

**ГЕОФИЗИКА
GEOPHYSICS**

Научная статья

УДК 624.131.7

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-5-17

**ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ
ГОРНОТЕХНИЧЕСКОГО СООРУЖЕНИЯ СО СВАЙНЫМ ФУНДАМЕНТОМ
НА ОСНОВЕ ОБЪЕМНОЙ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ****Власов Максим Алексеевич^{1*}, Герасимов Олег Васильевич²,
Простов Сергей Михайлович¹**¹Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева²ООО «Нооцентр»

* для корреспонденции: maxsdss@mail.ru

**Информация о статье**

Поступила:

14 октября 2024 г.

Одобрена после
рецензирования:

22 января 2025 г.

Принята к публикации:

30 апреля 2025 г.

Опубликована:

26 июня 2025 г.

Ключевые слова:*компьютерное моделирование;
горнотехническое
сооружение; прогноз;
напряжения; деформации;
закрепление грунтов;
интегральный показатель.***Аннотация.**

Объектом исследования является строящееся сооружение вентилятора главного проветривания угольной шахты, находящееся в аварийном состоянии. По результатам инженерно-геологических изысканий установлено, что основной причиной возникновения опасных деформаций фундаментов конструкций является неоднородность свойств грунтов основания, что способствует возникновению деформаций и неравномерной осадки, увеличению давления на краях фундаментной плиты. На основе инженерно-геологических изысканий было разработано две схемы геомеханической модели, обеспечивающей прогноз деформаций и напряжений при естественном и закрепленном состоянии грунтового основания. На базе объемной модели были проанализированы горизонтальные расчетные сечения по глубине через 1 метр, на основе этого были определены наиболее опасные сечения на глубинах $z=-1$ и $z=-9$ м, построены изолинии распределения напряжений и деформаций для этих сечений грунтового основания. Для более точного прогнозирования напряженно-деформированного состояния были определены интегральные показатели для указанных выше сечений. Результаты компьютерного моделирования продемонстрировали эффективность метода нагнетания давления в мягкий грунт для управления свойствами грунта и устойчивостью конструкций. Для рассмотренного объекта получено, что интегральные значения нормальных вертикальных напряжений при закреплении грунтового основания по отношению к разуплотненному грунту увеличиваются на 9–16%, интегральные значения деформаций увеличиваются на 45–53%. В то же время высокий уровень горизонтальных деформаций указывает на недостаточный эффект от выполненного закрепления грунтов. Благодаря закреплению удалось снизить давление на краях фундаментной плиты. Предложено дополнительно предусмотреть возведение подпорной стены для снижения этих деформаций.

Для цитирования: Власов М.А., Герасимов О.В., Простов С.М. Прогноз устойчивости грунтового основания горнотехнического сооружения со свайным фундаментом на основе объемной геомеханической модели // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 3 (169). С. 5-17. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-5-17, EDN: UHRCCC

Введение.

Анализ методов упрочнения неустойчивых грунтовых оснований сооружений позволяет сделать вывод, что к настоящему времени разработано и внедрено большое количество технических решений, позволяющих решать различные инженерные задачи, а именно: уплотнение вибрационными механизмами; трамбовка; укатка; устройство песчаных, грунтовых и известковых свай; виброуплотнение; понижение уровня подземных вод; внешняя пригрузка; цементация; термическое закрепление; глинизация; силикатизация; закрепление электроосмосом; известкование; электросиликатизация; закрепление синтетическими смолами; замораживание. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки, рекомендуется для определенных грунтовых условий и производственных возможностей его выполнения, т. е. имеет ограниченные области применения [1-6].

Для укрепления оснований горнотехнических сооружений используют различные способы инъекционного закрепления (уплотнения), которые позволяют улучшить устойчивость и повысить прочность грунта. Среди них особое внимание заслуживают методы напорной инъекции, которые обеспечивают равномерное распределение инъекционного материала по объемам, нуждающимся в усилении [7-10].

Напорная инъекция заключается в подаче специального состава под высоким давлением в пористые или трещиноватые грунты. Это позволяет не только заполнить пустоты, но и за счет уплотнения значительно улучшить физико-механические свойства почвы, предотвратив дальнейшие деформации. Такой подход особенно эффективен в условиях сложного геологического строения грунтов, где традиционные методы могут оказаться недостаточно результативными.

Основными материалами, используемыми для инъекций, являются цементные растворы, синтетические смолы и специальные геополимеры. Выбор конкретной технологии зависит от характеристик грунта и требований проекта. Внедрение методов напорной инъекции обеспечивает надежность и долговечность сооружений, что является важным фактором для их безопасной эксплуатации [11-13].

Целью исследования является прогноз устойчивости укрепляемого грунтового основания горнотехнического сооружения – помещения вентилятора главного проветривания угольной шахты на плитно-свайном фундаменте.

Методы исследования.

Объект исследований расположен в Кемеровской области – Кузбассе, в Прокопьевском муниципальном округе,

исполнителем работ является «Шахтоуправление «Талдинское – Кыргайское». Название предприятия является конфиденциальной информацией. Согласно данным визуальных обследований, инженерно-геологических изысканий и геодезического мониторинга, данное сооружение находится в аварийном состоянии: выявлены существенные неравномерные оседания фундаментной плиты вентилятора главного проветривания, образование которых связано с неоднородностью грунтового основания, что способствует возникновению деформаций и неравномерной осадке. Интенсивная нагрузка от веса вентилятора оборудования способствует увеличению давления на краях фундаментной плиты (Рис. 1) [14].

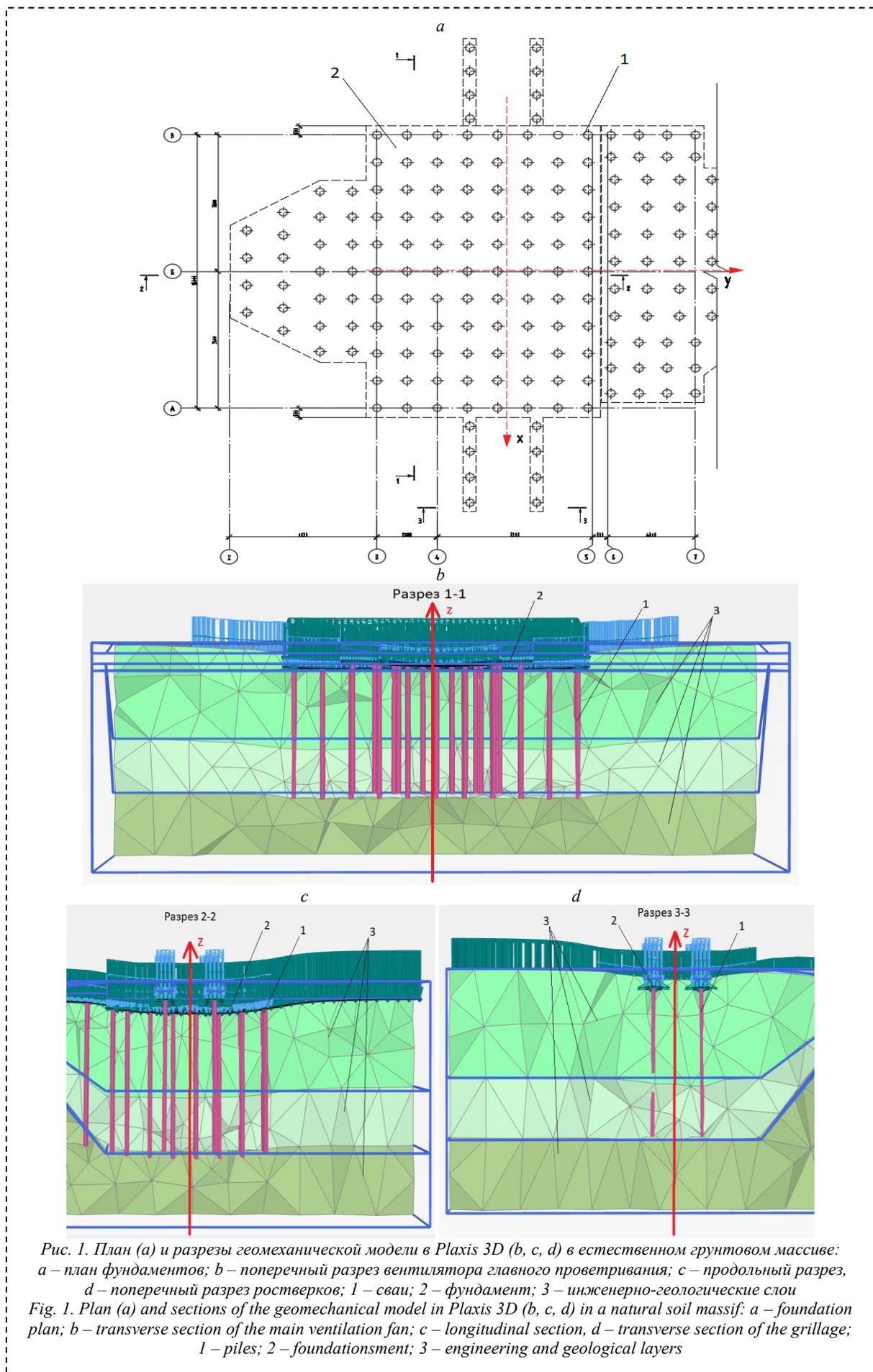
Фундамент вентилятора главного проветривания представлен плитно-свайным с размерами 15×11 м в плане, залегает до отметки - 1,150 м. Сваи приняты С80.35-9у по серии С 1.011.1-10. По бокам фундамента имеются ростверки.

С целью увеличения устойчивости сооружения, согласно базовым методикам, были разработаны планы и схемы закрепления грунтов методом напорной инъекции (Рис. 2). Для фундаментной плиты вентилятора главного проветривания были предусмотрена инъекции через вертикальные инъекторы длиной 10 и 4,9 м, расположенные на краях фундаментной плиты и между сваями. Вертикальные инъекторы длиной 4,9 м служили для уменьшения деформаций под подошвой фундамента, а инъекторы длиной 10 м – для уменьшения горизонтальных перемещений под сваями. Снаружи здания и по периметру ростверков была предусмотрена инъекция через дополнительные вертикальные инъекторы, длиной 4,2 и 9,2 м (из-за невозможности расположить инъекторы внутри здания).

На основе приведенных данных и алгоритмов, описанных в работах [15, 16], были назначены основные параметры модели для рассматриваемого случая: ширина в продольном направлении $b_{m1} = 34,0$ м, а в поперечном – $b_{m2} = 39,0$ м; высота модели $h_m = 13,0$ м. Граничные условия в виде ограничений перемещений накладываются аналогично принятым в работе [17]. Линией приложения нагрузки по высоте считается верхняя грань фундамента (обрез).

Результаты.

Реализация описанной ранее геомеханической модели, включающей результаты инженерно-геологических изысканий, позволила сформировать базы данных напряженно-деформированного состояния (НДС) основания сооружения в естественном (до укрепительных работ) состоянии [15, 16].



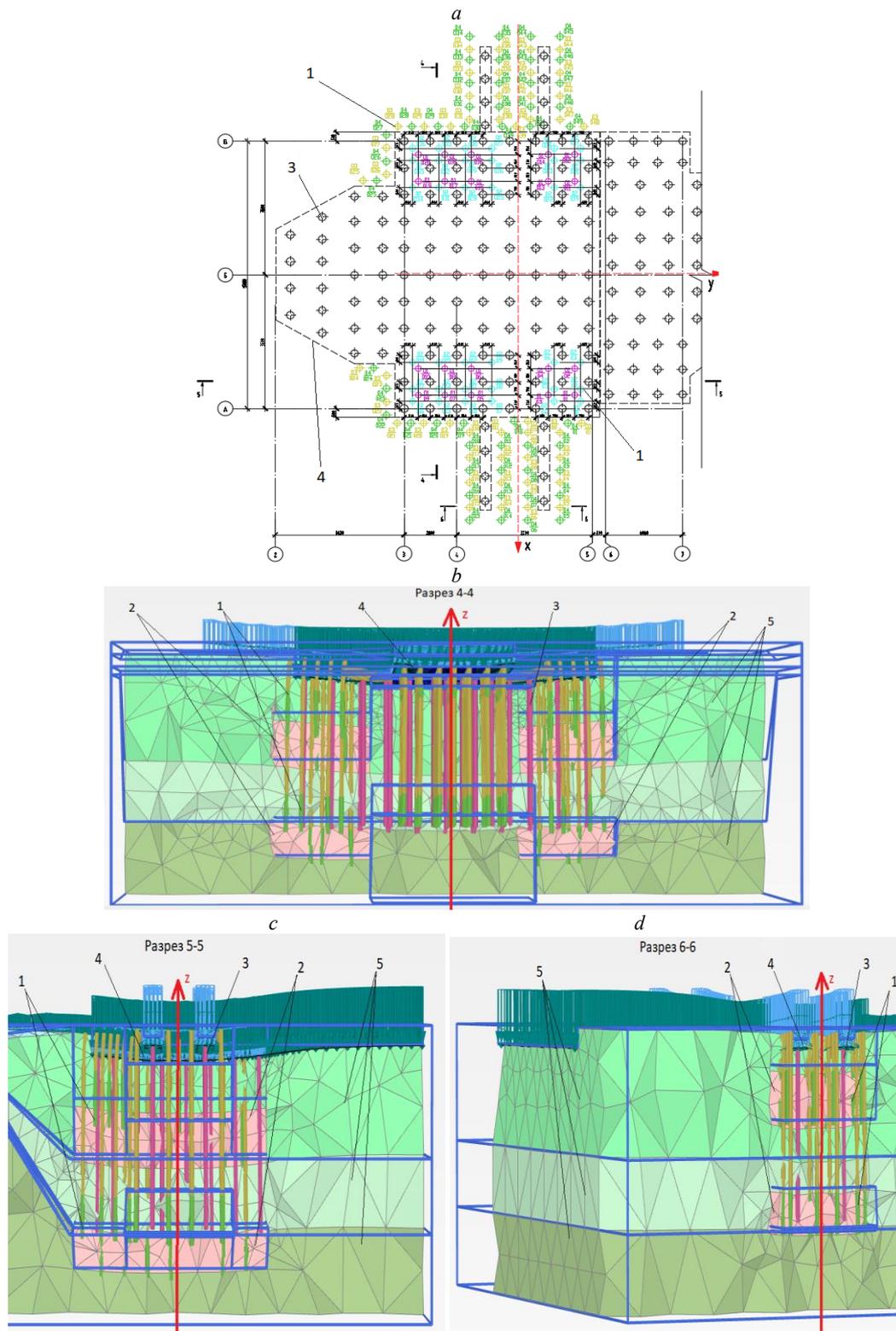


Рис. 2. План (а) и разрезы геомеханической модели в Plaxis 3D (b, c) при закреплении: а – план фундаментов; b – поперечный разрез вентилятора главного проветривания; c – продольный разрез; d – поперечный разрез роствергов; 1 – инъекторы; 2 – зоны закрепления; 3 – сваи; 4 – фундамент; 5 – инженерно-геологические слои;

⊕ – вертикальные инъекторы ($l=4,2$ м); ⊕ – вертикальные инъекторы ($l=9,3$ м); ⊕ – вертикальные инъекторы ($l=4,9$ м); ⊕ – вертикальные инъекторы ($l=10$ м); x, y, z – координаты

Fig. 2. Plan (a) and sections of the geomechanical model in Plaxis 3D (b, c) when fixing: a – foundation plan; b – transverse section of the main ventilation fan; c – longitudinal section; d – transverse section of the grillages;

1 – injectors; 2 – fixing zones; 3 – piles; 4 – foundation; 5 – engineering and geological layers; ⊕ – vertical injectors ($l=4,2$ m); ⊕ – vertical injectors ($l=9,3$ m); ⊕ – vertical injectors ($l=4,9$ m); ⊕ – vertical injectors ($l=10$ m); x, y, z – coordinates

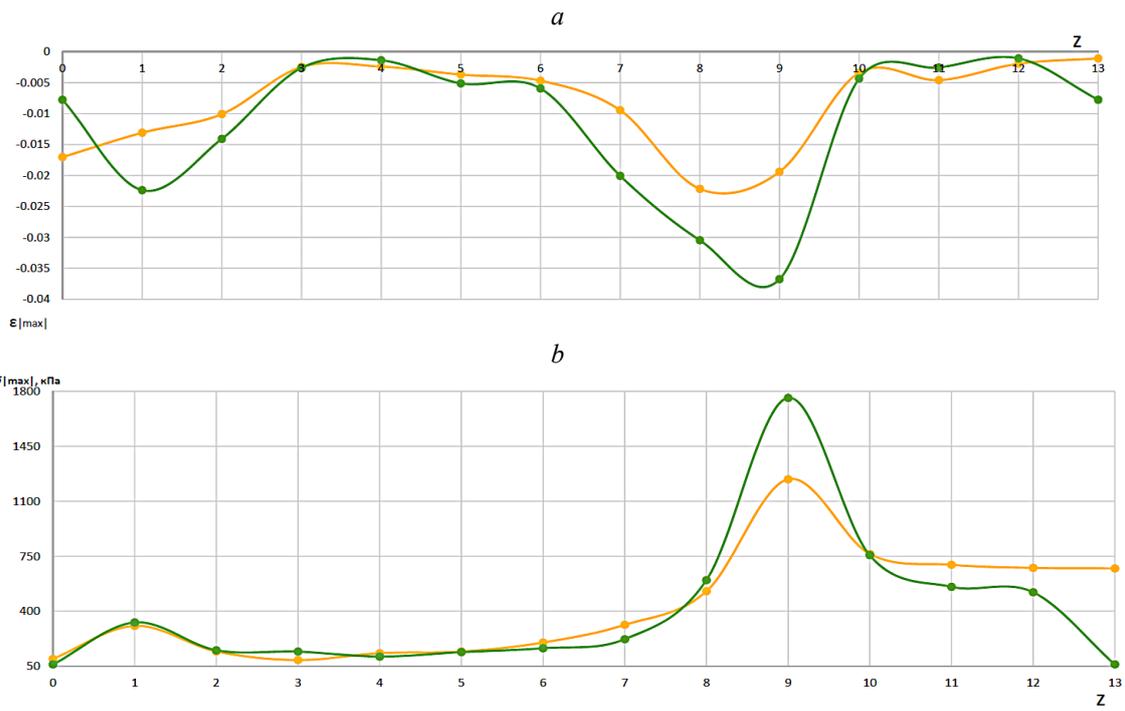


Рис. 3. Значения максимальных вертикальных деформаций (а) и напряжений (б) от глубины z модели: — естественное основание; — закрепление
 Fig. 3. Values of maximum vertical deformations (a) and stresses (b) from the depth z of the model: — natural base; — pinning

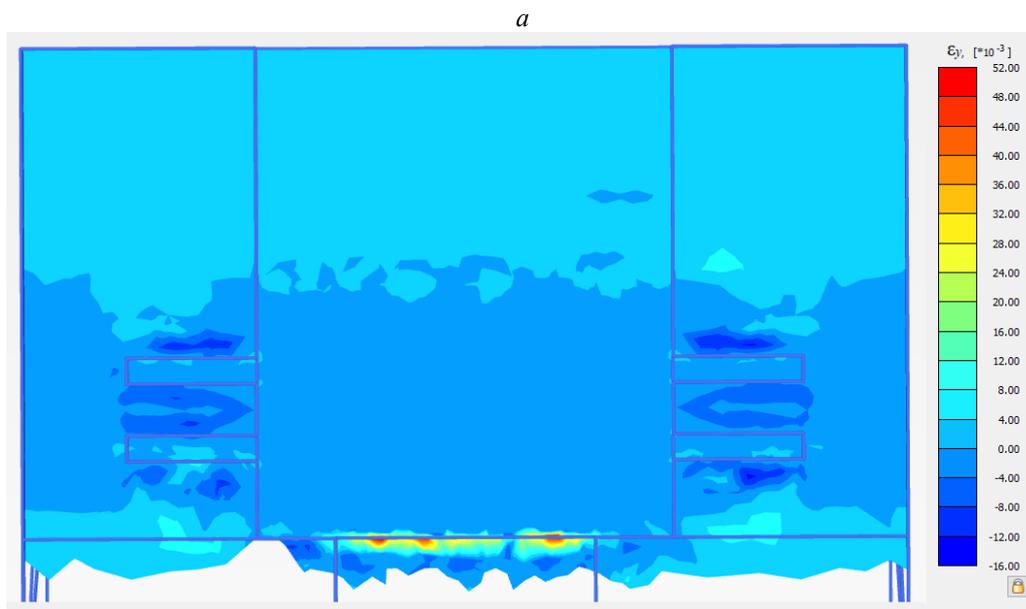
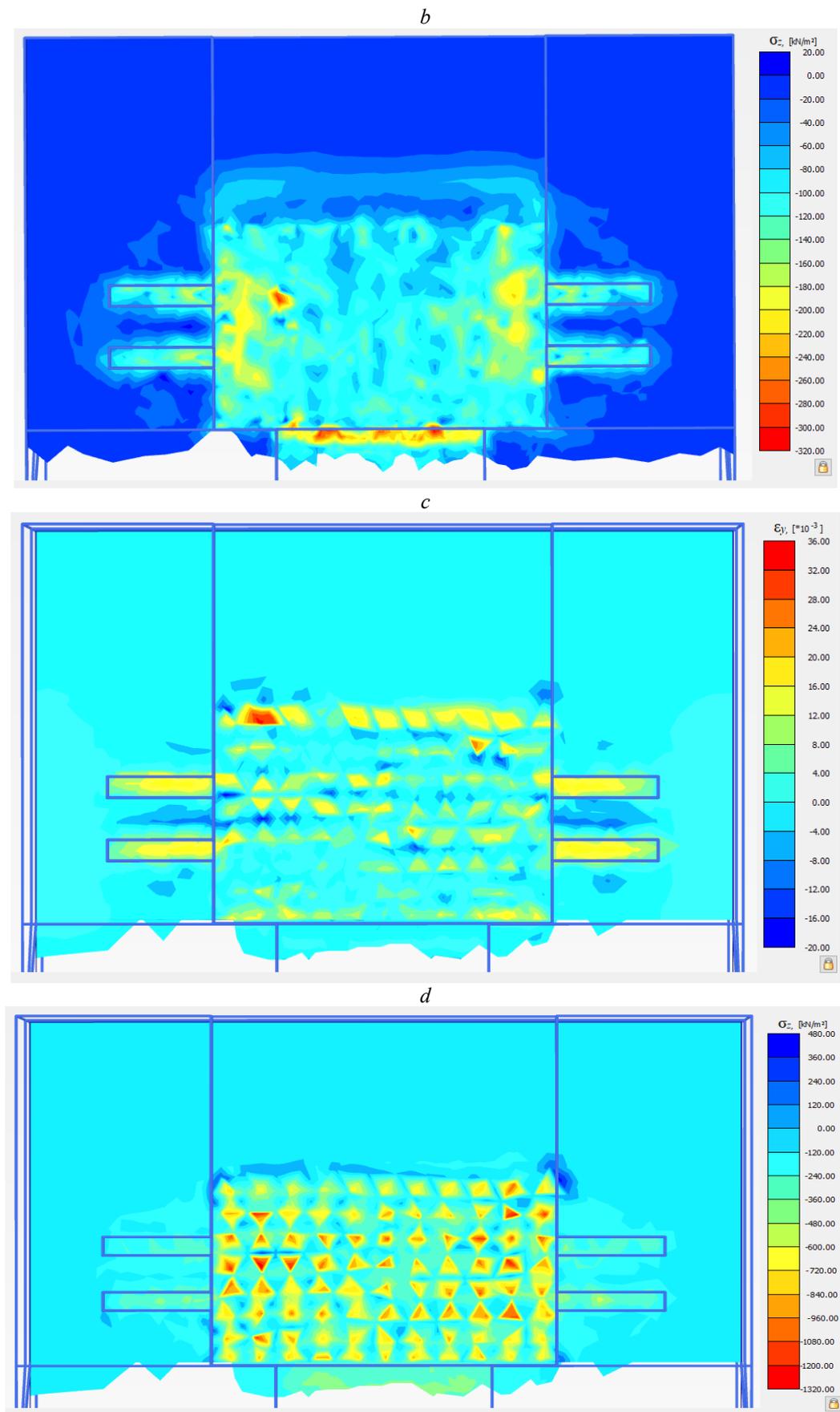


Рис. 4. Распределение деформаций и напряжений в естественном грунтовом массиве: а, б – на глубине $z = -1$ м; с, д – $z = -9$ м
 Fig. 4. Distribution of deformations and voltages in a natural soil massif: а, б – at a depth of $z = -1$ m; с, д – at a depth of $z = -9$ m

Для достижения поставленной цели исследований были определены наиболее критические участки по глубине объемной модели, где фиксируются максимальные (по модулю) значения деформаций и напряжений (Рис. 3). В качестве основных параметров

выбраны горизонтальные деформации ϵ_y и вертикальные напряжения σ_z , которые наиболее полно характеризуют геодинамические процессы в основании опорной зоны. После анализа полученных графиков (Рис. 3 а, б) решено провести расчеты на уровнях $z = -1$ и -9 м,



Продолжение рис. 4.
Continued in fig. 4.

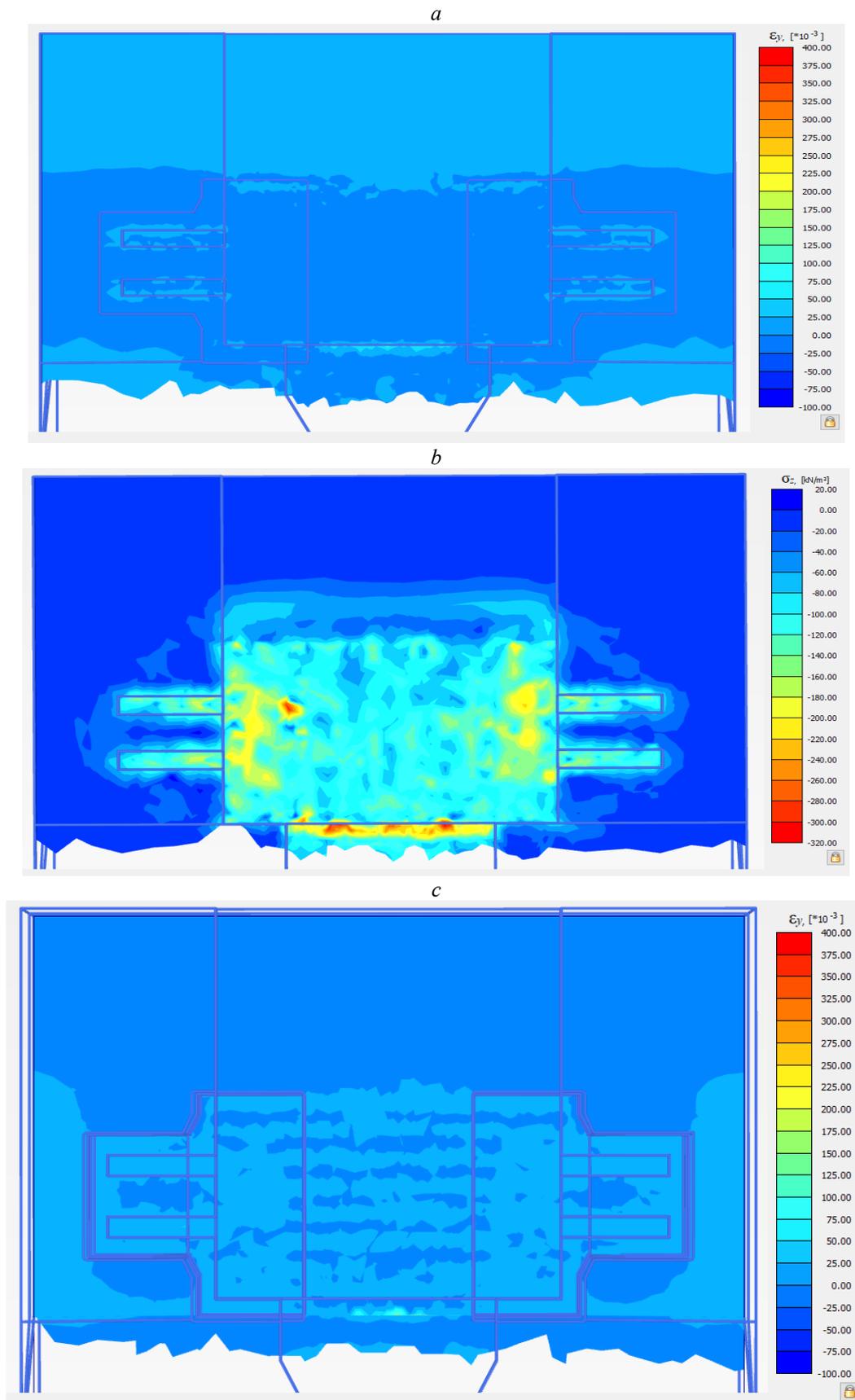
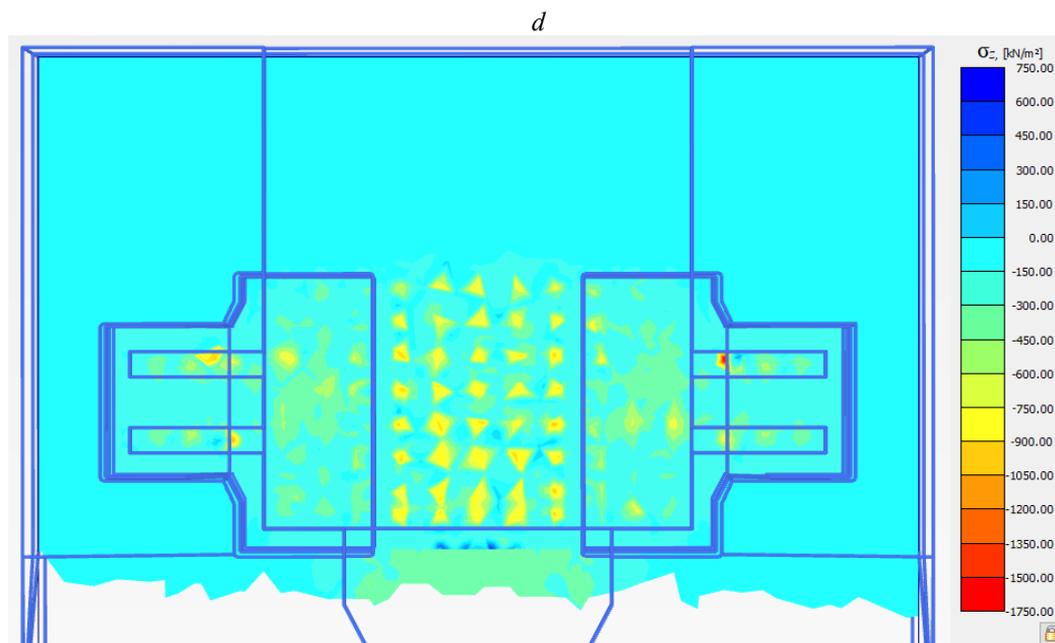


Рис. 5. Распределение деформаций и напряжений в закрепленном грунтовом массиве: a, b – на глубине $z = -1$ м; c, d – $z = -9$ м

Fig. 5. Distribution of deformations and voltages in a pinning soil mass: a, b – at a depth of $z = -1$ m; c, d – at a depth of $z = -9$ m



Продолжение рис. 5.
Continued in fig. 5.

Таблица 1. Значения интегральных показателей
Table 1. Values of integral indicators

Модель		$\Sigma\sigma_i S_i$, кПа·м ²	ΣS_i , м ²	$I\sigma_i$, кПа	$\Sigma\varepsilon_i S_i \cdot 10^{-3}$, м ²	ΣS_i , м ²	$I\varepsilon_i$, 10 ³
z = -1 (рис. 4, 5 (a, b))	t ₀	581,706	16,6	35,043	-154,79	16,6	-9,325
	t ₁	673,818		40,59	-236,616		-14,254
z = -9 (рис. 4, 5 (c, d))	t ₀	3893,39	16,6	234,541	-111,083	16,6	-6,692
	t ₁	4225,946		254,575	-161,563		-9,732

соответствующих наибольшим значениям ε_{max} и σ_{max} , что позволит детализировать расположение опасных зон основания.

В результате третьего этапа моделирования были построены сечения по глубине вентилятора главного проветривания на отметках $z = -1$ и -9 м в виде полей изолиний напряженно-деформированного состояния грунтового массива для естественного и закрепленного состояния основания (Рис. 4, 5).

Сравнение полей изолиний ε_y и σ_z на Рис. 4 и 5 дало возможность выявить следующие качественные результаты геомеханических процессов и перераспределения нормального давления в грунтовом массиве в результате его закрепления:

1. При $z = -1$ м в естественном основании концентрация напряжений происходит преимущественно на стыках между фундаментными плитами под подошвой фундамента и ростверками. После закрепления напряжения σ_z концентрируются под подошвой

фундамента. При $z = -9$ м основная концентрация напряжений σ_z преимущественно сосредоточена вокруг свай. После закрепления эта концентрация сохраняется, но под ростверком напряжения возрастают.

2. Деформации ε_y в массиве распределяются симметрично. Наибольшие (по модулю) деформации при $z = -1$ м возникают под подошвой фундамента, максимальные деформации – на стыках между фундаментными плитами. После закрепления происходит рассеивание (уменьшение по модулю) деформаций, но их направление изменяется. При $z = -9$ м наибольшие по модулю деформации сосредоточены преимущественно вокруг свай ростверка и на стыках между фундаментными плитами. После закрепления также происходит рассеивание деформаций и изменение их направления.

Полученные результаты подтверждают выводы о сложных геомеханических процессах формирования НДС породных и грунтовых

массивов неоднородного строения, приведенных в работах [18-21].

С применением базы данных по НДС грунтового основания в естественном (в момент t_0) и закрепленном (t_1) состояниях целесообразно провести расчет интегральных показателей, включающий величины σ_z ; ε_y и площади фигур, ограниченных их площадями, которые позволят количественно оценить устойчивость грунтового основания сооружения. Интегральные показатели для плоского поля изолиний напряжений σ и деформаций ε рассчитываются аналогично предложенному в источниках [15, 16].

Расчет интегральных показателей следует проводить в пределах контура фундаментных плит.

Результаты расчетов интегральных показателей $I\sigma$ и $I\varepsilon$ для моментов t_0 и t_1 и сечений с разными отметками по глубине z представлены в Таблице 1.

В графическом виде конечные результаты Таблицы 1 представлены на Рис. 6.

Основное преимущество объемного геомеханического моделирования заключается в возможности определения наиболее опасной отметки по глубине основания, нуждающегося в дополнительном укреплении, что недоступно при плоских моделях.

Результаты расчетов показывают, что

динамика интегральных показателей $I\sigma_t$ и $I\varepsilon_t$ отражает геомеханические процессы в естественном и укрепляемом грунтовом основании следующим образом: при укреплении основания наблюдается рост напряжений и деформаций, что показывает на недостаточный эффект от выполненного закрепления грунтов. Целесообразно провести дополнительные работы по возведению подпорной стены для снижения деформационных процессов.

Выводы.

1. Результаты компьютерного моделирования продемонстрировали эффективность метода нагнетания давления в мягкий грунт для управления свойствами грунта и устойчивостью конструкции. Методы математического и компьютерного моделирования позволили достаточно детально спрогнозировать полученные эффекты консолидации и выявить наиболее проблемные участки грунтового массива.

2. По сравнению с двухмерными моделями трехмерная дает возможность проверить любое плоское расчетное сечение по глубине и определить наиболее опасные из них. Для рассмотренного объекта получено, что интегральные значения нормальных вертикальных напряжений при закреплении грунтового основания по отношению к разуплотненному грунту увеличиваются на 9–

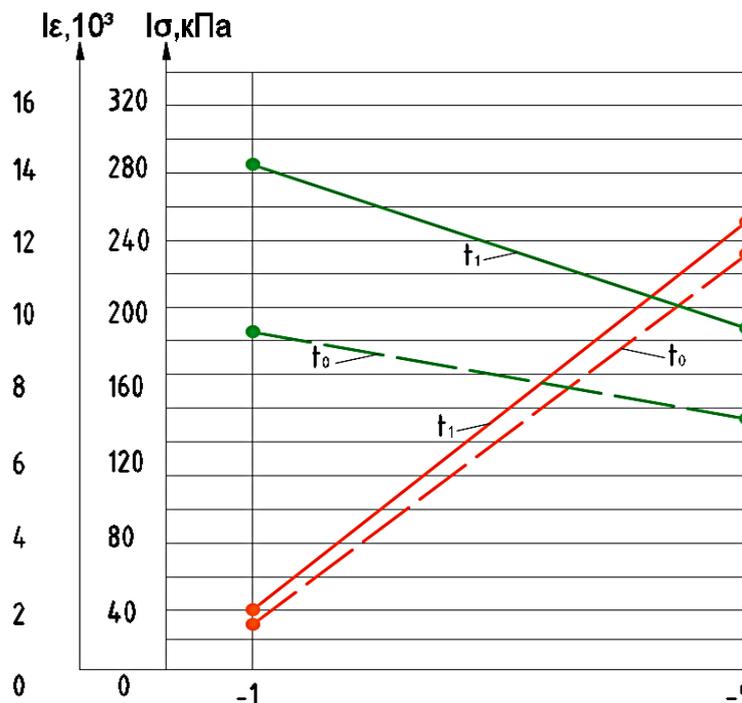


Рис. 6. Изменение интегральных показателей напряжений $I\sigma$ и деформаций $I\varepsilon$, на стадиях «естественное основание – закрепление» на отметке: -1 м; -9 м;

t_0 – естественное основание; t_1 – закрепление;
 ● – напряжения $I\sigma$; ● – деформации $I\varepsilon$

Fig. 6. Changes in the integral indices of voltages $I\sigma$ and deformations $I\varepsilon$, at the stages of "natural base – pinning" at the mark: -1 m; -9 m;

t_0 – natural base; t_1 – pinning; ● – voltages $I\sigma$; ● – deformations $I\varepsilon$

16%, интегральные значения деформаций увеличиваются на 45–53%.

3. В то же время увеличение горизонтальных деформаций наглядно показывает недостаточный эффект от выполненного закрепления грунтов. Следует дополнительно предусмотреть возведение специальной подпорной стены для снижения этих деформаций.

4. Благодаря закреплению удалось снизить давление на краях фундаментной плиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Збицкая В. В., Псюк В. В. Обоснование применения буроинъекционной технологии при упрочнении грунтов оснований эксплуатируемых строительных объектов // Сборник научных трудов ДонГТИ. 2022. № 28 (71). С. 113–118.
2. Дизенко С. И., Ситниченко А. А., Елисеев Л. В. Современные способы усиления оснований и фундаментов [Электронный ресурс] // E-Scio. 2022. № 6.
3. Кахаров З. В., Мирханова М. М. Методы искусственного закрепления грунта оснований зданий и сооружений // Вестник науки. 2022. №11 (56). С. 336–340.
4. Жур В. Н., Лахно Д. И. Контроль качества работ по закреплению грунтовых массивов методом цементации // Инженерный вестник Дона. 2021. №12. С. 1–12.
5. Polishchuk A., Nikitina N., Petukhov A., Semyonov I. Strengthening of the foundations of renovated buildings with injection piles // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2017. № 1(17). Pp. 75–86.
6. Akopyan V., Akopyan A. Experimental and Theoretical Investigation of the Interaction of the Reinforced Concrete Screw Piles with the Surrounding Soil // Procedia Engineering. 2016. № 150. Pp. 2202–2207.
7. Голованов А. М., Пашков В. И., Рево Г. А., Пашков Д. В., Нерчинский О. В., Туренко Р. И. Опыт закрепления структурно-неустойчивых грунтов цементацией // Вестник МГСУ. 2013. № 8. С. 59–66.
8. Шакиров И. Ф., Вилкова А. О. Исследование грунтов, укрепленных инъекцией тонкодисперсных цементов // Chronos: естественные и технические науки. 2020. №5 (33). С. 15–17.
9. Шакиров И. Ф., Гарифуллин Д. Р. Исследование несущей способности и деформаций песчаных грунтов, укрепленных напорной цементацией // Известия КГАСУ. 2015. № 4 (34). С. 200–205.
10. Wintercorn H. F., Pamukcu S. Soil Stabilization and Grouting // Foundation Engineering Handbook (2nd edn). H.-Y. Fang – ed. N.-Y. : Van Nostrend Reindhold, 1991. Pp. 317–378.
11. Нардин Д. В. Основные аспекты усиления слабых оснований конструктивным методом // Международный научный журнал «Вестник науки». 2023. № 6 (63). С. 976–982.
12. Селезнев К. А. Струйная цементация грунтов или инъектирование [Электронный ресурс] // Universum: технические науки. 2023. № 11(116).
13. Калач Ф. Н. Особенности стабилизации слабосвязных грунтов в основании аварийно-деформированных зданий с использованием тонкодисперсных инъекционных материалов // Construction and Geotechnics. 2023. № 2(14). С. 37–50.
14. Власов М. А., Герасимов О. В., Простов С. М. Особенности геологического строения грунтового основания установки главного проветривания строящейся шахты // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 3. С. 4–13.
15. Власов М. А., Простов С. М. Прогноз устойчивости грунтового основания карьерной обогатительной установки на основе объемной геомеханической модели // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 4. С. 5–22.
16. Власов М. А., Герасимов О. В., Простов С. М. Прогноз устойчивости грунтового основания горнотехнического сооружения с плитным фундаментом на основе объемной геомеханической модели // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 3. С. 4–13.
17. Никитина А. М., Борзых Д. М., Риб С. В., Петрова О. А. Сопоставление результатов математического моделирования геомеханических процессов и шахтных измерений в угольном пласте // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2022. №2. С. 452–466.
18. Olyansky Y., Shekochihina E., Kalinovskiy S. Forecast of magnitude postsubsidence compaction at the building on slow-subsidence of loess soils // E3S Web of Conferences. 2019. № 1(97). 4001.
19. Rachkov D., Volosyuk D., Pronozin Y., Bartolomej L. Experience of strengthening the soil base with parallel lifting of the foundation structure // E3S Web of Conferences. 2022. № 371. 02011.
20. Ющубе С. В., Подшивалов И. И. Моделирование напряженно-деформированного состояния разноразмерного основания и фундамента многоэтажного здания, расположенного на склоне // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 5 (25). С. 164–178.
21. Шашкин А. Г., Шашкин К. Г. Расчет фундаментных плит в пространственной постановке с учетом нелинейных деформаций основания [Электронный ресурс] // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2000. № 3.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Власов Максим Алексеевич, аспирант, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: maxsdss@mail.ru

Герасимов Олег Васильевич, канд. техн. наук, генеральный директор, ООО «Нооцентр», (650056, Россия, г. Кемерово, ул. Ворошилова, 30), e-mail: gerasimov@noocentr.com

Простов Сергей Михайлович, докт. техн. наук, профессор, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: psm.kem@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Власов Максим Алексеевич – обзор литературы по теме исследования, разработка закрепления и компьютерной модели, сбор и анализ данных, написание текста.

Герасимов Олег Васильевич – постановка задачи и организация проведения инженерно-геологических изысканий.

Простов Сергей Михайлович – научный менеджмент, анализ данных, формулировка цели и выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

FORECAST OF STABILITY OF THE SOIL BASE OF A MINING FACILITY WITH A PILE FOUNDATION BASED ON A VOLUMETRIC GEOMECHANICAL MODEL

Maksim A. Vlasov^{1*}, Oleg V. Gerasimov²,
Sergey M. Prostov¹

¹ T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

² ООО «Нооцентр»

* for correspondence: maxsdss@mail.ru



Article info

Received:

14 October 2024

Accepted for publication:

22 January 2025

Accepted:

30 April 2025

Published:

26 June 2025

Keywords: computer modeling; mining engineering; forecast; stresses; deformations; soil fixation; integral indicator geomechanical modeling.

Abstract.

The object of the study is the construction of a main ventilation fan of a coal mine, which is in an emergency condition. According to the results of engineering and geological surveys, it was found that the main reason for the occurrence of dangerous deformations of the foundations of structures is the heterogeneity of the properties of the foundation soils, which contributes to the occurrence of deformations and uneven precipitation, an increase in pressure at the edges of the foundation plate. Based on engineering and geological surveys, two schemes of a geomechanical model have been developed that provides a forecast of deformations and stresses in the natural and fixed state of the soil base. On the basis of the volumetric model, horizontal design sections were analyzed at a depth of 1 meter, based on this, the most dangerous sections were determined at depths $z=-1$ and $z=-9$ m, stress and strain distribution isolines for these sections of the soil base were constructed. For a more accurate prediction of the stress-strain state, integral indicators for the above sections were determined. The results of computer modeling have demonstrated the effectiveness of the pressure injection method in soft soil for controlling soil properties and stability of structures. For the considered object, it was found that the integral values of normal vertical stresses increase by 9-16% when fixing the soil base with respect to the decompressed soil, and the integral values of deformations increase by 45-53%. At the same time, a high level of horizontal deformations indicates an insufficient effect of the performed soil fixation. Thanks to the

fastening, it was possible to reduce the pressure on the edges of the foundation plate. It is proposed to additionally provide for the construction of a retaining wall to reduce these deformations.

For citation: Vlasov M.A., Gerasimov O.V., Prostov S.M. Forecast of stability of the soil base of a mining facility with a pile foundation based on a volumetric geomechanical model. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 3(169):5-17. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-5-17, EDN: UHRCCC

REFERENCES

- Zbickaya V.V., Psyuk V.V. Obosnovanie primeneniya buroin"ekcionnoj tekhnologii pri uprochnenii gruntov osnovanij ekspluatiruemih stroitel'nyh ob"ektov [Justification of using the drilling injection technology in strengthening the soils of bases of the operated construction facilities]. *Sbornik nauchnyh trudov DonGTI [Collection of scientific works of DonGTI]*. 2022; 71(28):113–118.
- Dizenko S.I., Sitnichenko A.A., Eliseev L.V. Sovremennye sposoby usileniya osnovanij i fundamentov [Modern ways to strengthen foundations and foundations] [Electronic resource]. *E-Scio*. 2022; 6.
- Kaharov Z.V., Mirhanova M.M. Metody iskusstvennogo zakrepleniya grunta osnovanij zdaniy i sooruzhenij [Methods of artificial fixation soil of base of building]. *Vestnik nauki [Bulletin of Science]*. 2022; 56(11):336–340.
- Zhur V.N., Lahno D.I. Kontrol' kachestva rabot po zakreplenyu gruntovyh massivov metodom cementacii [Quality control of work on the consolidation of soil massifs by cementation]. *Inzhenernyj vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]*. 2021; 12:1–12.
- Polishchuk A., Nikitina N., Petukhov A., Semyonov I. Strengthening of the foundations of renovated buildings with injection piles. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017; 17(1):75–86.
- Akopyan V., Akopyan A. Experimental and Theoretical Investigation of the Interaction of the Reinforced Concrete Screw Piles with the Surrounding Soil. *Procedia Engineering*. 2016; 150:2202–2207.
- Golovanov A.M., Pashkov V.I., Revo G.A., Pashkov D.V., Nerchinskiy O.V., Turenko R.I. Opyt zakrepleniya strukturno-neustoychivykh gruntov tsementatsiyey [Case Study of Structural-Unstable Soils Stabilization Using Grouting]. *Vestnik MGSU [Bulletin of the MGSU]*. 2013; 8:59–66.
- Shakirov I.F., Vilkova A.O. Issledovanie gruntov, ukreplennykh in"ekciej tonko-dispersnykh cementov [Investigation of soils reinforced by injection of fine cements]. *Chronos: estestvennyye i tekhnicheskie nauki [Chronos: natural and technical sciences]*. 2020. V. 33. No. 5. Pp. 15–17.
- SHakirov I. F., Garifullin D. R. Issledovanie nesushchej sposobnosti i deformatsij peschanykh gruntov, ukreplennykh napornoj cementaciej [The research of bearing capacity and deformation of sandy ground, reinforced by pressure cementation]. *Izvestiya KGASU [KGASU News]*. 2015; 34(4):200–205.
- Wintercorn H.F., Pamukcu S. Soil Stabilization and Grouting // *Foundation Engineering Handbook* (2nd edn). H.-Y.Fang – ed. N.-Y. : Van Nostrend Reinhold; 1991. Pp. 317–378.
- Nardin D.V. Osnovnye aspekty usileniya slabyyh osnovanij konstruktivnym metodom [The main aspects of strengthening weak foundations by a constructive method]. *Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal «Vestnik nauki» [International scientific journal «Bulletin of science»]*. 2013; 63(6):976–982.
- Seleznev K.A. Strujnaya cementaciya gruntov ili in"ektirovanie [Jet cementation of soils or injection] [Electronic resource]. *Universum: tekhnicheskie nauki [Universum: Technical Sciences]*. 2023; 116(11).
- Kalach F.N. Osobennosti stabilizacii slabosvyaznykh gruntov v osnovanii avarijno-deformirovannykh zdaniy s ispol'zovaniem tonkodispersnykh in"ekcionnykh materialov [Features of stabilization of soft soils at the base of emergency deformed buildings using finely powdered injection materials in low pressure mode]. *Construction and Geotechnics*. 2023; 14(2):37–50.
- Vlasov M.A., Gerasimov O.V., Prostov S.M. Osobennosti geologicheskogo stroeniya gruntovogo osnovaniya ustanovki glavnogo provetrevaniya stroyashchejsya shahty [Features of the geological structure of the soil base of the installation of the main ventilation of the mine under construction]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Kuzbass State Technical University]*. 2024; 3:4–13.
- Vlasov M.A., Prostov S.M. Prognoz ustojchivosti gruntovogo osnovaniya kar'ernoj obogatitel'noj ustanovki na osnove ob"emnoj geomekhanicheskoy modeli [Forecast of stability of the soil base of a quarry concentra-tor based on volumetric geomechanical mode]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Kuzbass State Technical University]*. 2024; 4:5–22.
- Vlasov M.A., Gerasimov O.V., Prostov S.M. Prognoz ustojchivosti gruntovogo osnovaniya gornotekhnicheskogo sooruzheniya s plitnym fundamentom na osnove ob"emnoj geomekhanicheskoy modeli [Forecast of stability of the soil base of a mining facility with a slab foundation based on a volumetric geomechanical model]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Kuzbass State Technical University]*. 2024; 3:4–13.

17. Nikitina A.M., Borzyh D.M., Rib S.V., Petrova O.A. Sopostavlenie rezultatov matematicheskogo modelirovaniya geomekhanicheskikh processov i shahtnyh izmerenij v ugol'nom plaste [Comparison of the results of mathematical modeling of geomechanical processes and mine measurements in a coal seam]. 'Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle [Izvestiya TulSU. Earth Sciences]. 2022; 2:452–466.

18. Olyansky Y., Shekochihina E., Kalinovsky S. Forecast of magnitude postsubsidence compaction at the building on slow-subsidence of loess soils. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97(1):4001.

19. Rachkov D., Volosyuk D., Pronozin Y., Bartolomej L. Experience of strengthening the soil base with parallel lifting of the foundation structure. *E3S Web of Conferences*. 2022; 371:02011.

20. Yushchube S.V., Podshivalov I.I. Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya raznourovneвого osnovaniya i fundamenta mnogoetazhnogo zdaniya, raspolozhennogo na sklone [Simulation of the stress-strain state of a high-rise brick building on pile foundation]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering]*. 2023; 25(5):164–178.

21. Shashkin A.G., Shashkin K.G. Raschet fundamentnyh plit v prostranstvennoj postanovke s uchetom nelinejnyh deformacij osnovaniya [Calculation of foundation slabs in spatial formulation taking into account nonlinear deformations of the base] [Electronic resource]. *Rekonstrukciya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo [Urban reconstruction and geotechnical construction]*. 2000; 3.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Maksim A. Vlasov, postgraduate, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya st., 28), e-mail: maxsdss@mail.ru

Oleg V. Gerasimov, PhD in Technical Sciences, general manager, ООО «Noocentr», (650056, Russia, Kemerovo, Voroshilov St, 30), e-mail: gerasimov@noocentr.com

Sergey M. Prostov, Grand PhD in Technical Sciences, Professor, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya st., 28), e-mail: psm.kem@mail.ru

Contribution of the authors:

Maksim A. Vlasov – a review of the literature on the research topic, the development of a fixing and computer model, data collection and analysis, writing a text.

Oleg V. Gerasimov – setting the task and organizing engineering and geological surveys.

Sergey M. Prostov – scientific management, data analysis, formulation of goals and conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.

