

**ГЕОФИЗИКА
GEOPHYSICS**

Научная статья

УДК 624.131.7

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-5-22

**ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ КАРЬЕРНОЙ
ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ОБЪЕМНОЙ
ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ****Власов Максим Алексеевич, Простов Сергей Михайлович,**

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

*для корреспонденции: maxsdss@mail.ru

**Информация о статье**

Поступила:

13 апреля 2024 г.

Одобрена после
рецензирования:

25 июля 2024 г.

Принята к публикации:

29 августа 2024 г.

Опубликована:

26 сентября 2024 г.

Ключевые слова:*горнотехнические
сооружения, прогноз, осадка,
компьютерное моделирование,
напряжения, деформации,
закрепление грунтов,
интегральный показатель,
точность расчета***Аннотация.**

Рассмотрен аварийный участок обогатительной установки угольного разреза. По результатам инженерно-геологических изысканий и геофизических исследований установлено, что основной причиной опасных деформаций фундаментов конструкций является образование зон ослабленных грунтов основания вследствие оползня насыпного массива одной из опор. На основе построенного инженерно-геологического разреза и физико-механических свойств грунтов было построено три схемы модели, включающей прогноз деформаций и напряжений при естественном грунтовом основании, разуплотненном и разуплотненном в закрепленном состоянии грунтового основания. Были проведены расчетные сечения через каждые 15 градусов относительно центра опоры, на основе этого были определены наиболее опасные сечения, особенно характерны сечения (0, 75, 90, 135) с распределением напряжений и деформаций для всех трех моделей грунтового основания. Для более точного прогнозирования напряженно-деформированного состояния были определены интегральные показатели для каждого угла поворота сечения для всех трех моделей грунтового основания, при естественном грунтовом основании, разуплотненном и при разуплотненном с закреплением грунтового основания. Был разработан план и схема расположения инъекторов, который включал в себя длины инъекторов, шаг и длину перфорированной части. На основании всех данных было выяснено, что значения осадки, как и значения напряжений что при естественном грунтовом основании, что при разуплотнении с закреплением были идентичны, а значения деформаций уменьшились по сравнению с разуплотненным грунтом. Проведена оценка повышения точности расчета максимальных напряжений и деформаций, которое составило 16,34% и 78,04% соответственно.

Для цитирования: 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 (164). С. 5-22. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-5-22, EDN: ZZIYZK

Введение.

Для укрепления оснований горных сооружений существует несколько способов инъекционного закрепления (уплотнения).

Самые эффективные из них – метод напорной инъекции, используемый для песчаных грунтов, и метод электрохимического укрепления, применяемый для пылевато-глинистых

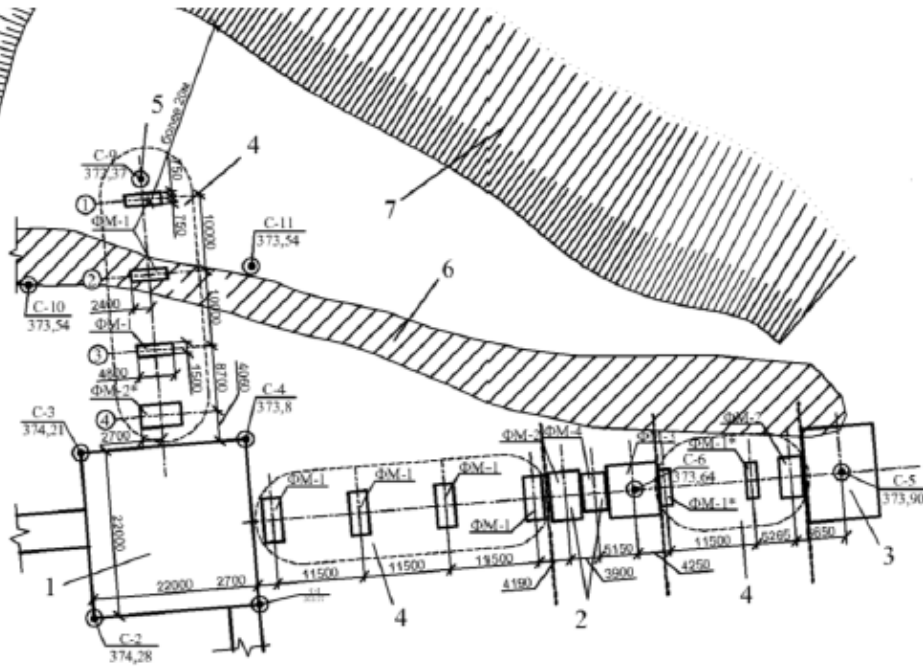


Рис. 1. Схема территории и план исследуемого объекта: 1 – обогатительный корпус; 2 – дробилка и дробильное отделение; 3 – приемный бункер; 4 – галереи № 11, 5, 3; 5 – геологические скважины; 6 – зона ослабления грунтов; 7 – откос насыпного основания

Fig. 1. Territory diagram and plan of the object under study: 1 – concentrating building; 2 – crusher and crushing department; 3 – receiving bunker; 4 – galleries No. 11, 5, 9; 5 – geological wells; 6 – soil weakening zone; 7 – slope of the bulk base

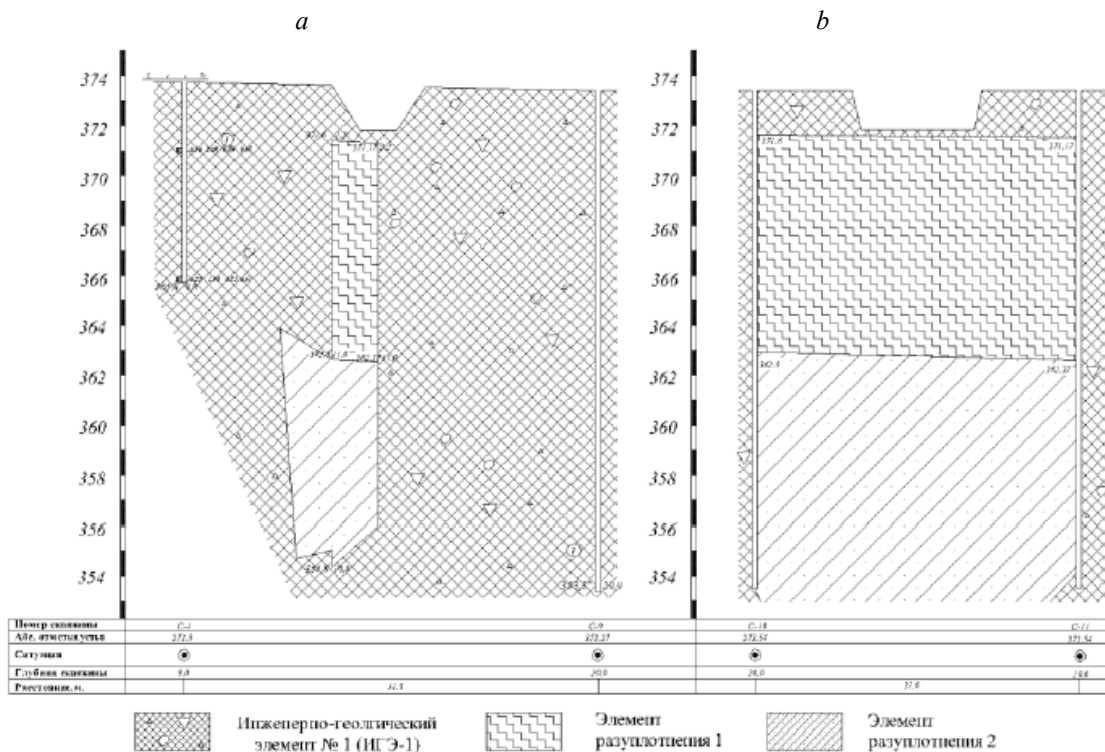


Рис. 2. Инженерно-геологический разрез грунтового основания под опорой галереи в продольном (а) и поперечном (б) направлениях

Fig. 2. Engineering and geological section of the soil base under the gallery support in the longitudinal (a) and transverse (b) directions

насыщенных водой грунтов. Метод напорной инъекции заключается в закачке в грунт специального состава под высоким давлением, достаточным для частичного гидроразрыва грунта [1]. Состав проникает в поры грунта и заполняет их, создавая прочную структуру. Метод электрохимического закрепления основан на использовании электрообработки для укрепления грунта. Электрический ток пропускают через грунт, в результате чего происходит комплекс химических реакций, который приводит к образованию прочных соединений между частицами грунта [2, 3, 4].

В дополнение к этим двум основным методам существуют и другие методы инъекционного закрепления грунтов: струйной инъекции, пенной инъекции, силикатизации, битумизации [5, 6, 7].

Выбор способа инъекционного закрепления грунта зависит от конкретных условий: типа грунта, глубины залегания, наличия обводненных и разуплотненных зон [8].

Инъекционное закрепление грунтов применяется для решения различных задач в строительстве и горном деле, в их числе: укрепление оснований зданий и сооружений, склонов и откосов, создание противодиффузионных завес, укрепление неустойчивых грунтов при прокладке тоннелей и шахт, строительство дорог и мостов, добыча полезных ископаемых. Практика показывает, что инъекционное закрепление грунтов – эффективный способ повышения устойчивости оснований горнотехнических сооружений и решения различных задач в строительстве и горном деле [9, 10, 11].

Целью исследования является прогноз устойчивости укрепляемого основания карьерной обогатительной установки на основе объемной геомеханической модели.

Методы исследования.

Сезонная обогатительная установка – комплекс наклонной сепарации (КНС) в филиале ОАО УК «Кузбассразрезуголь» «Краснобродский угольный разрез» является характерным примером описанных выше горнотехнических сооружений. Согласно данным визуальных обследований и инженерно-геологических изысканий, проведенным ООО «НООЦЕНТР», данное сооружение находится в аварийном состоянии, особенно существенные неравномерные оседания опор галерей конвейеров наблюдались в зонах разуплотненных грунтов, образование которых связано с оползневыми процессами в борту карьера.

Объект исследований представляет собой комплекс сооружений, включающих в себя здание обогатительного корпуса, галереи №3, №5 и №11, дробилку, дробильное отделение и

приемный бункер (Рис. 1). Конструктивные решения всех элементов галерей типовые и включают в себя столбчатые железобетонные фундаменты, имеющие различные типоразмеры, такие как ФМ-1, ФМ-2, ФМ-3, ФМ-4, ФМ-1* и ФМ-2* по серии 1.820.9-1 выпуска 1 «Фундаменты железобетонные столбчатые». Фундамент обогатительного корпуса представлен мелкозаглубленным плитным железобетонным фундаментом размерами 22,0×22,0 м в плане, а фундаменты опор галерей имеют размеры 4,8×1,5 м [12].

Исследуемый объект располагался на территории, занимающей один геоморфологический элемент, и характеризуется сложным рельефом, обусловленным угледобычей и имеющим полностью техногенный характер. Изначально поверхность была холмисто-увалистой, сохранившейся лишь на некоторых, не затронутых промышленной деятельностью участках. Большая часть поверхности состоит из карьерных элементов, котлованов, отвалов пустых пород и отстойников отходов промышленного производства [13].

На рассматриваемой площадке на глубине от 8 до 20 м наблюдается литологический разрез, который состоит из современных техногенных насыпных грунтов. Эти грунты представлены смесью дресвы, щебня, глыб, супесчаного и песчаного материала, которые были плотно укатаны. С глубины 1 м и ниже насыпным материалом является суглинок с дресвой и щебнем (Рис. 2).

В данном разрезе также присутствуют обломки и мелкий заполнитель, которые состоят из осадочных горных пород типа песчаника выветрелого малой прочности. Суглинок содержит локальные линзы и гнезда дресвяного грунта с суглинистым твердым и плотным заполнителем. Доля дресвы и щебня в суглинке составляет до 35–45%. Эти грунты распространены повсеместно по всей площадке и залегают на глубинах до 20 м. Согласно ГОСТ 20522-96, эти грунты классифицируются как Инженерно-геологический элемент-1 (ИГЭ-1) и относятся к группе практически непучинистых грунтов при естественной влажности.

С точки зрения гидрогеологии область исследования характеризуется наличием водоносного горизонта грунтовых вод в выветрелых и разрушенных коренных породах [14]. Этот горизонт включает пластово-трещинные воды.

В результате проведения работ на поверхности площадки в северо-восточной части были обнаружены закрытые трещины обвального либо оползневого характера, которые указывают на частичное смещение грунтовых масс в сторону незакрепленного откоса грунтовой насыпи. В котловане под приемным

Таблица. 1. Физико-механические свойства грунтов
Table. 1. Physical and mechanical properties of soils

№ ИГЭ, аномальной зоны	Природная влажность W , д.е.	Влажность на границе текучести W_L , д.е.	Влажность на уровне раскатывания W_p , д.е.	Число пластичности I_p , д.е.	Показатель текучести I_L , д.е.	Плотность частиц грунта ρ_s , г/см ³	Плотность грунта ρ , г/см ³	Плотность сухого грунта ρ_d , г/см ³	Коэффициент пористости e , д.е.	Коэффициент водонасыщения S_r , д.е.	Модуль деформации E , МПа	Угол внутреннего трения φ , град.	Сцепление C , кПа
ИГЭ-1	0,12	0,3	0,18	0,12	0,575	2,7	2,05	1,84	0,48	0,59	38	23,7	74
ИГЭ-2	-	-	-	-	-	-	1,9	-	0,7	-	17	25	25
ИГЭ-3	-	-	-	-	-	-	1,8	-	0,8	-	12,5	25	15
ИГЭ-4	-	-	-	-	-	-	1,8	-	0,8	-	45	10	40

бункером на относительной отметке $-3,15$ м ($370,1$ м) было обнаружено понижение модуля деформации E до $18,1$ МПа. В котловане под дробильным отделением на отметке $-5,00$ м ($368,2$ м) модуль деформации составил $E = 17,0$ МПа, что подтверждает наличие зон разуплотнения грунтовых масс и их развитие, вызванное частичным смещением в северо-восточном направлении. Из-за того, что части приемного бункера и галереи №11 располагаются над этими зонами разуплотнения, были проведены дополнительные работы с использованием методов геоэлектрического и радиолокационного контроля для их выявления и оконтуривания. Согласно данным геофизического зондирования, зоны разуплотненных грунтов уже возникают на глубине отметки $-2,5$ м и достигают отметки $-8,0$ м, причем эти грунты имеют самые неблагоприятные строительные свойства [12, 13].

В результате выполнения полного комплекса изыскательских работ был построен инженерно-геологический разрез (Рис. 2) с отмеченными зонами разуплотнения, а также определены физико-механические свойства элементов разреза и аномальных зон, представленные в Таблице 1 [12].

Анализ данных изысканий показал необходимость проведения мероприятий по

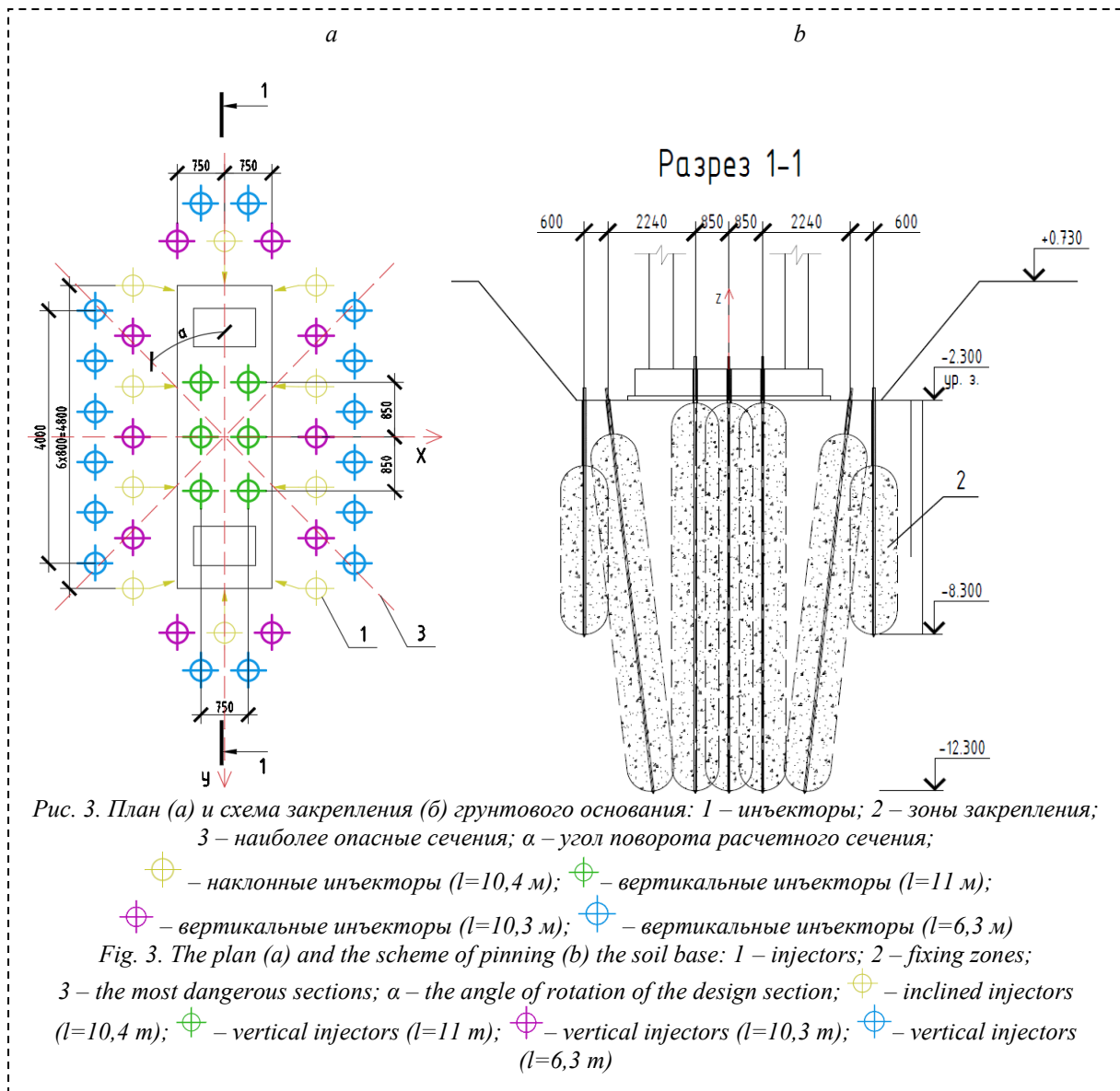
увеличению несущей способности грунтового основания в северо-восточной части путем напорной инъекции, особенно под фундаментами приемного бункера и опорами галереи №11, которые располагаются прямо над зоной разуплотненных пород [15, 16, 17].

С целью усиления устойчивости сооружения согласно базовой методике были разработаны план и схемы закрепления грунтов методом напорной инъекции, представленные на Рис. 3.

Прогнозирование напряженно-деформированного состояния грунтовых оснований сооружений проводилось путем математического моделирования с использованием метода конечных элементов и современного геотехнического программного комплекса «Plaxis 3D» [18].

Результаты.

Первый этап моделирования состоял в том, чтобы создать расчетные модели согласно выполненным геологическим изысканиям. Было смоделировано три модели основания опоры галереи: схема основания галереи в естественном основании представлена на Рис. 4 а; следующая модель представляла собой основание, находящуюся в разуплотненном состоянии (Рис. 4 б); третья модель заключалась в замене геологического слоя ИГ-2 на слой ИГ-4 (Рис. 4 с).

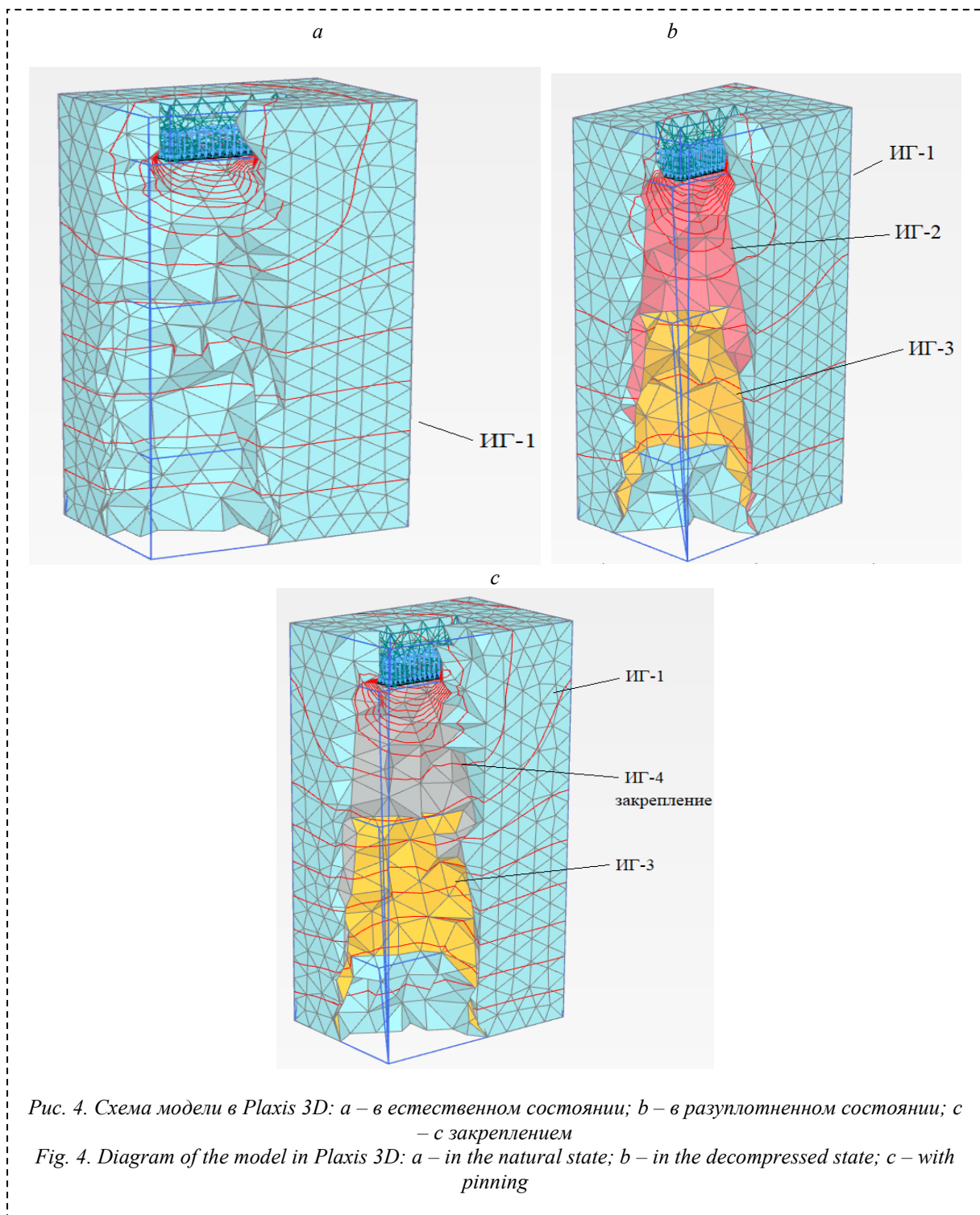


Моделирование основания осуществлялось от отметки обреза фундамента с заданием эквивалентных сил вертикального давления P . Фундаменты типа ФМ-1 представляют собой плиту шириной $b_f = 1,5$ м, длиной $l_f = 4,8$ м и высотой $h_f = 0,6$ м, выполненную из тяжелого монолитного железобетона (плотность $\rho_f = 2500$ кг/м³, модуль упругости $E_f = 30000$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,15$). Глубина заложения фундамента от наиболее низкой отметки поверхности земли составляла $d_f = 3,090$ м. В основании фундамента имеется бетонная подготовка высотой $h = 0,1$ м. Фундаменты находятся в открытых котлованах с засыпкой крупнообломочными техногенными отложениями мощностью 0,8 м.

В геологическом плане (Рис. 2) строение грунтового основания однородное, при наличии зон разуплотнения непосредственно под фундаментом типа ФМ-1 на различных глубинах. Для решения задачи разного рода зоны

разуплотнения были усреднены и разделены на две выявленные основные области. Физико-механические свойства элементов модели представлены в Таблице 1. Перепад отметок поверхности земли вдоль борта котлована составляет не более 0,15 м и в расчетах не учитывался.

На основе приведенных данных и алгоритмов, описанных в работе [18], были назначены основные параметры модели для рассматриваемого случая: ширина в продольном направлении $b_{m1} = 7,0$ м, а в поперечном – $b_{m2} = 10,0$ м; высота модели $h_m = 20,0$ м. Граничные условия в виде ограничений перемещений накладываются аналогично принятым в работах [19, 20, 21]. Распределенная нагрузка P задавалась величиной $P=1000$ кН/м², равномерной по площади опоры. Линией приложения нагрузки по высоте считается верхняя грань фундамента (обрез).



Второй этап моделирования заключался в формировании базы данных напряженно-деформированного состояния (НДС) основания галереи в естественном состоянии. Были получены поля изолиний НДС в продольном сечении yz (Рис. 5). На Рис. 5 *a, b* представлены составляющие деформации ε_z и нормальных напряжений σ_z по направлению оси z , на Рис. 5 *c, d* – соответственно составляющие ε_x и σ_x по направлению оси x и на Рис. 5 *e, f* – составляющие ε_y и σ_y по оси y .

Из рисунков следует, что напряжения и деформации распределяются практически симметрично с наличием существенных искажений на границах опорной зоны. Зона концентрации напряжений σ_z , σ_x и σ_y приурочена к области под фундаментом. Максимальные деформации ε_z и ε_x сосредоточены на выступах фундамента (Рис. 5 *a, e*), а ε_y (Рис. 5 *c*), сохраняются в области под фундаментом.

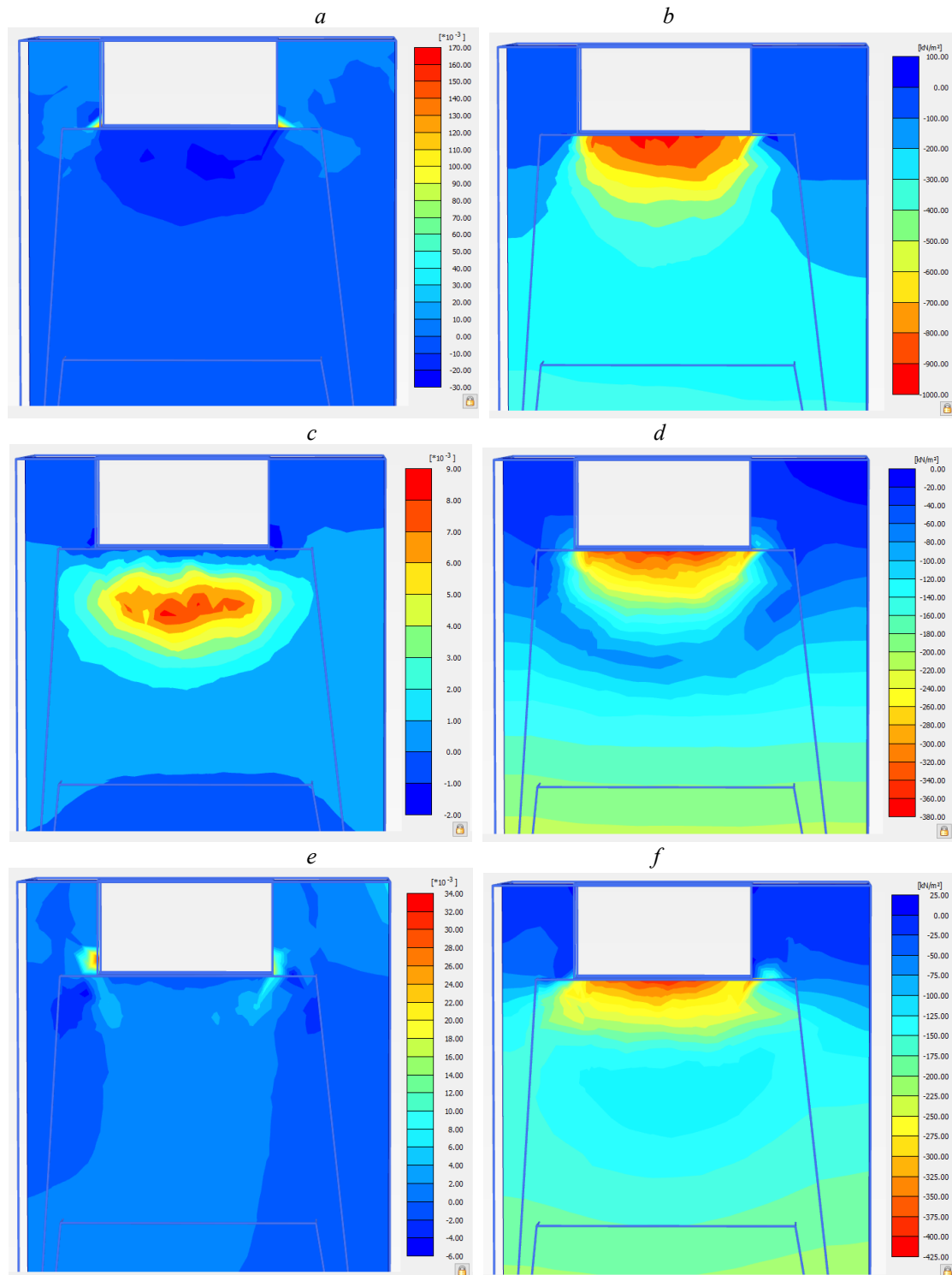


Рис. 5. Распределение нормальных напряжений σ и деформаций ϵ в естественном грунтовом массиве в продольном сечении: a, b – деформации ϵ_z и напряжения σ_z по направлению z; c, d – деформации ϵ_x и напряжения σ_x по направлению x;

e, f – деформации ϵ_y и напряжения σ_y по направлению y

Fig. 5. Distribution of normal voltages σ and deformations ϵ in a natural soil mass the longitudinal section: a, b – deformations ϵ_z and voltages σ_z in the z direction; c, d – deformations ϵ_x and voltages σ_x in the x direction; e, f – deformations ϵ_y and voltages σ_y in the y direction

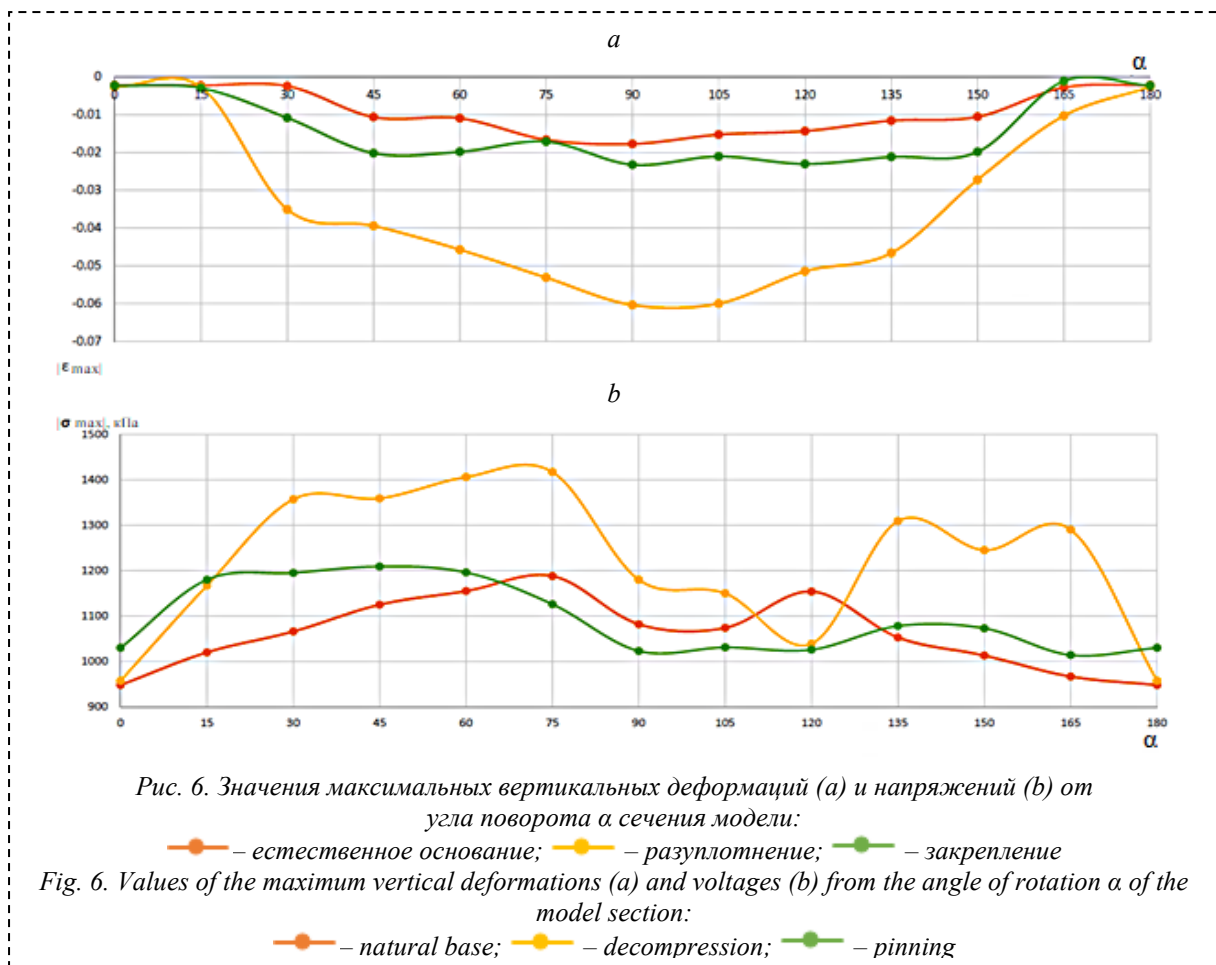


Рис. 6. Значения максимальных вертикальных деформаций (а) и напряжений (б) от угла поворота α сечения модели:

— естественное основание; — разуплотнение; — закрепление

Fig. 6. Values of the maximum vertical deformations (a) and voltages (b) from the angle of rotation α of the model section:

— natural base; — decompression; — pinning

Третий этап состоял в том, чтобы определить наиболее опасные сечения объемной модели с максимальными значениями деформаций и напряжений (Рис. 6). За основу были взяты горизонтальные деформации ϵ_y и вертикальные напряжения σ_z , в большей степени характеризующие геодинамические процессы в опорной зоне основания.

Анализируя полученные графики (Рис. 6 а, б) было решено провести расчетные сечения под углами $\alpha = 0$ (180), 75, 90 и 135, соответствующими наибольшим значениям модулей ϵ_{max} и σ_{max} , что позволит более точно определить опасные зоны основания.

В результате третьего этапа моделирования были построены сечения опор под углом $\alpha = 0$ (180), 75, 90 и 135 градусов в виде полей изолиний напряженно-деформированного состояния грунтового массива опор (Рис. 7, 8, 9).

Сопоставление полей изолиний ϵ_y и σ_z на Рис. 7-9 позволило установить следующие качественные результаты геомеханических процессов и перераспределения НДС основания на стадиях «естественное основание – разуплотнение – закрепление».

1. При $\alpha = 75^\circ$ и 90° перераспределение напряжений σ_z происходит преимущественно в правой опорной части массива из-за асимметрии

деформационных свойств грунтов при формировании зон разуплотнения.

2. При $\alpha = 0^\circ$ (180°) и 135° распределение напряжений происходит несимметрично с наличием существенных искажений на границах этих зон. Зона концентрации напряжений σ_z сохраняется в области под фундаментом без значительных смещений, описанных в работе [12], закрепление зоны разуплотнения №1 значительно снижает уровень напряжений и площадь области их концентрации.

3. Деформации ϵ_y в массиве распределяются неравномерно, преимущественно в границах зон разуплотнения. Влияние зон закрепления прослеживается в виде перераспределения деформаций из зон разуплотнения №1 и №2, возвращая грунтовое основание к исходному естественному состоянию и значительно снижая величину вертикальных оседаний.

4. Горизонтальные деформации ϵ_y при $\alpha = 0^\circ$ (180°) распределены с нарушением симметрии и концентрируются под фундаментами, а при $\alpha = 75^\circ$, 90° и 135° максимальные деформации находятся в зонах выпучивания фундамента.

Полученные результаты подтверждают выводы о сложных геомеханических процессах формирования НДС породных и грунтовых массивов неоднородного строения, приведенных в работах [22-25].

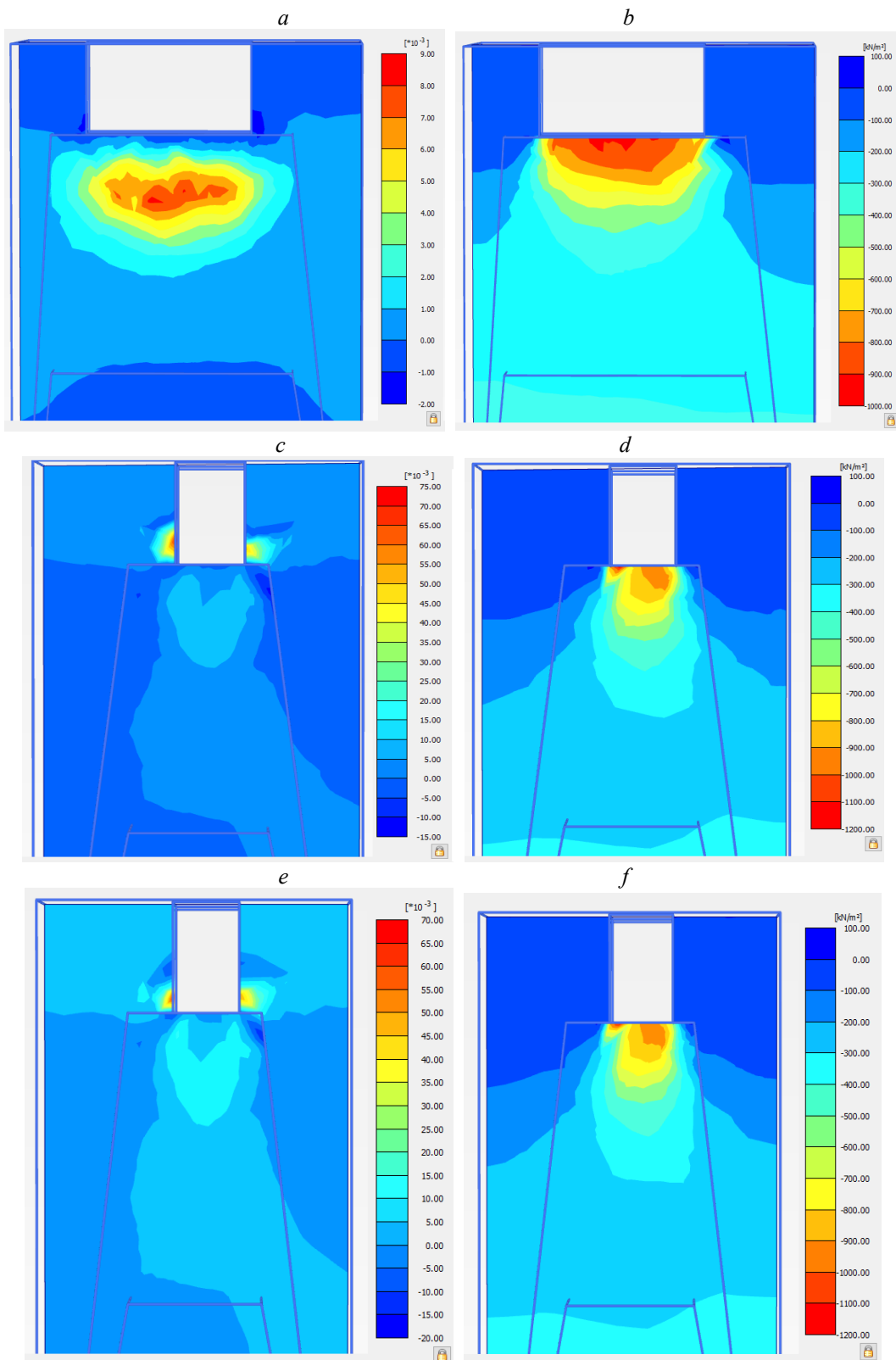


Рис. 7. Распределение деформаций и напряжений в естественном грунтовом массиве:
 a, b – под углом $\alpha = 0$ (180°); c, d – $\alpha = 75^\circ$; e, f – $\alpha = 90^\circ$; g, h – $\alpha = 135^\circ$

Fig. 7. Distribution of deformations and voltages in a natural soil massif:
 a, b – at an angle of $\alpha = 0$ (180°); c, d – $\alpha = 75^\circ$; e, f – $\alpha = 90^\circ$; g, h – $\alpha = 135^\circ$

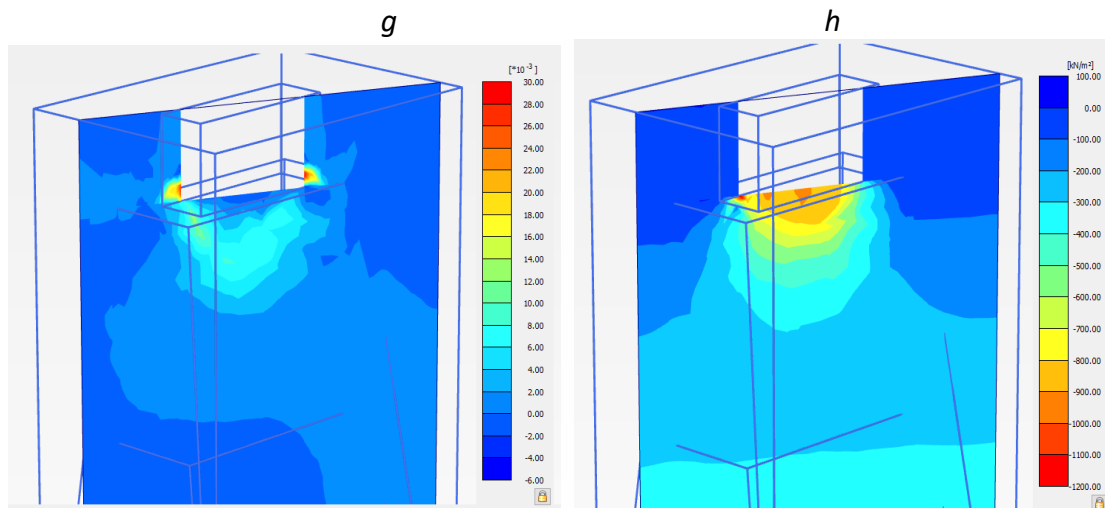


Рис. 7. Продолжение
Fig. 7. Continuation

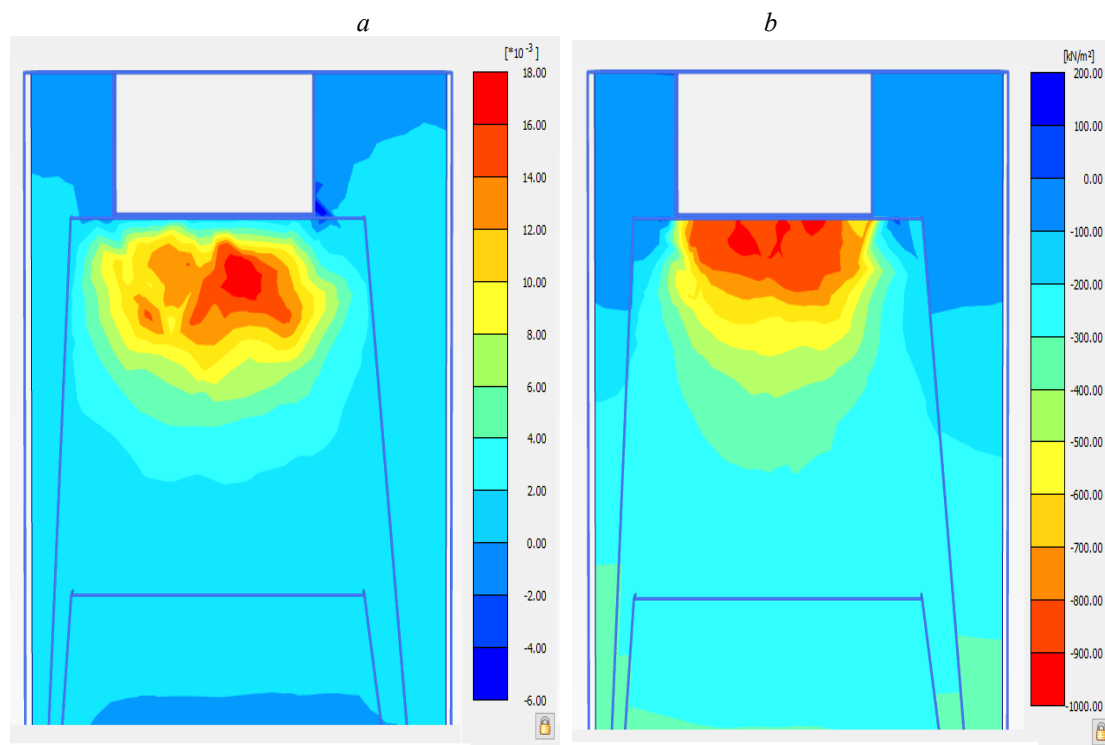


Рис. 8. Распределение деформаций и напряжений в разуплотненном грунтовом массиве: a, b – под углом $\alpha = 0$ (180°); c, d – $\alpha = 75^\circ$; e, f – $\alpha = 90^\circ$; g, h – $\alpha = 135^\circ$
Fig. 8. Distribution of deformations and voltages in decompressed soil massif: a, b – at an angle of $\alpha = 0$ (180°); c, d – $\alpha = 75^\circ$; e, f – $\alpha = 90^\circ$; g, h – $\alpha = 135^\circ$

Используя банк данных НДС грунтового основания в естественном (в момент t_0), разуплотненном (t_1) и закрепленном (t_2) состояниях, целесообразно рассчитать интегральные показатели, позволяющие количественно оценить устойчивость грунтового основания сооружения. Интегральные показатели для плоского поля изолиний

напряжений σ и деформаций ε вычисляются по формулам:

$$I\sigma = \frac{\sum \sigma_i S_i}{\sum S_i}; I\varepsilon = \frac{\sum \varepsilon_i S_i}{\sum S_i},$$

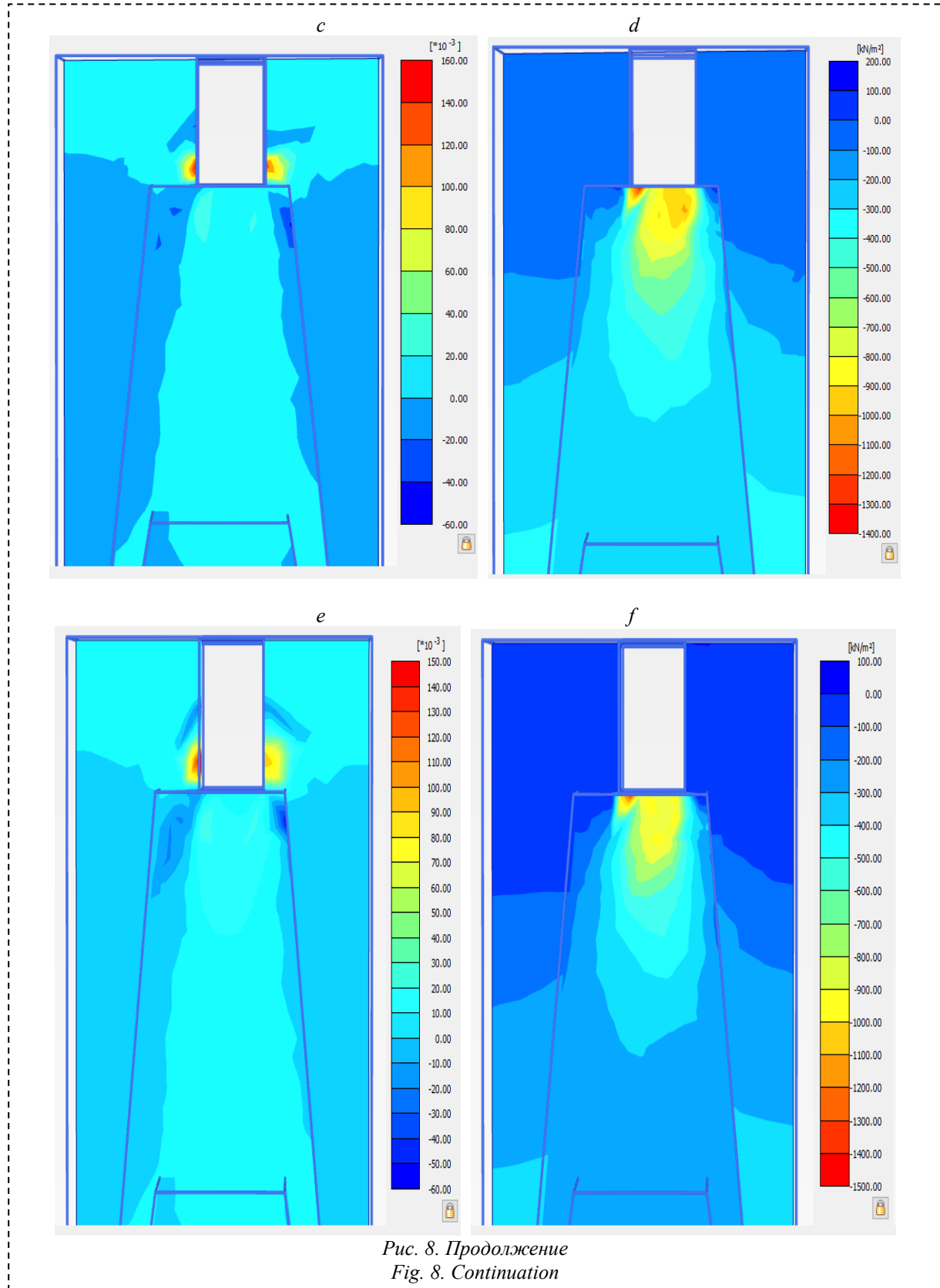
где S_i – площадь поля, ограниченная изолинией σ_i или ε_i .

Расчет интегральных показателей следует проводить в пределах опорной зоны, которая

имеет форму трапеции, верхнее основание которой равно ширине фундамента, боковые стороны наклонены к вертикали под углом, равным углу внутреннего трения φ , а высоту принимают равной глубине изменяемой толщи ($h_m = 6,0$ м).

Результаты расчетов интегральных показателей $I\sigma$ и $I\varepsilon$ для моментов $t_0 - t_2$ и сечений с разными углами поворота α представлены в Таблице 2.

В графическом виде конечные результаты Таблицы 2 представлены на Рис. 10.



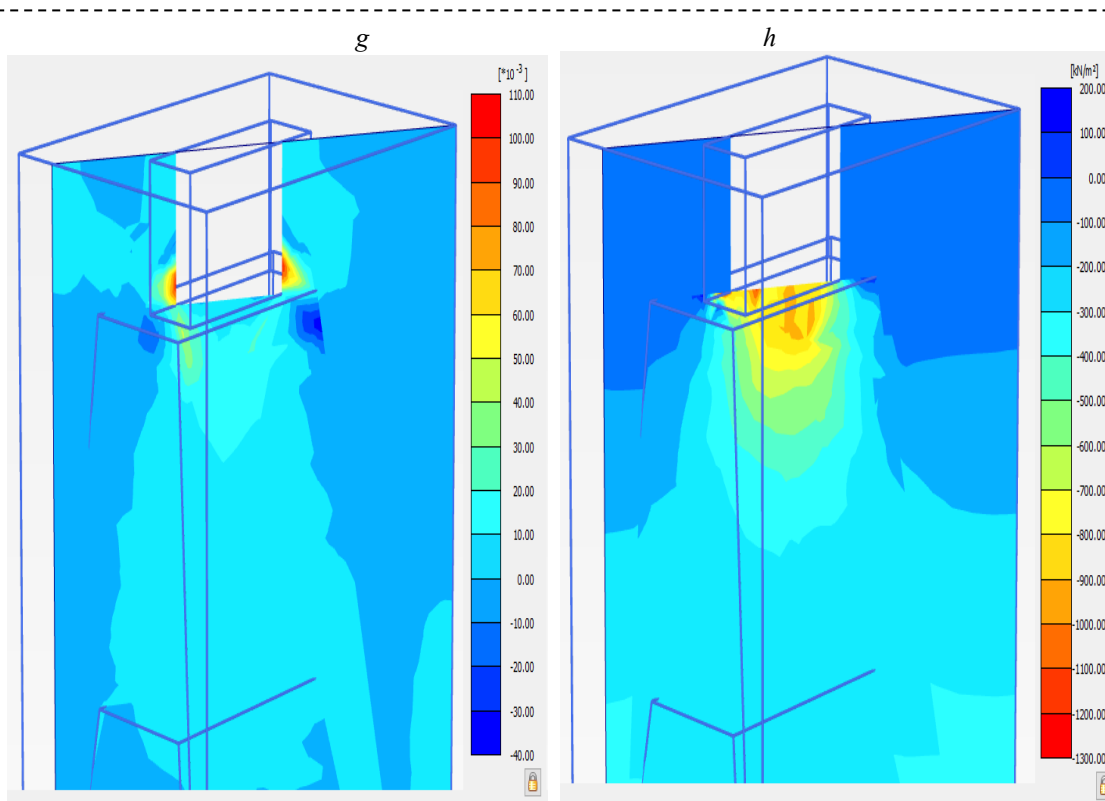


Рис. 8. Продолжение
Fig. 8. Continuation

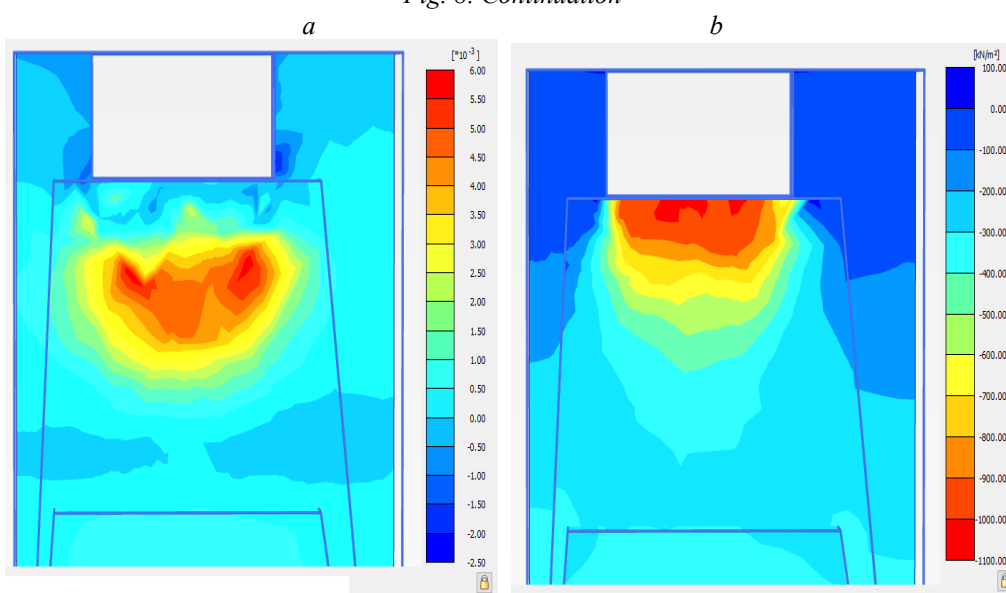


Рис. 9. Распределение деформаций и напряжений в закрепленном грунтовом массиве:
a, b – под углом $\alpha = 0$ (180°); c, d – $\alpha = 75^\circ$; e, f – $\alpha = 90^\circ$; g, h – $\alpha = 135^\circ$
Fig. 9. Distribution of deformations and voltages in a pinning soil mass:
a, b – at an angle of $\alpha = 0$ (180°); c, d – $\alpha = 75^\circ$; e, f – $\alpha = 90^\circ$; g, h – $\alpha = 135^\circ$

Из результатов расчетов следует, что графики интегральных показателей I_σ , I_ϵ и Δ_I следующим образом отражают геомеханические процессы в укрепляемом и разуплотненном грунтовом основании: при формировании зоны разуплотнения нормальные вертикальные

напряжения σ_z в пределах опорной зоны снижаются, а горизонтальные деформации ϵ_x возрастают, при закреплении (упрочнении) оба интегральных параметра восстанавливаются до значений, соответствующих естественному основанию.

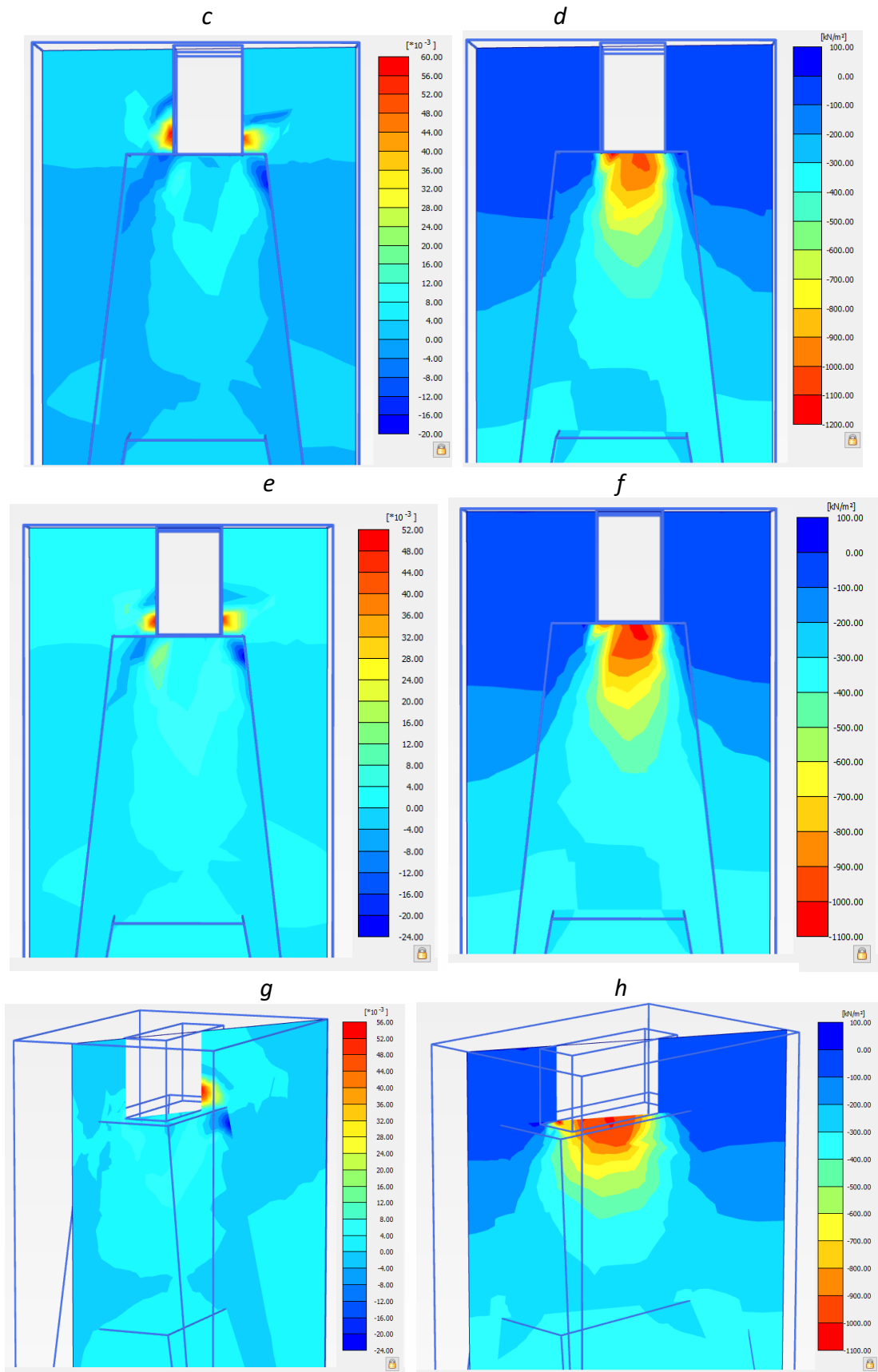


Рис. 9. Продолжение
Fig. 9. Continuation

Таблица. 2. Значения интегральных показателей
Table. 2. 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
$\alpha = 0^\circ (180^\circ)$ (рис. 6, 7, 8 (a, b))	t_0	20254,532	344,210	-372,177	58,842	-6,325
	t_1	19135,55	325,202	-934,74		-15,885
	t_2	22051,16	374,752	-165,716		-2,816
$\alpha = 75^\circ$ (рис. 6, 7, 8 (c, d))	t_0	14531,345	442,193	-141,491	32,862	-4,3
	t_1	13859,036	421,734	-599		-18,228
	t_2	15120,366	460,117	-244,217		-7,432
$\alpha = 90^\circ$ (рис. 6, 7, 8 (e, f))	t_0	34195,58	751,634	-261,455	45,495	-5,747
	t_1	30224,11	664,34	-451,284		-9,92
	t_2	34819,414	765,346	-185,248		-4,072
$\alpha = 135^\circ$ (рис. 6, 7, 8 (g, h))	t_0	24754,556	413,956	-180,082	59,8	-3,011
	t_1	23928,058	400,135	-2356,59		-39,408
	t_2	25372,3	424,286	-835,48		-13,971

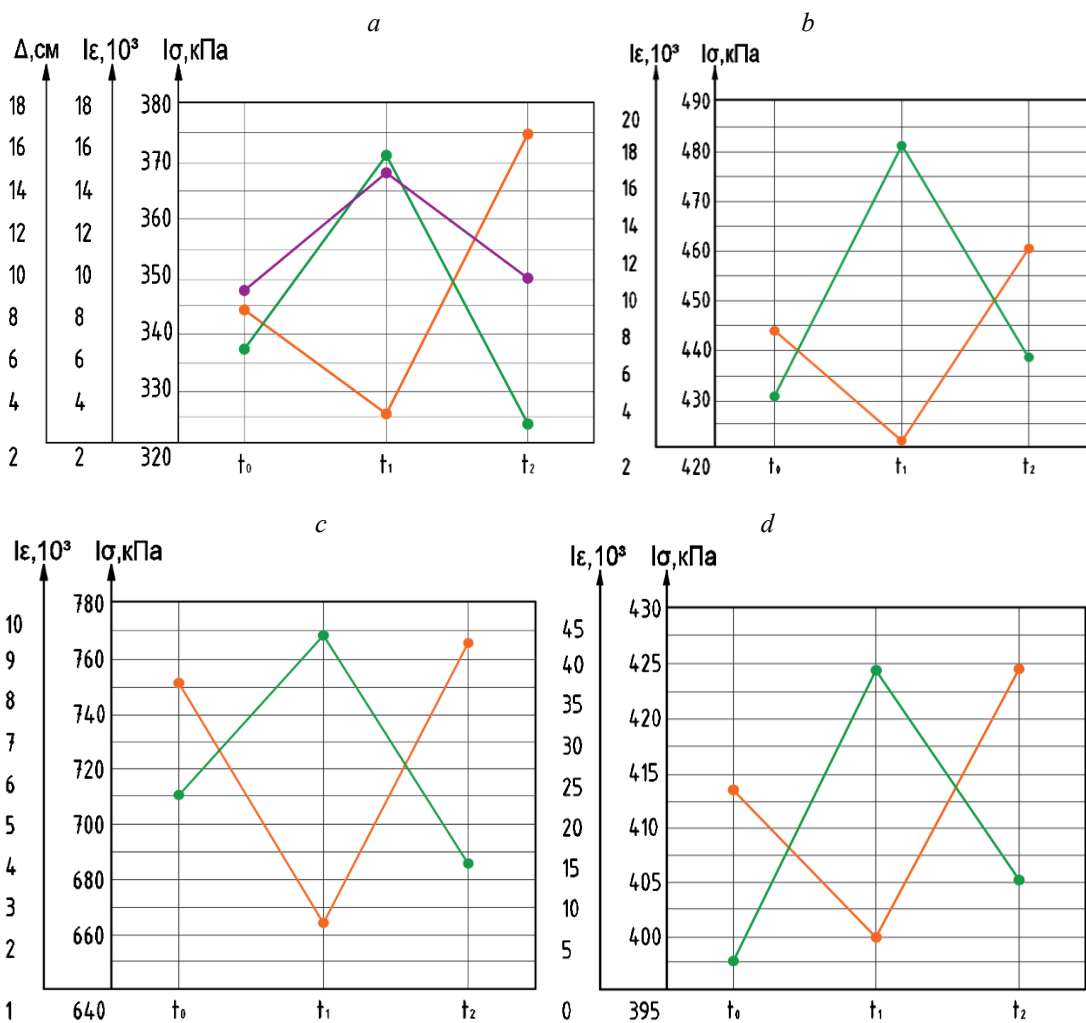


Рис. 10. Изменение интегральных показателей напряжений $I\sigma$ и деформаций $I\varepsilon$, осадки фундамента Δ на стадиях «естественное основание – разуплотнение – закрепление»: а – под углом $\alpha = 0^\circ (180^\circ)$; б – $\alpha = 75^\circ$; в – $\alpha = 90^\circ$; д – $\alpha = 135^\circ$; t_0 – естественное основание; t_1 – разуплотнение; t_2 – закрепление; \bullet – осадка Δ ; \bullet – напряжения $I\sigma$; \bullet – деформации $I\varepsilon$

Fig. 10. Changes in the integral indices of voltages $I\sigma$ and deformations $I\varepsilon$, precipitation of the foundation Δ at the stages of "natural base – decompression – pinning": а – at an angle of $\alpha = 0^\circ (180^\circ)$; б – $\alpha = 75^\circ$; в – $\alpha = 90^\circ$; д – $\alpha = 135^\circ$; t_0 – natural base; t_1 – decompression; t_2 – pinning; \bullet – precipitation Δ ; \bullet – voltages $I\sigma$; \bullet – deformations $I\varepsilon$

Кроме того, из данных Таблицы 2 следует, что в наименьшей степени опорная зона воспринимает нагрузку от фундамента в зоне $\alpha = 135\text{--}180^\circ$ ($I\sigma_{12} = 374\text{--}424$ кПа), кроме того, при $\alpha = 135^\circ$ остаточные деформации наибольшие ($|I\varepsilon_{12}| = 13,9 \cdot 10^{-3}$). В этом секторе основания целесообразно провести дополнительное уплотнение через инъекторы.

Основное преимущество объемного геомеханического моделирования заключается в возможности определения наиболее опасного сечения (сектора) основания, нуждающегося в дополнительном укреплении, что недоступно при плоских моделях.

Для приближенной количественной оценки повышения точности геомеханического прогноза можно воспользоваться результатами расчета, приведенными на Рис. 6.

Определим показатель повышения точности расчета:

- для напряжений

$$\delta_\sigma = \left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{cp}} - 1 \right) \times 100\% = 16,34\%;$$

- для деформаций

$$\delta_\varepsilon = \left(\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_{cp}} - 1 \right) \times 100\% = 78,04\%,$$

где σ_{max} , ε_{max} – максимальные (по модулю) значения σ и ε на рис. 6; σ_{cp} , ε_{cp} – средние значения σ и ε для естественного состояния основания.

Для достижения максимального эффекта на рассматриваемом объекте были установлены дополнительные инъекторы в зонах наиболее опасных сечений закрепляемого участка массива при неравномерной нагрузке. Дополнительные зоны уплотнения были заглублены в грунт до границы зоны разуплотнения № 2 (см. Рис. 3). Такое изменение схемы закрепления грунтов основания позволяет перераспределить вертикальные и горизонтальные деформации в более прочный грунтовый массив, а также снизить осадки фундамента, его наклон и поперечные деформации самих зон закрепления.

Выводы.

1. Результаты компьютерного моделирования показали, что методы напорной инъекции слабых грунтов могут эффективно использоваться для управления свойствами грунта и стабильностью сооружений. В результате компьютерного моделирования и анализа его результатов было доказано эффективность применения методов напорной инъекции для управления свойствами слабых грунтов и устойчивостью сооружений. Методы математического и компьютерного моделирования позволили с достаточной детальностью спрогнозировать полученный эффект от закрепления и выявить наиболее проблемные области грунтового массива.

2. По сравнению с двухмерными моделями, трехмерная дает возможность проверить любое

плоское расчетное сечение 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 6–15%, интегральные значения деформаций уменьшаются на 59–82%. При этом установлен сектор $\alpha = 135\text{--}180^\circ$, в наименьшей степени воспринимающий нагрузку с наибольшими остаточными деформациями, требующий дополнительного укрепления.

Список литературы

- Ибрагимов М. И. Закрепление грунтов инъекцией цементных растворов. Москва : Изд-во АСВ, 2012. 256 с.
- 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. 5–86.
- Страданченко С. Г., Молев М. Д., Прокопов А. Ю. Натурное исследование и обоснование параметров нагнетания раствора при цементации грунтов основания здания Гимназии №45 в г. Ростове-на-Дону // Инженерный вестник Дона. 2023. №7. С. 1–14.
- 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.
- Кахаров З. В., Мирханова М. М. Методы искусственного закрепления грунта оснований зданий и сооружений // Вестник науки. 2022. №11 (56). С. 336–340.
- Жур В. Н., Лахно Д. И. Контроль качества работ по закреплению грунтовых массивов методом цементации // Инженерный вестник Дона. 2021. №12. С. 1–12.
- Братан Ф. И., Данилова Е. А., Хотулева Е. И., Окольников Г. Э. Современные методы усиления оснований // Системные технологии. 2020. № 37. С. 20–24.
- Леонова Д. А. Совершенствование технологии тампонажа закрепных пустот // Инженерный вестник Дона. 2023. №3. С. 1–14.
- Баженова О. Ю., Алексеев В. А. Определение соответствия пригодности смесей на основе микроцементов в технологии цементации по методу инъекционной пропитки // Инновации и инвестиции. 2022. №12. С. 152–155.
- Богомолова О. А., Богомолов А. Н., Богомолов С. А. Способ определения прочностных свойств закрепленного грунта основания шахты // Construction and Geotechnics. 2022. №3 (13). С. 40–49.
- Dolzhikov P., Prokopov A., Prokopova M., Hamidullina N. Investigations of the regularity of the formation of a dip over the mine // MATEC Web of Conferences. 2018. №196. 3008.
- Соколов М. В., Простов С. М., Покатилов А. В. Геомеханическое обоснование параметров инъекционного закрепления насыпного грунтового основания комплекса наклонной сепарации // Вестник КузГТУ. 2017. № 2. С. 5–19.
- Никулин Н. Ю., Простов С. М., Герасимов О. В. Комплексный геолого-геофизический мониторинг состояния и свойств грунтового основания горнотехнических сооружений // Вестник КузГТУ. 2012. №3. С. 3–8.
- Преснов О. М., Бондарев А. П., Новожилов В. В.,

Шалахов И. И. Техничко-экономическая целесообразность применения технологии закрепления обводненных мелкозернистых грунтов пльвунного типа // Экономика строительства. №1. 2023. С. 138–140.

15. 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. №1 (97). 4001.

16. 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. 2023. №371. 2011.

17. Прокопов А. Ю., Должиков П. Н., Талалаева В. М., Легостаев С. О. Результаты изысканий и закрепление гидроактивизированных просадочных грунтов под аварийным зданием школы // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2023. №2. С. 273–282.

18. Власов М. А., Простов С. М., Соколов М.В. Выбор рациональных параметров геомеханической модели грунтового основания сооружений в ПК Plaxis 3D // Вестник КузГТУ. 2023. № 5. С. 4–12.

19. Tsvetkov A. B., Pavlova L. D., Fryanov V. N. Numerical simulation of geomechanical state of coal massif in the vicinity of underground workings in the superimposed seams // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. №84. Pp. 1–6.

20. Друзь Р. А., Корытов А. С., Протасова А. В., Жгилев А. П. Анализ результатов геомеханического моделирования сдвижения поверхности угольного разреза // Известия ТулГУ. Науки о земле. 2023. №3. С. 415–425.

21. 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.

22. Prokopov A., Prokopova M., Rubtsova Y. The experience of strengthening subsidence of the soil under the existing building in the city of Rostov-on-Don // MATEC Web of Conferences. 2017. №106. 2001.

23. Барышников В. Д., Барышников Д. В. Контроль сдвижений и деформаций породного массива в окрестности горных выработок // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2023. №3. С. 394–403.

24. Кулибаба С. Б., Федоров Е. В. Перераспределение максимальных вертикальных деформаций горного массива в процессе его подработки // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2022. №1. С. 303–316.

25. Ильясов Б. Т. Прогнозирование деформаций массивов горных пород с применением ПК «PROROCK» // Проблемы недропользования. 2018. №1. С. 39–51.

© 2024 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

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, оформление теста и графической информации, сбор и анализ данных.

Простов Сергей Михайлович – научный менеджмент, анализ данных, разработка алгоритма, выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

FORECAST OF STABILITY OF THE SOIL BASE OF A QUARRY CONCENTRATOR BASED ON VOLUMETRIC GEOMECHANICAL MODE

Maksim A. Vlasov, Sergey M. Prostov

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

*for correspondence: maxsdss@mail.ru



Article info

Abstract.

The emergency section of the coal mine concentrator is considered. According to the results of engineering and geological surveys and geophysical studies, it was found that the main cause of dangerous deformations of the foundations of structures is the formation of zones of

Received:
13 April 2024

Accepted for publication:
25 July 2024

Accepted:
29 August 2024

Published:
26 September 2024

Keywords: mining facilities, forecast, precipitation, computer modeling, voltages, deformations, soil consolidation, integral indicator, accuracy of the calculation

weakened foundation soils due to a landslide of an embankment array of one of the supports. Based on the constructed engineering and geological section and the physico-mechanical properties of soils, three model schemes were constructed, including a forecast of deformations and stresses in a natural soil base, decompressed and decompressed with a fixed state of the soil base. Calculated sections were carried out every 15 degrees relative to the center of the support, based on this, the most dangerous sections were determined, especially the characteristic sections (0, 75, 90, 135) with stress and strain distribution for all three models of the soil base. For a more accurate prediction of the stress-strain state, integral indicators were determined for each angle of rotation of the cross section for all three models of the soil base, with a natural soil base, decompressed and decompressed with a fixed state of the soil base. A plan and layout of the injectors was developed, which included the lengths of the injectors, the pitch and the length of the perforated part. Based on all the data, it was found out that the values of precipitation, as well as the values of stresses, that with a natural soil foundation, that with decompression with fixation, were identical, and the values of deformations decreased in comparison with decompressed soil. An assessment was made of the increase in the accuracy of calculating maximum voltages and strains, which amounted to 16.34% and 78.04%, respectively.

For citation: Vlasov M.A., Prostov S.M. Forecast of stability of the soil base of a quarry concentrator based on volumetric geomechanical mode. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 4(164):5-22. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-5-22, EDN: ZZIYZK

REFERENCES

1. Ibragimov M.I. Zakreplenie gruntov inekciej cementnyh rastvorov [Fixing of soils by injection of cement mortars]. Moscow: Publishing of the IASV; 2012. 256 p.
2. 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):75–86.
3. Stradanchenko C.G., Molev M.D., Prokopov A.Ju. Naturnoe issledovanie i obosnova-nie parametrov nagnetanija rastvora pri cementacii gruntov osnovanija zdaniya Gimnazii №45 v g. Rostove-na-Donu [Full-scale study and justification of the parameters of injection of mortar during cementation of the ground base of the Gymnasium building No. 45 in Rostov-on-Don]. *Inzhenernyj vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]*. 2023; 7:1–14.
4. 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.
5. Kaharov Z.V., Mirhanova M.M. Metody iskusstvennogo zakrepleniya grunta osnovanij zdaniy i sooruzhenij [Methods of artificial fixation of the ground base of buildings and structures]. *Vestnik nauki [Bulletin of Science]*. 2022; 56(11):336–340.
6. Zhur V.N., Lahno D.I. Kontrol' kachestva rabot po zakrepleniyu 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.
7. Bratan F.I., Danilova E.A., Hotuleva E.I., Okol'nikova G.Je. Sovremennye metody usileniya osnovanij [Modern methods of strengthening the bases]. *Sistemnye tehnologii [System technologies]*. 2020; 37:20–24.
8. Leonova D.A. Sovershenstvovanie tehnologii tamponazha zakreplenyh pustot [Improving the technology of tamponage of fixed voids]. *Inzhenernyj vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]*. 2023; 3:1–14.
9. Bazhenova O.Ju., Alekseev V.A. Opredelenie sootvetstvija prigodnosti smesej na osnove mikro cementov v tehnologii cementacii po metodu inekcionnoj propitki [Determination of the suitability of mixtures based on micro-cements in the technology of cementation by the method of injection impregnation]. *Innovacii i investicii [Innovation and investment]*. 2022; 12:152–155.
10. Bogomolova O.A., Bogomolov A.N., Bogomolov S.A. Sposob opredelenija prochnostnyh svojstv zakreplennogo grunta osnovanija shahty [Method for determining the strength properties of the fixed soil of the mine base]. *Construction and Geotechnics*. 2022; 13(3):40–49.
11. Dolzhikov P., Prokopov A., Prokopova M., Hamidullina N. Investigations of the regularity of the formation of a dip over the mine. *MATEC Web of Conferences* 2018; 196:3008.
12. Sokolov M.V., Prostov S. M., Pokatilov A. V. Geomechanicheskoe obosnovanie para-metrov inekcionnogo zakrepleniya nasypnogo gruntovogo osnovanija kompleksa naklonnoj separacii [Geomechanical substantiation of the parameters of injection fixation of the bulk soil base of the inclined separation complex]. *Vestnik KuzGTU [Bulletin of KuzSTU]*. 2017; 2:5–19.
13. Nikulin N.Ju., Prostov S.M., Gerasimov O.V. Kompleksnyj geologo-geofizicheskij monitoring sostojanija i svojstv gruntovogo osnovanija gornotekhnicheskij sooruzhenij [Comprehensive geological and geophysical monitoring of the condition and properties of the soil base of mining facilities]. *Vestnik KuzGTU [Bulletin of KuzSTU]*. 2012; 3:3–8.
14. Presnov O.M., Bondarev A.P., Novozhilov V.V., Shalahov I.I. Tehniko-jekonomicheskaja celesoobraznost' primeneniya tehnologii zakrepleniya obvodnennyh melkozemistyh gruntov plyvunnogo tipa [Technical and economic feasibility of using the technology of fixing watered fine-grained quicksand type soils]. *Jekonomika stroitel'stva [The economics of construction]*. 2023; 1:138–140.
15. 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; 97(1):4001.

16. 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*. 2023; 371:2011.

17. Prokopov A.Ju., Dolzhikov P.N., Talalaeva V.M., Legostaev S.O. Rezultaty izyskanij i zakreplenie gidroaktivizirovannyh prosadochnyh gruntov pod avarijnym zdaniem shkoly [The results of the surveys and the consolidation of hydro activated subsidence soils under the emergency school building]. *Izvestija TulGU. Nauki o Zemle [News of TulSU. Earth Sciences]*. 2023; 2:273–282.

18. Vlasov M.A., Prostov S.M., Sokolov M.V. Vybor racional'nyh parametrov geomehanicheskoy modeli gruntovogo osnovanija sooruzhenij v PK Plaxis 3D [Selection of rational parameters of the geomechanical model of the soil foundation of the structure in the PC Plaxis 3D]. *Vestnik KuzGTU [Bulletin of KuzSTU]*. 2023; 5:4–12.

19. Tsvetkov A.B., Pavlova L.D., Fryanov V.N. Numerical simulation of geomechanical state of coal massif in the vicinity of underground workings in the superimposed seams. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017; 84:1–6.

20. Druz' R.A., Korytov A.S., Protasova A.V., Zhgilev A.P. Analiz rezultatov geomehanicheskogo modelirovanija sdvizenija poverhnosti ugol'nogo razreza [Analysis of the results of geomechanical modeling of the displacement of the surface of a coal cut]. *Izvestija TulGU. Nauki o Zemle [News of TulSU. Earth Sciences]*. 2023; 3:415–425.

21. Nikitina A.M., Borzyh D.M., Rib S.V., Petrova O.A. Sopostavlenie rezultatov matematicheskogo modelirovanija geomehanicheskikh 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]. *Izvestija TulGU. Nauki o Zemle [News of TulSU. Earth Sciences]*. 2022; 2:452–466.

22. Prokopov A., Prokopova M., Rubtsova Y. The experience of strengthening subsidence of the soil under the existing building in the city of Rostov-on-Don. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 106:2001.

23. Baryshnikov V.D., Baryshnikov D.V. Kontrol' sdvizenij i deformatsij porodnogo massiva v okrestnosti gornyh vyrabotok [Control of displacements and deformations of rock mass in the vicinity of mine workings]. *Izvestija TulGU. Nauki o Zemle [News of TulSU. Earth Sciences]*. 2023; 3: 394–403.

24. Kulibaba S.B., Fedorov E.V. Pereraspredelenie maksimal'nyh vertikal'nyh deformatsij gornogo massiva v processe ego podrabotki [Redistribution of the maximum vertical deformations of the mountain range in the process of its mining]. *Izvestija TulGU. Nauki o Zemle [News of TulSU. Earth Sciences]*. 2022; 1:303–316.

25. Il'jasov B.T. Prognozirovanie deformatsij massivov gornyh porod s primeneniem PK «PROROCK» [Prognostication of rock mass deformations with using «PROROCK » software]. *Problemy nedropol'zovanija [Problems of subsurface use]*. 2018; 1:39–51.

© 2024 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

Sergey M. Prostov, Dr. Sc. in Engineering, 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 – review of the literature on the research topic, design of text and graphic information, data collection and analysis

Sergey M. Prostov – scientific management, data analysis, algorithm development, conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.

