat. XXVI, pp. 205-236 (in Russian).

Received 29.11.2023

Approved after reviewing 18.12.2023

Accepted 22.12.2023