

**ГЕОФИЗИКА
GEOPHYSICS**

Научная статья

УДК 624.131.7

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-3-4-14

**ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НДС
ГРУНТОВОГО УКРЕПЛЕНИЯ ОСНОВАНИЯ СООРУЖЕНИЯ В ОБЪЕМНОЙ
ПОСТАНОВКЕ****Простов Сергей Михайлович, Власов Максим Алексеевич**

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

*для корреспонденции: maxsdss@mail.ru

**Информация о статье**

Поступила:

08 апреля 2024 г.

Одобрена после
рецензирования:

29 мая 2024 г.

Принята к публикации:

29 мая 2024 г.

Опубликована:

28 июня 2024 г.

Ключевые слова:

горнотехнические
сооружения, компьютерное
моделирование, напряжения,
деформации, интегральный
показатель, закрепление
грунтов, функциональная
схема, объемное
геомеханическое
моделирование

Аннотация.

Приведен анализ результатов компьютерного геомеханического моделирования при решении задач подземной, открытой и строительной геотехнологии. Обоснована перспективность перехода на объемные цифровые модели. Выявлены особенности постановки задач геомеханики грунтовых оснований сооружений. Целью работы является разработка методики объемного моделирования напряженно-деформированного состояния оснований технических сооружений, обеспечивающей повышение точности прогноза, в том числе при использовании технологий управления свойствами грунтов. Геомеханическое моделирование грунтовых оснований базируется на методе конечных элементов (МКЭ). С помощью МКЭ можно моделировать большинство геомеханических процессов, которые происходят в грунтах, и сравнивать различные критерии предельных состояний. После обработки полученные данные могут быть представлены в численном или графическом виде. Расчеты с применением МКЭ могут учитывать как линейные, так и нелинейные формы деформаций, решать задачи неоднородной деформации среды с линейно-упругой связью напряжений и деформаций, а также моделировать пластические деформации и переход к нелинейным задачам. На основе этого было проанализировано несколько объектов горных предприятий. Суть МКЭ заключается в приближенном вычислении системы простейших уравнений для ограниченных областей с целью определения искомых величин. В современной практике строительной геотехнологии МКЭ твердо закрепился как основной инструмент для расчета строительных конструкций. На основе этого разработана функциональная схема объемного геомеханического моделирования, включающая 6 этапов: подготовительный период; подготовка априорной информации; формирование базовой модели; численное моделирование; обработка результатов расчетов; практические рекомендации. Основная новизна предложенной методики состоит в выявлении наиболее опасного сечения в объеме грунтового основания, что позволяет принципиально повысить точность геомеханического прогноза.

Для цитирования: Простов С.М., Власов М.А. Особенности методики численного моделирования НДС грунтового укрепления основания сооружения в объемной постановке // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 3 (163). С. 4-14. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-3-4-14, EDN: ADODAU

Введение.

Для решения геомеханических задач применяют методы классической механики сплошной среды и численного компьютерного моделирования.

Проведение аналитических геомеханических расчетов ограничено использованием упрощенных моделей грунтовых оснований. Такие модели не могут точно учесть структурно-текстурную неоднородность, которая может быть обнаружена с помощью геофизического мониторинга [1]. Подобные расчеты применяют при оценке геомеханического влияния на устойчивость сопряжений выработок и тектонических нарушений [2, 3].

Для достижения достаточной точности в расчетах напряжений и деформаций в неоднородных массивах необходимо использование математических моделей, которые могут быть реализованы в программных продуктах. Оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) горных пород на угольных шахтах является важной задачей, которая решается с использованием различных методов и средств горной геомеханики. Ниже рассмотрены основные аспекты исследований в данном направлении.

Актуальной представляется научно-практическая задача оценки соответствия результатов численного моделирования, геофизического прогноза и натурных измерений параметров состояния горных пород. Для решения этой задачи были рассмотрены изменения параметров НДС при отработке мощного пологого пласта камерно-столбовой и камерной системами разработки. В качестве объекта исследования приняты геомеханические процессы при отработке мощного пологого пласта III в условиях шахты ЗАО «Распадская-Коксовая» (Кузбасс) [4].

В работе [5] рассмотрены результаты численного исследования методом конечных элементов НДС горных пород в окрестности горной выработки Кызылалмасайского месторождения. Было проведено сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными, полученными в двух горных выработках: квершлаг №2 и штрек 10б. Эксперименты показали, что в горных породах действуют горизонтальные напряжения, превышающие вертикальные, что свидетельствует о наличии тектонических напряжений.

В сложившихся условиях у ОАО «ППГХО» возникла потребность в углубленных геодинамических исследованиях в районе месторождения в пределах Забайкальского блока Амурской плиты [6]. Для решения этой задачи необходимо было оценить геодинамическую обстановку, НДС горных пород и изучить

закономерности геодинамических полей и процессов, связанных с горными работами. Для решения поставленных задач создана горно-технологическая модель исследуемого района, которая объединяет всю значимую геологическую, геомеханическую и горно-технологическую информацию. Численная геомеханическая модель месторождения «Антей», разработанная в Горном институте КНЦРАН, является одной из частей этой модели и учитывает основные факторы, влияющие на НДС массива пород в окрестности данного месторождения.

Для геомеханического обоснования вариантов интенсивной отработки протяженных выемочных участков проведен анализ технико-экономических показателей работы высокопроизводительных комплексно-механизированных забоев шахт Кузбасса, выявлены природные и техногенные факторы, которые осложняют управление НДС массива горных пород с учетом пространственного положения системы горных выработок протяженного выемочного участка. Подавляющее большинство угольных пластов Кузнецкого бассейна, подлежащих подземной разработке, имеет сложное строение. В них встречаются породные прослойки, расположение которых в пределах разрабатываемых участков месторождений существенно изменяется, что создает предпосылки отнесения этих запасов угля в разряд нетехнологичных [7]. Влияние геологических нарушений на производительность и безопасность подземных горных работ сказывается формированием опасных зон, которые характеризуются повышенным выделением метана, воды, неустойчивыми породами кровли краевой части пласта, снижением прочности угля и боковых пород, а также увеличением их трещиноватости. Наблюдаются отжим угля, пучение пород, почвы горных выработок, интенсивное образование «заколов» и «куполов» пород кровли и другие явления. В этой связи возрастают дополнительные трудовые и материальные затраты, связанные с проведением мероприятий по обеспечению устойчивости пород кровли и неоднородных целиков.

Для оценки геомеханического состояния углепородного массива при подходе очистного забоя к геологическому нарушению и отхода его от новой монтажной камеры применен метод конечных элементов (МКЭ) [8]. Использование МКЭ позволяет учесть особенности действия внешних силовых факторов, отобразить в модели структурные особенности породного массива, реализовать контактные условия взаимодействия разномодульных горных пород, а также рассмотреть разрушение массива для геомеханического обоснования ширины

угольного целика между демонтажной и монтажной камерами, включающего геологическое нарушение [9].

В результате проведенного исследования было подробно изучено геомеханическое состояние углепородного массива в области четырех смежных пластов с использованием численного моделирования МКЭ. В процессе исследования применен комплекс компьютерных программ *CoalPillar*, который адаптировали к горно-геологическим и горнотехническим условиям шахты в геолого-экономическом районе Ерунаковского месторождения Кузбасса [10].

Численное моделирование с использованием МКЭ проводилось при двух различных вариантах природных полей напряжений вне зоны воздействия горных выработок: гравитационного и геотектонического. Оказалось, что устойчивость уклонов по нижнему пласту 1 значительно зависит от верхнего пласта 2, в то время как первый пласт практически не оказывает влияния на деформацию пород уклонов по пласту 2. Вероятен отжим угля, поскольку вертикальные напряжения на 1,2–1,5 раза превышают предел прочности угля при сжатии в естественных условиях. Разработанная методика позволяет обосновать соответствующие профилактические мероприятия и рекомендации, которые можно будет внести в паспорт крепления выработок.

Получение надежных прогнозных оценок параметров полей напряжений, деформаций и перемещений массива горных пород (МГП), возмущенного проведением подземных горных выработок, является ответственной научно-технической задачей. Решение таких прикладных задач позволяет предотвратить опасные проявления горного давления в выработках, повысить безопасность ведения горных работ и снизить затраты на проведение и поддержание горных выработок в течение всего срока их эксплуатации. Процессы, протекающие в МГП, изучаются с привлечением различных методов. Выделяются следующие основные группы методов исследования НДС МГП: лабораторные, натурные и вычислительные. Широкое распространение в последние годы получили численные методы. В настоящее время существует множество программных комплексов на базе МКЭ: *ANSYS*, *ABAQUS*, *NASTRAN* и др. В качестве примера представлен расчет смещений контура вентиляционной печи 2594 шахты «Им. С.М. Кирова» ОАО «СУЭК-Кузбасс». Шахта разрабатывает участок Егозово-Красноярского месторождения Ленинского геолого-экономического района Кузбасса, включающий 2 рабочих пласта: «Поленовский» и «Болдыревский», которые обрабатываются в настоящее время [11]. При работе

высокопроизводительных очистных забоев поддержание сопряжений горных выработок в зоне опорного горного давления является трудоемким процессом. Это связано с динамическим изменением параметров опорного горного давления, зависящих от многих факторов, в том числе от расстояния между сопряжениями выработок и очистным забоем, а также длины консоли зависания пород активной кровли над выработанным пространством. Поэтому исследования геомеханических процессов массива горных пород в окрестности сопряжений горных выработок с учетом пространственно-временного расположения очистного забоя являются актуальными.

Существующие методы численного решения задач механики сплошной среды не в полной мере обеспечивают адекватное представление о геомеханических процессах в массиве горных пород, так как расчет параметров НДС массива горных пород в окрестности изучаемого объекта исследований происходит, как правило, при решении двумерной задачи. При двумерной постановке задачи не учитывается множество факторов: сложная геометрическая форма сопряжений и пересечений горных выработок, геологические нарушения и влияние пространственно-временных изменений расположения очистного забоя.

В этой связи для получения наиболее полного и адекватного представления о геомеханическом состоянии массива горных пород в окрестности сопряжений горных выработок предлагается использовать метод конечных элементов при постановке и решении трехмерной задачи механики сплошной неоднородной среды. Для обоснованного расчета геомеханических параметров массива горных пород МКЭ необходимо провести настройку математической модели по результатам инструментальных измерений в шахтных условиях, что реализовано на одной из шахт Кузбасса на момент отработки выемочного участка 1-1 (I этап), 1-2 (II этап) [12].

Применение геомеханических моделей актуально для прогноза устойчивости объектов на земной поверхности (грунтовых сооружений, зданий, надшахтных строений), подверженных влиянию различных негативных факторов [13, 14].

Проведенный анализ показывает, что методы численного геомеханического моделирования в основном применяют для решения задач подземной геотехнологии. Значительно меньший объем исследований направлен на геомеханическое обеспечение объектов открытой и строительной геотехнологий. Компьютерное геомеханическое моделирование играет особую роль в определении параметров управления свойствами неустойчивых грунтов

(например, осушение, тампонаж, упрочнение) и имеет большое значение.

В работе [15] рассмотрено решение задачи прогноза устойчивости насыпных предохранительных дамб горнопромышленных предприятий с учетом пространственной изменчивости физико-механических свойств суглинистых грунтов. На основе результатов инженерно-геологических изысканий выполнено численное моделирование геометрии дамбы и ее напряженного состояния с помощью объектно-ориентированного программирования «Устойчивая насыпь».

Комплекс исследований, выполненный КузГТУ, направлен на геомеханическое обеспечение технологий укрепления неустойчивых грунтовых оснований горнотехнических зданий и сооружений. Разработана методика численного моделирования НДС грунтовых массивов сложного строения методом МКЭ на основе программного комплекса *Alterra*, исследованы факторы, влияющие на устойчивость зданий и сооружений (слоистость массива, неравномерность нагрузки и др.), разработаны практические рекомендации по совершенствованию технологии инъекционного укрепления грунтов на основе геомеханического прогноза [16, 17].

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы.

1. При решении геомеханических задач методами численного моделирования в основном применяют плоские модели в линейной и нелинейной постановке.

2. Постановка задач геомеханики грунтовых оснований сооружений существенно отличается от задач открытой и подземной технологии по следующим причинам:

- приповерхностные основания сооружений представляют собой полупространства с достаточно четко выраженной горизонтальной слоистостью с аномальными по деформационным свойствам ослабленными (разуплотненными, влагонасыщенными) зонами произвольной формы;

- основная нагрузка создается внешней поверхностной распределенной силой, приложенной к фундаменту со значительными поперечными размерами;

- для улучшения строительных свойств неустойчивых грунтовых оснований активно применяют комплекс методов уплотнения и упрочнения.

Целью работы является разработка методики объемного моделирования НДС оснований технических сооружений, обеспечивающей повышение точности геомеханического прогноза устойчивости сооружений, в том числе при

использовании технологий управления механическими свойствами грунтов.

Методы исследования.

Геомеханическое моделирование грунтовых оснований базируется на МКЭ. С применением МКЭ возможно моделировать большинство геомеханических процессов, протекающих в грунтах, сопоставлять различные критерии предельных состояний. После обработки полученные данные могут быть представлены в численном или графическом виде. Расчеты с применением МКЭ способны учитывать как линейные, так и нелинейные формы деформаций, обеспечивают решение задач НДС среды с линейно-упругой связью напряжений и деформаций, а также реализуют развитие пластических деформаций и переход к нелинейным задачам [18, 19].

Метод МКЭ – это математический инструмент, который применяется для решения сложных инженерных и научных задач. Суть МКЭ заключается в приближенном вычислении системы простейших уравнений для ограниченных областей с целью определения искомой величины. В современной практике строительной геотехнологии МКЭ твердо закрепился как основной инструмент для расчета строительных конструкций. Вместе с этим методом развивались и инструменты для вычислений, а также программное обеспечение, без которых использование МКЭ невозможно.

Напряженно-деформированное состояние среды описывается в матричной форме [18]:

$$\{\sigma\} = \{\sigma_x \sigma_y \tau_{xy}\} = [D]\{\varepsilon\},$$

где $\{\sigma\}$ – вектор-столбец напряжений; $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ – компоненты напряжений; $[D]$ – матрица деформационных свойств среды

$$[D] = \frac{E}{(1-2\mu)(1+\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu & 0 \\ \mu & 1-\mu & \mu & 0 \\ \mu & \mu & 1-\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} \end{bmatrix};$$

E – модуль деформации; μ – коэффициент поперечных деформаций; $\{\varepsilon\}$ – вектор-столбец деформаций

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x \varepsilon_y \gamma_{xy}\};$$

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ – компоненты деформаций.

Порядок моделирования, используемый в МКЭ, заключается в формализации основных элементов расчета конструкции: фундамента, зоны закрепления, грунтового основания, а также их физико-механических свойств и геометрических параметров. Для получения достоверного прогноза и для сокращения времени расчета необходимо на основе имеющихся данных выбрать оптимальные размеры модели и количество конечных элементов с учетом достаточной точности прогноза [20].

Использование метода конечных элементов позволяет учесть сложные геометрические формы и неоднородность свойств материала, что делает его универсальным инструментом для моделирования различных инженерных процессов [21–24]. Важным преимуществом МКЭ является возможность анализа сложных геодинамических процессов, а также определение напряженно-деформированного состояния конструкций и материалов [25].

На основе МКЭ существует несколько специализированных программных комплексов, способных решать геотехнические задачи: *Plaxis*, *ANSYS*, *FLAC*, *FEMmodels*, *GeoSoft*, *Midas GTS*, *Z-soil* и др. Наиболее распространенным в мировой практике является программный комплекс *Plaxis*, который использовали в данной работе.

Результаты.

Разработана функциональная схема (общий алгоритм) объемного геомеханического моделирования укрепляемых грунтовых оснований сооружений.

Алгоритм включает в себя 6 этапов, основное содержание которых заключается в блок-схеме (Рис. 1).

Этап 0 (подготовительный период) включает подбор и предварительный анализ результатов маркшейдерского мониторинга, инженерно-геологических изысканий, геофизических зондирований и технической документации.

Этап 1 (подготовка априорной информации) заключается в подготовке базы данных, включает экспериментально зафиксированную осадку фундамента сооружения Δ , геологическое строение основания, прочностные и деформационные свойства грунтов, геометрию фундамента и приложенные к нему нагрузки, геометрические и физико-механические параметры укрепляемой зоны.

На этапе 2 (формирование базовой модели) задают геометрию в 3D-формате и свойства элементов модели. На этом этапе целесообразно выбрать рациональные параметры модели (границы, число конечных элементов, время счета), сопоставляя результаты тестовых расчетов с данными стандартного аналитического расчета осадок фундамента, принятого за эталон, с учетом допустимой 5%-ной погрешности.

Этап 3 (численные моделирование) включает расчет по базовой 3D-модели без ослабленных зон, с добавлением в нее ослабленных зон, а также с добавлением в нее укрепленных зон с формированием баз расчетных данных напряжений σ_i , деформаций ε_i и осадок Δ_i с присвоением индексов соответственно 1, 2 и 3. На данном этапе целесообразно оценить адекватность модели натуре, сравнив расчетные Δ_2 и экспериментальные Δ значения осадок

фундамента. Удовлетворительным результатом оценки можно считать различие этих значений, не превышающее 20%.

Этап 4 (обработка результатов расчетов) является ключевым и принципиально новым. Он включает выбор наиболее опасного 2D-сечения (нескольких сечений) при повороте вертикального сечения 3D-модели на угол α в диапазоне $0..180^\circ$ с заданным шагом $\Delta\alpha$. Опасному сечению будут соответствовать максимальные расчетные значения $\sigma = \sigma_{max}$ и $\varepsilon = \varepsilon_{max}$. Для выявленных наиболее опасных сечений (2D-моделей) выполняют визуализацию в форме полей изолиний $\sigma_i(x, z)$ и $\varepsilon_i(x, z)$. Для объективной оценки НДС грунтового основания на всех стадиях моделирования определяют интегральные показатели, которые включают величины σ_i , ε_i , и площади S_i фигур, ограниченных соответствующими изолиниями.

Интегральный показатель напряжений определяют по формуле

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

где $I\sigma$ – интегральный показатель напряжений, S_i – площадь.

Для деформаций введен аналогично интегральный показатель, определяемый по формуле

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

где $I\varepsilon$ – интегральный показатель деформаций, S_i – площадь.

Интегральные показатели определяют в пределах участка основания, воспринимающего большую часть нагрузки на фундамент. Этот участок имеет форму трапеции, верхнее основание которой равно ширине фундамента, высота соответствует глубине, на которой приращение напряжений (деформаций) не превышает погрешности расчета, а боковые стороны наклонены к вертикали под углом внутреннего трения грунта φ .

Для более точной оценки в формулах расчета интегральных показателей $I\sigma$ и $I\varepsilon$ площади S_i заменяют на объемы V_i , однако это требует дополнительных программных ресурсов.

Конкретные количественные критериальные соотношения интегральных показателей определяют по результатам экспериментальных исследований.

Заключительный этап 5 (практические рекомендации) состоит в обосновании необходимости укрепления основания или оценки его эффективности путем сопоставления соответствующих интегральных показателей на стадиях 1 и 2 или 1 и 3.

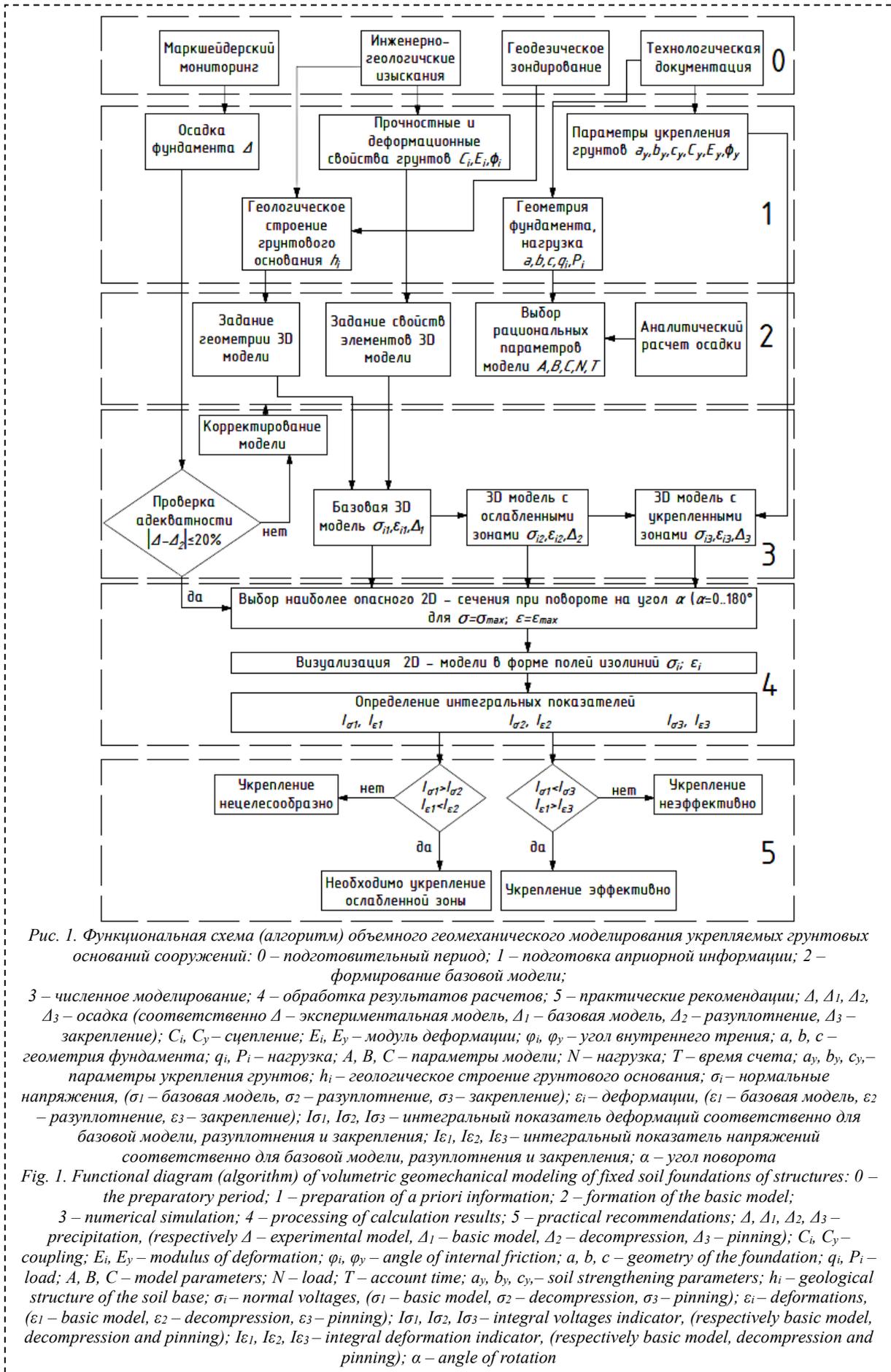


Рис. 1. Функциональная схема (алгоритм) объемного геомеханического моделирования укрепляемых грунтовых оснований сооружений: 0 – подготовительный период; 1 – подготовка априорной информации; 2 – формирование базовой модели; 3 – численное моделирование; 4 – обработка результатов расчетов; 5 – практические рекомендации; $\Delta, \Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ – осадка (соответственно Δ – экспериментальная модель, Δ_1 – базовая модель, Δ_2 – разуплотнение, Δ_3 – закрепление); C_i, C_y – сцепление; E_i, E_y – модуль деформации; ϕ_i, ϕ_y – угол внутреннего трения; a, b, c – геометрия фундамента; q_i, P_i – нагрузка; A, B, C – параметры модели; N – нагрузка; T – время счета; a_y, b_y, c_y – параметры укрепления грунтов; h_i – геологическое строение грунтового основания; σ_i – нормальные напряжения, (σ_1 – базовая модель, σ_2 – разуплотнение, σ_3 – закрепление); ϵ_i – деформации, (ϵ_1 – базовая модель, ϵ_2 – разуплотнение, ϵ_3 – закрепление); $I_{\sigma 1}, I_{\sigma 2}, I_{\sigma 3}$ – интегральный показатель деформаций соответственно для базовой модели, разуплотнения и закрепления; $I_{\epsilon 1}, I_{\epsilon 2}, I_{\epsilon 3}$ – интегральный показатель напряжений соответственно для базовой модели, разуплотнения и закрепления; α – угол поворота

Fig. 1. Functional diagram (algorithm) of volumetric geomechanical modeling of fixed soil foundations of structures: 0 – the preparatory period; 1 – preparation of a priori information; 2 – formation of the basic model; 3 – numerical simulation; 4 – processing of calculation results; 5 – practical recommendations; $\Delta, \Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ – precipitation, (respectively Δ – experimental model, Δ_1 – basic model, Δ_2 – decompression, Δ_3 – pinning); C_i, C_y – coupling; E_i, E_y – modulus of deformation; ϕ_i, ϕ_y – angle of internal friction; a, b, c – geometry of the foundation; q_i, P_i – load; A, B, C – model parameters; N – load; T – account time; a_y, b_y, c_y – soil strengthening parameters; h_i – geological structure of the soil base; σ_i – normal voltages, (σ_1 – basic model, σ_2 – decompression, σ_3 – pinning); ϵ_i – deformations, (ϵ_1 – basic model, ϵ_2 – decompression, ϵ_3 – pinning); $I_{\sigma 1}, I_{\sigma 2}, I_{\sigma 3}$ – integral voltages indicator, (respectively basic model, decompression and pinning); $I_{\epsilon 1}, I_{\epsilon 2}, I_{\epsilon 3}$ – integral deformation indicator, (respectively basic model, decompression and pinning); α – angle of rotation

Основная новизна предложенной методики состоит в выявлении наиболее опасного сечения в объеме грунтового основания, что позволяет снизить вероятность ошибки при субъективном анализе оператора в процессе выбора расчетного сечения (при плоских моделях за расчетные принимают обычно продольные и поперечные сечения фундамента) и за счет этого повысить точность прогноза НДС укрепляемого грунтового основания.

Выводы.

1. Особенности грунтовых оснований технических сооружений состоят в наличии объемных неоднородностей с низкими прочностными и деформационными свойствами в форме зон разуплотнения и влагонасыщения, величины которых соизмеримы с размерами фундамента, что требует применения объемных геомеханических моделей.

2. Повышение точности геомеханического прогноза устойчивости грунтовых оснований сооружений и эффективности их укрепления обеспечивается за счет выявления в объемной модели наиболее опасного сечения путем циклических расчетов с применением интегральных показателей напряжений и деформаций, учитывающих площади полей соответствующих изолиний.

Список литературы

1. Простов С. М., Герасимов О. В., Никулин Н. Ю. Комплексный геолого-геофизический мониторинг процессов упрочнения грунтов. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2015. 344 с.
2. Черданцев Н. В. Устойчивость целиков около системы выработок прямоугольного поперечного сечения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. №4. С. 24–30.
3. Черданцев Н. В. Геомеханическое состояние массива горных пород вокруг выработки и геологического нарушения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. №12. С. 52–58.
4. Черепов А. А., Павлова Л. Д. Оценка соответствия результатов численного моделирования и шахтных исследований параметров напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. №6. С. 61–68.
5. Рахимов В. Р., Казаков А. Н. Оценка напряженно-деформированного состояния массива с учетом тектонических напряжений методом конечных элементов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. №10. С. 151–162.
6. Козырев А. А., Семенова И. Э., Аветисян И. М. Создание численной геомеханической модели месторождения «Антей» как основы прогноза напряженно-деформированного состояния массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. №4. С. 33–40.
7. Серяков В. М., Риб С. В., Басов В. В., Фрянов В. Н. Геомеханическое обоснование параметров технологии отработки угольных пластов в зоне взаимовлияния очистного пространства и передовой выработки // ФТПРПИ. 2018. №6. С. 21–29.
8. Козловский В. Е., Колмогорова С. С., Колмогоров С. Г. О напряженном состоянии грунта на забое выработки // Вестник ТГАСУ. 2023. №2 (25). С. 183–190.
9. Серяков В. М., Риб С. В., Фрянов В. Н. Напряженно-деформированное состояние угольного целика при переходе очистным механизированным комплексом зоны геологического нарушения // ФТПРПИ. 2017. №6. С. 32–40.
10. Исаченко А. А., Риб С. В., Волошин В. Н., Фрянов В. Н. Оценка геомеханического состояния углеродного массива в окрестности уклонов сближенных угольных пластов с использованием численного моделирования методом конечных элементов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 1. С. 294–302.
11. Господариков А. П., Максименко М. В., Сидоренко А. А. Вычислительный комплекс для расчета прогнозируемых смещений контура протяженной горной выработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. №5. С. 36–42.
12. Басов В.В. Методика оценки соответствия результатов численного моделирования и шахтных измерений геомеханических параметров массива горных пород в окрестности сопряжений горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. №7. С. 51–62.
13. Рубин О. Д., Антонов А. С., Баклыков И. В., Юрченко А. Н. Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния и устойчивости грунтовой перемычки сухого дока с учетом ее перепрофилирования // Природообустройство. 2023. №2. С. 92–98.
14. Сеница И. В., Ермолович Е. А., Яцыняк С. Д. Прогноз влияния очистных работ на напряженно-деформированное состояние массива в районе воздухоподающего ствола // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2023. №2. С. 418–431.
15. Ермакова Н. А., Бахаева С. П., Дягилева А. В. Численное моделирование геомеханического отвала на водонасыщенном основании // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2014. №4. С. 11–15.
16. Соколов М. В., Простов С. М. Моделирование геомеханических процессов при неравномерном оседании оснований сооружений // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. №1. С. 15–25.

17. Соколов М. В., Простов С. М., Герасимов О. В. Прогноз геомеханического состояния закрепляемого грунтового основания горнотехнического здания // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. №6 (21). С. 199–210.

18. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике. Москва : Недра, 1987. 221 с.

19. Ghabezloo S., Sulem J., Guedon S., Martineau F. Effective stress law for the permeability of a limestone // International journal of rock mechanics and mining science. 2008; 2 (46):297–306.

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

21. Protosenya A., Alekseev A., Verbilo P. Prediction of the stress-strain state and stability of the front of tunnel face at the intersection of disturbed zones of the soil mass // Journal of Mining Institute. 2022; 254:252–260.

22. Karasev M., Bouslova M., Vilner M., Nguyen T. T. Method for predicting the stress-strain

state of the vertical shaft lining at the drift landing section in saliferous rocks // Journal of Mining Institute. 2019; 240: 628–637.

23. Koloshina G., Prokopova M., Tkacheva K. Mathematical modeling of the stress-strain state of a soil during the construction of the underground part of unique buildings // Proceedings II International Scientific Conference on Advances in Science, Engineering and Digital Education (ASEDU-II-2021). 2022; 1 (2647):60025.

24. Черданцев Н. В. Моделирование геомеханического состояния анизотропного по прочности неоднородного массива горных пород // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2011. №4. С. 16–22.

25. Ардисламова Д. Р., Давлетова А. Р., Закирзянов Ш. И., Пестриков А. В., Судеев И. В., Федоров А. И., Шамсутдинова Е. Р., Хакимов А. А., Абушаев Р. Н. Расчет напряженного состояния на участке Северо-Комсомольского месторождения с использованием нового корпоративного 3D-симулятора РН-СИГМА // Экспозиция Нефть Газ. 2023. №3. С. 38–43.

© 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:

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

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

Заявленный вклад авторов:

Простов Сергей Михайлович – научный менеджмент, анализ данных, разработка алгоритма, выводы.
Власов Максим Алексеевич – обзор литературы по теме исследования, оформление теста и графической информации, сбор и анализ данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

FEATURES OF THE METHODOLOGY OF NUMERICAL MODELING OF THE VAT OF THE SOIL REINFORCEMENT OF THE BASE OF THE STRUCTURE IN A VOLUMETRIC FORMULATION

Sergey M. Prostov, Maksim A. Vlasov

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

*for correspondence: maxsdss@mail.ru

**Article info**

Received:

08 April 2024

Accepted for publication:

29 May 2024

Accepted:

29 May 2024

Published:

28 June 2024

Keywords: technical condition diagnostics, automated monitoring system, load-bearing structures, reverse task, computer modeling, neuro-network method of data flow analysis

Abstract.

The analysis of the results of computer geomechanical modeling in solving problems of underground, open and construction geotechnology is presented. The method of transition to three-dimensional digital models is substantiated. The features of setting the tasks of geomechanics of the soil foundations of structures are revealed. The aim of the work is to develop a methodology for volumetric modeling of the stress-strain state of the foundations of technical structures, which ensures an increase in the accuracy of the forecast, including when using technologies for managing soil properties. Geomechanical modeling of soil bases is based on the finite element method (FEM). With the help of FEM, it is possible to simulate most of the geomechanical processes that occur in soils and compare various criteria of limit states. After processing, the obtained data can be presented in numerical or graphical form. Calculations using FEM can take into account both linear and nonlinear forms of deformations, solve problems of inhomogeneous deformation of the medium with a linear elastic coupling of stresses and deformations, as well as model plastic deformations and transition to nonlinear problems. Based on this, several mining facilities were analyzed. The essence of the FEM is the approximate calculation of a system of the simplest equations for limited areas in order to determine the desired values. In modern practice of construction geotechnology, FEM has firmly established itself as the main tool for calculating building structures. A functional scheme of volumetric geomechanical modeling has been developed, which includes 6 stages: preparatory period; preparation of a priori information; formation of a basic model; numerical modeling; processing of calculation results; practical recommendations. The main novelty of the proposed technique is to identify the most dangerous section in the volume of the soil base, which allows us to fundamentally improve the accuracy of the geomechanical forecast.

For citation: Prostov S.M., Vlasov M.A. Features of the methodology of numerical modeling of the vat of the soil reinforcement of the base of the structure in a volumetric formulation. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 3(163):4-14. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-3-4-14, EDN: ADODAU

REFERENCES

1. Prostov S.M., Gerasimov O.V., Nikulin N.Yu. Kompleksnyi geologo-geofizicheskii monitoring protsessov uprochneniya gruntov [Comprehensive geological and geophysical monitoring of soil hardening processes]. Tomsk: Tomsk University Press; 2015. 344 p.
2. Cherdancev N.V. Ustojchivost' celikov okolo sistemy vyrabotok prjamougol'nogo po-perechnogo sechenija [Stability of pillars near rectangular cross-section roadways]. *Gornyj informacionno-analiticheskij*

bjulleten' [Mining information and analytical bulletin]. 2014; 4:24–30.

3. Cherdancev N.V. Geomechanicheskoe sostojanie massiva gornyh porod vokrug vyrabotki i geologicheskogo narusheniya [Geomechanical conditions of surrounding rocks around excavation and geological dislocation]. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'* [Mining information and analytical bulletin]. 2015; 12:52–58.

4. Cherepov A.A., Pavlova L.D. Ocenka sootvetstvija rezul'tatov chislennogo modelirovaniya i shahtnyh issledovanij parametrov naprjazhenno-

deformirovannogo sostojanija massiva gornyh porod [Evaluation of conformance of the results of numerical modeling and mine study of the parameters of rock mass stress-strain behavior]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kuzbass State Technical University]. 2017; 6:61–68.

5. Rahimov V.R., Kazakov A.N. Ocenka naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija massiva s uchedom tektonicheskikh naprjazhenij metodom konechnyh jelementov [Finite element analysis of stress-strain state of rocks, considering tectonic stresses]. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'* [Mining information and analytical bulletin]. 2014; 10:151–162.

6. Kozyrev A.A., Semenova I.Je., Avetisjan I.M. Sozdanie chislennoj geomechanicheskoy modeli mestorozhdenija «Antej» kak osnovy prognoza naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija massiva [Development of numerical geomechanical model of Antey deposit

as a base of rock mass stress-strain state forecasting]. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'* [Mining information and analytical bulletin]. 2014; 4:33–40.

7. Serjakov V.M., Rib S.V., Basov V.V., Frjanov V.N. Geomechanicheskoe obosnovanie para-metrov tehnologii otrabotki ugol'nyh plastov v zone vzaimovlijanija ochistnogo prostranstva i peredovoj vyrabotki [Geomechanical substantiation of the parameters of the technology of mining coal seams in the zone of mutual influence of the treatment space and advanced production]. *FTPRPI* [FTP RPI]. 2018; 6:21–29.

8. Kozlovskij V.E., Kolmogorova S.S., Kolmogorov S.G. O naprjazhenom sostojanii grunta na zaboe vyrabotki [Soil stress state at the roadhead]. *Vestnik TGASU* [Bulletin of the TSASU]. 2023; 25(2):183–190.

9. Serjakov V.M., Rib S.V., Frjanov V.N. Naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie ugol'nogo celika pri perehode ochistnym mehanizirovannym kompleksom zony geologicheskogo narushenija [The stress-strain state of a coal seam during the transition of a zone of geological disturbance by a cleaning mechanized complex]. *FTPRPI* [FTP RPI]. 2017; 6:32–40.

10. Isachenko A.A., Rib S.V., Voloshin V.N., Frjanov V.N. Ocenka geomechanicheskogo sostojanija ugleporodnogo massiva v okrestnosti uklonov sblichennyh ugol'nyh plastov s ispol'zovaniem chislennogo modelirovanija metodom konechnyh jelementov [Assessment of geomechanical condition of rock mass in the vicinity of slopes of adjacent coal seams using numerical finite element modeling]. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'* [Mining information and analytical bulletin]. 2016; 1:294–302.

11. Gospodarikov A.P., Maksimenko M.V., Sidorenko A.A. Vychislitel'nyj kompleks dlja rascheta prognoziruemyh smeshhenij kontura protjazhennoj gornoj vyrabotke [The computer system for the calculation of forecast displacements of a drift's contour]. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'* [Mining information and analytical bulletin]. 2016; 5:36–42.

12. Basov V.V. Metodika ocenki sootvetstvija rezul'tatov chislennogo modelirovanija i shahtnyh izmerenij geomechanicheskikh parametrov massiva gornyh porod v okrestnosti soprjazhenij gornyh vyrabotok [Evaluation procedure of conformance between numerical modeling and in-situ measurement data on geomechanical parameters of rock mass near intersections in mines]. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'* [Mining information and analytical bulletin]. 2019; 7:51–62.

13. Rubin O.D., Antonov A.S., Baklykov I.V., Jurchenko A.N. Rezul'taty raschetov naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija i ustojchivosti gruntovoj pereprofilirovanija [Results of calculations of the stress-strain state and stability of the ground cofferdam of the dry dock, taking into account its re-profiling]. *Prirodoobustrojstvo* [Prirodoobustrojstvo]. 2023; 2:92–98.

14. Sinica I.V., Ermolovich E.A., Jacynjak S.D. Prognoz vlijanija ochistnyh rabot na naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie massiva v rajone vozduhopodajushhego stvola [Predicting the stoping influence on the stress-strain state of the massif in the downcast shaft area]. *Izvestija TulGU. Nauki o Zemle* [News of TulSU. Earth Sciences]. 2023; 2:418–431.

15. Ermakova N.A., Bahaeva S.P., Djagileva A.V. Chislennoe modelirovanie geomechanicheskogo otvala na vodonasyshennom osnovanii [Numerical simulation of a geomechanical dump on a water-saturated base]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kuzbass State Technical University]. 2014; 4:11–15.

16. Sokolov M.V., Prostov S.M. Modelirovanie geomechanicheskikh processov pri neravnomernom osedanii osnovanij sooruzhenij [Modeling of geomechanical processes in case of uneven subsidence of the foundations of structures]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kuzbass State Technical University]. 2017; 1:15–25.

17. Sokolov M.V., Prostov S.M., Gerasimov O.V. Prognoz geomechanicheskogo sostojanija zakrepljaemogo gruntovogo osnovanija gornotekhnicheskogo zdanija [Prediction of geomechanical state of stabilized soil foundation of mine engineering building]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering]. 2019; 21(6):199–210.

18. Fadeev A.B. Metod konechnyh jelementov v geomechanike [The finite element method in geomechanics]. Moscow: Nedra; 1987. 221 p.

19. Siavash Ghabezloo, Jean Sulem, Sylvine Guedon, Francois Martineau. Effective stress law for the permeability of a limestone. *International journal of rock mechanics and mining science*. 2008; 46(2):297–306.

20. Vlasov M.A., Prostov S.M., Sokolov M.V. Vybór racional'nyh parametrov geomechanicheskoy

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 Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*[*Bulletin of Kuzbass State Technical University*]. 2023; 5:4–12.

21. Protosenya A., Alekseev A., Verbilo P. Prediction of the stress-strain state and stability of the front of tunnel face at the intersection of disturbed zones of the soil mass. *Journal of Mining Institute*. 2022; 254:252–260.

22. Karasev M., Bouslova M., Vilner M., Nguyen T. T. Method for predicting the stress-strain state of the vertical shaft lining at the drift landing section in saliferous rocks. *Journal of Mining Institute*. 2019; 240:628–637.

23. Koloshina G., Prokopova M., Tkacheva K. Mathematical modeling of the stress-strain state of a soil during the construction of the underground part of unique buildings. *Proceedings II International Scientific Conference on Advances in Science, Engineering and*

Digital Education (ASEDU-II-2021). 2022; 2647(1):60025.

24. Cherdancev N.V. Modelirovanie geomechanicheskogo sostojanija anizotropnogo po prochnosti neodnorodnogo massiva gornyh porod [Modeling of the geomechanical state of an anisotropic heterogeneous rock mass in terms of strength]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*[*Bulletin of Kuzbass State Technical University*]. 2011; 4:16–22.

25. Ardislamova D.R., Davletova A.R., Zakirzjanov Sh.I., Pestrikov A.V., Sudeev I.V., Fedorov A.I., Shamsutdinova E.R., Hakimov A.A., Abushaev R.N. Raschet naprijazhennogo sostojanija na uchastke Severo-Komsomol'skogo mestorozhdenija s ispol'zovaniem novogo korporativnogo 3D-simuljatora RN-SIGMA [Calculation of the stress state at the Severo-Komsomolskoye field using the new corporate 3D simulator RN-SIGMA]. *Jekspozicija Neft' Gaz* [Exposition Oil Gas]. 2023; 3:38–43.

© 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:

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

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

Contribution of the authors:

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

Maksim A. Vlasov – review of the literature on the research topic, design of text and graphic information, data collection and analysis

All authors have read and approved the final manuscript.

