

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЛИНИСТЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ И СОДЕРЖАНИЯ НЕРАСТВОРИМОГО ОСТАТКА НА УСТОЙЧИВОСТЬ МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ МЕТОДАМИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОИСТЫХ СРЕД В УСЛОВИЯХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

М.А. Карасев¹, И.А. Откупщикова¹, А.И. Рысин², А.М. Лебедева³, А.С. Нуртдинов²

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: otkupschikova2015@gmail.com

² ООО «ПроТех-Инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Аннотация: Рассмотрено численное моделирование влияния нерастворимого остатка и глинистых прослоев на несущую способность междукамерных целиков в соляных породах. Результаты расчетов показали, что изменение прочности при увеличении содержания нерастворимого остатка носит выраженный нелинейный характер: при содержании до 5% наблюдается наиболее интенсивное снижение, а дальнейший рост приводит к уменьшению несущей способности до 30–40% от уровня соляных пород. Установлено, что решающим фактором является появление первого глинистого прослоя, тогда как увеличение их количества свыше 12–16 практически не меняет итоговую несущую способность. Показано, что соотношение прочности соляных пород и глинистых прослоев определяет форму кривой ослабления, при этом наибольшее влияние оказывает снижение сцепления глинистого материала. Геометрические параметры также играют значимую роль: увеличение отношения высоты целика к его ширине усиливает влияние глинистых включений, а наличие мощного слабого прослоя в кровле снижает несущую способность дополнительно на 15–25%. Полученные зависимости демонстрируют, что использование только процентного содержания нерастворимого остатка недостаточно для надёжной оценки состояния целиков. Практическая значимость работы состоит в уточнении представлений о влиянии структуры глинистых включений на несущую способность междукамерных целиков и в обосновании необходимости перехода к многофакторной оценке устойчивости целиков в переслаивающихся соляных толщах.

Ключевые слова: междукамерный целик, соляные породы, глинистые прослойки, несущая способность, прочность, глинистость, численное моделирование, слоистость массива.

Для цитирования: Карасев М. А., Откупщикова И. А., Рысин А. И., Лебедева А. М., Нуртдинов А. С. Исследование влияния параметров глинистых включений и содержания нерастворимого остатка на устойчивость междукамерных целиков методами численного моделирования слоистых сред в условиях месторождений калийных солей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 11. – С. 33–51. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_11_0_33.

Investigation of influence of clay inclusions and insoluble residue content on rib pillar stability by numerical modeling of stratified media in terms of potash deposits

M.A. Karasev¹, I.A. Otkupshchikova¹, A.I. Rysin², A.M. Lebedeva³, A.S. Nurtdinov²

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: otkupschikova2015@gmail.com

² LLC «ProTech Engineering», Saint-Petersburg, Russia

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Abstract: Numerical modeling was performed to analyze the influence of clay interbeds and insoluble residue on load-bearing capacity of rib pillars in salt rock mass. The modeling results show that the change in the strength at the increasing content of the insoluble residue has a distinct nonlinear behavior: at the content to 5%, the highest decrease is observed; the higher content leads to the drop in the load-bearing capacity to 30–40% of the salt rock level. It is found that the determining factor is appearance of the first clay interbed, while an increase in their number over 12–16 interbeds has no influence on the final load-bearing capacity. The strength ratio of salt rocks and clay interbeds defines the shape of the weakening curve, and the highest influence is exerted by the decrease in cohesion of clay material. The geometrical parameters also play an important role: the increase of the height-to-width ratio of a pillar increases the influence of clay interbeds, and the presence of a thick weak interbed in the roof decreases the load-bearing capacity additionally by 15–25%. The obtained dependences demonstrate that the use of only percentage of the insoluble residue is insufficient for the reliable assessment of pillars. The practical relevance of the research consists in the revision of the concept on the influence exerted by clay interbeds on the load-bearing capacity of rib pillars, and in the substantiation of transition to the multi-factor stability assessment of pillars in interstratified salt strata.

Key words: rib pillars, salt rocks, clay interbeds, load-bearing capacity, strength, clay content, numerical modeling, rock mass stratification.

For citation: Karasev M. A., Otkupshchikova I. A., Rysin A. I., Lebedeva A. M., Nurtdinov A. S. Investigation of influence of clay inclusions and insoluble residue content on rib pillar stability by numerical modeling of stratified media in terms of potash deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(11):33-51. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_11_0_33.

Введение

Физико-механические свойства соляных толщ, как и особенности их напряженно-деформированного состояния, в значительной степени определяются присутствием нерастворимых включений — глинистых, карбонатно-ангидритовых и других слабых прослоев, формирующих слоистую структуру массива. Такие прослои могут встречаться как в рассеянном виде, так и образовывать многочисленные тонкие горизон-

ты; их количество, мощность и литологический состав варьируют в широких пределах, что приводит к выраженной неоднородности механических свойств и усложняет прогноз несущей способности горных пород. При проведении горных выработок в соляном массиве происходит перераспределение напряжений вокруг контура камеры, сопровождающееся концентрацией сжимающих и сдвиговых напряжений в междукamerных целиках. В однородных соляных

породах характер деформирования в значительной степени определяется пластичностью и ползучестью соли, тогда как наличие глинистых прослоев способствует локализации деформаций по слабым горизонтам. Вследствие пониженной прочности, меньшего сцепления и повышенной чувствительности к увлажнению такие прослои могут выступать как зоны ослабления, в пределах которых развиваются сдвиговые деформации и формируются области пластического течения. Поэтому несущая способность целиков определяется не только суммарным содержанием нерастворимых остатков (Н.О.), но и пространственным положением, мощностью и состоянием глинистых прослоев.

Влияние прослоев несолёных литотипов на напряженно-деформированное состояние и устойчивость соляных массивов подтверждается результатами ранее выполненных исследований. Показано, что мощные аргиллитовые прослои могут существенно менять характер деформирования и снижать стабильность подземных хранилищ [1, 2], а контраст механических свойств определяет диапазон возможных эффектов [3–5]. Лабораторные исследования солей с включениями глинисто-ангидритового или аргиллитового материала фиксируют выраженные изменения прочностных характеристик по сравнению с однородными образцами [6, 7], а влияние слабых прослоев рассматривается также при оценке устойчивости подземных выработок [8]. Детальные методики для экспериментального исследования кристаллических и, в частности, соляных пород изложены в работах [9–11].

Однако лабораторные образцы, как правило, содержат лишь несколько прослоев, тогда как в природных целиках их могут быть десятки, что определяет необходимость применения численных

методов прогнозирования напряженно-деформированного состояния сложных слоистых структур [12, 13]. Численное моделирование позволяет учитывать широкий спектр факторов: механические контрасты между слоями, реологические особенности соляных пород, влияние текучести [14], трещинообразование [15, 16], проницаемость и ее связь с прочностью [17–19], а также оценку несущей способности и устойчивости породных целиков [20–22]. Кроме того, современные подходы объединяют анализ напряженного состояния с задачами разработки месторождений и проектирования подземных резервуаров [23–25].

Проблематика моделирования слоистых сред в целом получила значительное развитие в контексте устойчивости выработок [26, 27], тоннелей и целиков [28–30]. Она представлена как методами механики сплошной среды [31–33], так и дискретными подходами [34, 35], включая современные гибридные методы и методы моделирования, основанные на анализе данных. Они позволяют ускорять расчеты напряженно-деформированного состояния трещиноватых и слоистых массивов [36]. Наибольшее распространение получили методы, способные напрямую моделировать зарождение и развитие трещин, включая когезионные модели разрушения, фазово-полевые подходы и дискретизацию трещин в явном виде [37, 38]. Особенно актуально применение таких моделей для систем, где контраст прочности между слоями достигает порядков величины, как в случае глинистых прослоев в соляных породах. В подобных условиях классические изотропные модели могут давать существенные погрешности, тогда как слоистые и анизотропные постановки позволяют корректно учитывать направление слабых горизонтов, их сцепление и локализацию деформаций.

Действующие методики расчета прочности массива используют корректирующий коэффициент k_c , учитывающий влияние глинистых прослоев. Однако введенные в нормативные документы зависимости базируются на ограниченной экспериментальной выборке и не учитывают такие факторы, как положение слабых прослоев по высоте; их количество и вариабельность мощности; контраст прочностных характеристик; наличие мощного прослоя нерастворимого остатка в кровле; неоднородность Н.О. по толщине целика.

Кроме того, ряд работ указывает на существенное расхождение фактических наблюдений с расчетами при содержании нерастворимого остатка $> 7 - 10\%$, что подтверждает необходимость уточнения зависимости прочности от содержания глинистого материала. Лабораторные исследования, выполненные ранее [39], показали смещение границы линейной аппроксимации и более интенсивное снижение прочности уже при $3 - 4\%$ Н.О., что дополнительно подчеркивает необходимость разработки уточненных моделей.

Таким образом, актуальность исследования определяется необходимостью

комплексной оценки влияния глинистых прослоев и других факторов (мощность, количество, прочность) на несущую способность породных целиков. В работе применяется интегрированный подход, включающий лабораторные испытания сложносоставных образцов и расширенное численное моделирование, позволяющее проследить эволюцию напряженно-деформированного состояния массива в присутствии множества слабых прослоев.

Методы

Междукамерный целик применительно к рассматриваемым условиям можно представить как композитную среду (рис. 1), состоящую из слоев соляных пород и глинистых прослоев различной мощности. Мощность прослоев может варьироваться в широком диапазоне от первых миллиметров до нескольких десятков сантиметров, в отдельных случаях — более 1 м. Количество глинистых прослоев также довольно сильно варьируется. Механические характеристики соляных пород и Н.О. непостоянны и могут изменяться от одного междукамерного целика к другому. Контакт междукамерного целика с кровлей мо-

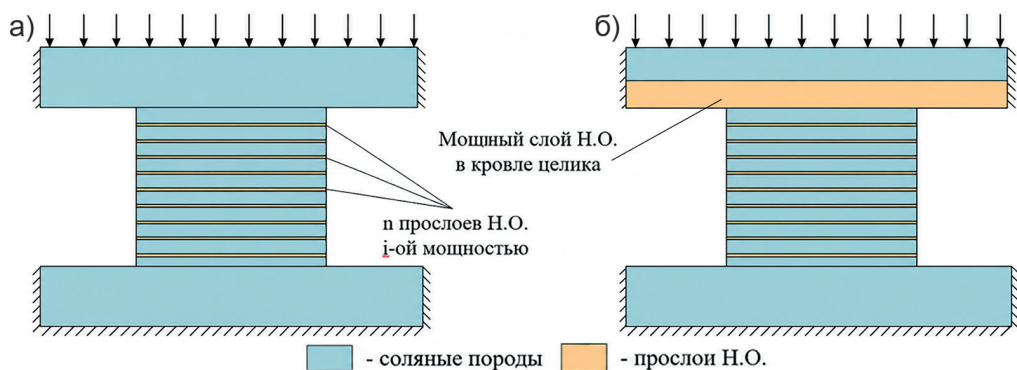


Рис. 1. Расчетная схема породных целиков с граничными условиями и их идеализация: взаимодействие целика в кровле с соляной породой (а); взаимодействие целика в кровле с Н.О. (б) [составлено авторами]
Fig. 1. Computational scheme with boundary conditions and idealization of inter-chamber pillars: contact between the pillar and salt rock in the roof (a); contact between the pillar and an insoluble-residue layer in the roof (b) [compiled by the authors]

жет быть представлен как соляной породой (рис. 1, а), так и достаточной мощным прослоем Н.О. (рис. 1, б), что оказывает существенное влияние на несущую способность целика.

Влияние перечисленных факторов на несущую способность междукламерных целиков ранее было изучено как экспериментально, так и с применением численного моделирования. Результаты лабораторных испытаний, направленных на установление зависимости прочности от содержания Н.О. и оценку статистического разброса параметров, подробно представлены в другой публикации и в рамках настоящей статьи не рассматриваются. Основное внимание здесь уделено численному моделированию, позволяющему проанализировать геомеханические эффекты, которые невозможно или крайне затруднительно выявить только лабораторными методами.

Как отмечено ранее, программа проведения лабораторных исследований не позволяла изучить все факторы, влияющие на несущую способность междукламерного целика. Для получения более представительной картины в рамках численного моделирования изучено не только влияние содержания Н.О. в целике, но и уделено внимание оценке количества прослоев Н.О., их положению по высоте целика, прочности соляных пород по отношению к прочности Н.О., а также влиянию мощного слоя Н.О. в кровле на несущую способность междукламерного целика.

Численное моделирование прогноза несущей способности породного целика выполнялось в плоско-деформационной постановке с применением метода конечных элементов. Соляные породы и прослои Н.О. идеализировались как сплошные элементы второго порядка точности. Количество элементов по высоте слоя соляных пород и прослоя гли-

нистых пород принималось не менее 2. Граничные условия принимались следующие: по нижней и боковым границам модели запрещены смещения в ортогональных направлениях, а по верхней границе модели приложены вынужденные перемещения в направлении междукламерного целика. На рис. 1 представлена расчетная схема модели.

Величина несущей способности междукламерного целика устанавливалась по величине реакции опоры в момент нарастания скорости приращения смещений по отношению к силовому воздействию. При выполнении расчетов предполагалось, что напряженное состояние породного массива на рассматриваемом участке гидростатическое.

В качестве модели деформирования соляных пород и прослоев Н.О. принималась упруго-идеально-пластическая модель, основанная на условии пластичности Кулона–Мора. Разупрочнение пород в результате развития деформаций и разрушения цементационных связей не учитывалось. Данное допущение может оказать влияние на количественную оценку результатов расчетов несущей способности породного целика, однако существенного влияния на качественную картину изменения данного показателя не окажет. При проведении дальнейших исследований предполагается переход к более продвинутым моделям для учета запредельной ветви деформирования и перехода к остаточной прочности.

Целью настоящего этапа численного моделирования являлась качественная оценка влияния строения междукламерного целика на изменение его несущей способности и картины разрушения. В связи с этим калибровка параметров модели по абсолютным значениям несущей способности не проводилась. Расчетные параметры соляных пород и прослоев Н.О. задавались на основании

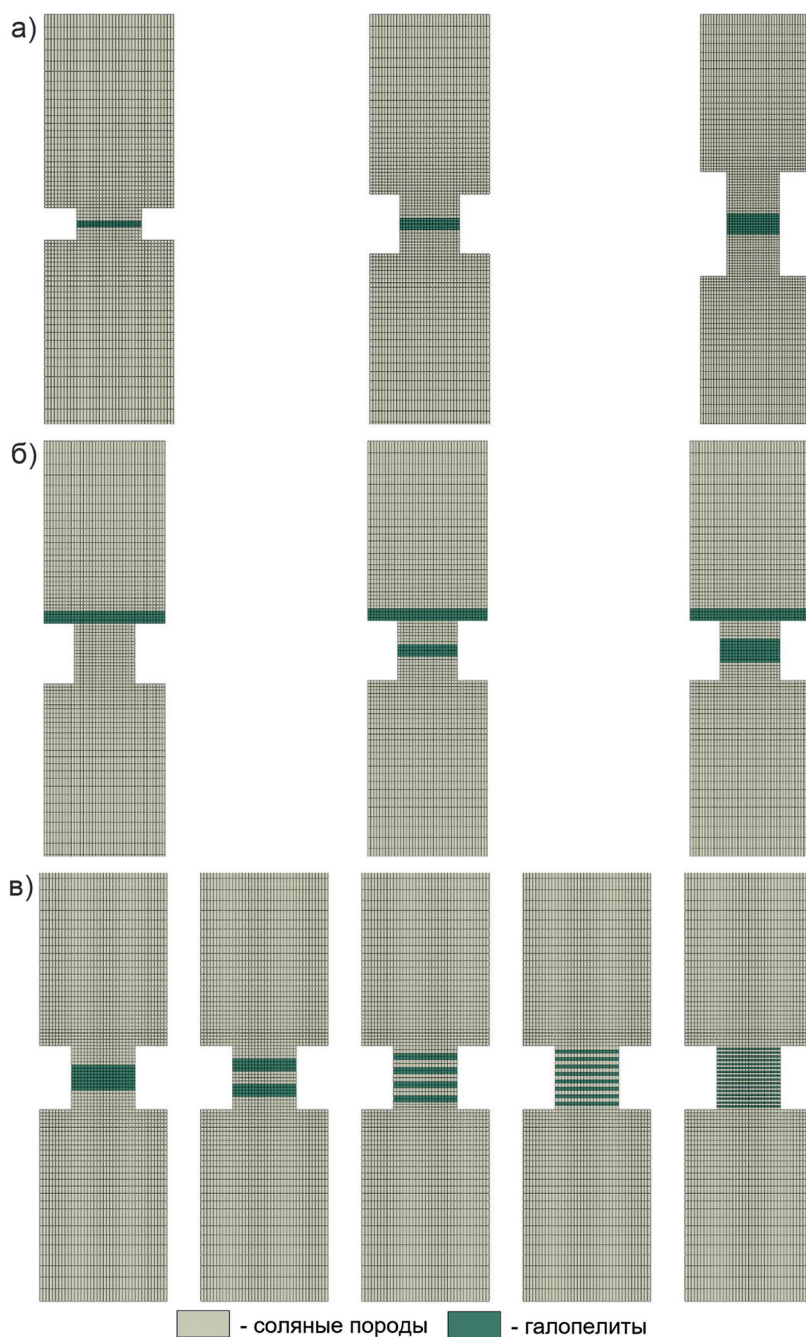


Рис. 2. Конечно-элементные модели прогноза несущей способности междукammerных целиков: в зависимости от соотношения геометрических размеров междукammerных целиков (а); в зависимости от пород в кровле камер (б); в зависимости от количества прослоев Н.О. (в) [составлено авторами]

Fig. 2. Finite-element models for predicting the load-bearing capacity of inter-chamber pillars: depending on the pillar height-to-width ratio (a); depending on the roof rock type (b); depending on the number of insoluble-residue layers (v) [compiled by the authors]

Пластические показатели упругопластической модели Кулона–Мора для различных пород [составлено авторами]
Plasticity parameters of the Mohr – Coulomb elastoplastic model for different rock types [compiled by the authors]

Наименование породы	Прочность в условиях одноосного сжатия, МПа	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град.	Угол дилатансии, град.
Соляная порода, тип А	23,05	6	35	5
Соляная порода, тип Б	20,78	6	30	5
Соляная порода, тип В	10,32	3	30	5
Нерастворимые остатки	0,57	0,2	20	0

механических характеристик отдельных типов пород и использовались без дополнительной корректировки по интегральному отклику модели. Количественная верификация модели по результатам испытаний составных образцов и натурных наблюдений рассматривается как самостоятельная задача дальнейших исследований.

На основании разработанной численной модели прогноза несущей способности целика выполнялось изучение влияния следующих факторов на этот показатель: соотношения размеров (отношение высоты к ширине) породного целика, соотношения прочности нерастворимых включений к прочности соляных пород, наличия мощного глинистого слоя в кровле междукammerного целика и количество прослоев нерастворимых включений в целике. Все расчеты выполнялись для различного содержания Н.О. в породном целике. Содержание Н.О. варьировалось в диапазоне 0 – 100%.

За базовый размер междукammerного целика принимался целик с размерами 5 м по высоте и 5 м по ширине, то есть их соотношение равно 1:1. Дополнительно рассмотрены междукammerные целики с соотношением высоты к ширине, равной 2:1 и 1:2. Расстояние между центрами породных целиков по горизонтали принималось равным 10 м.

Для оценки влияния соотношения прочности нерастворимых включений

и соляных пород построен ряд моделей, где прочность соляных пород изменялась, а показатели прочности нерастворимых остатков оставались без изменения (таблица). Необходимо отметить, что для всех выполненных расчетов несущей способности междукammerных целиков, за исключением тех, которые проводились для установления влияния соотношения прочности соляных пород к прочности нерастворимых остатков, в качестве показателей пластичности модели Кулона–Мора принимался набор «Соляная порода, тип А».

При оценке влияния прочностных характеристик пород (рис. 2, а) и мощного слоя Н.О., расположенного в кровле камеры (рис. 2, б), рассматривался только один слой Н.О. внутри междукammerного целика различной мощности. Для оценки влияния количества прослоев Н.О. на несущую способность междукammerных целиков подготовлены ряд моделей, которые включали 1, 2, 4, 8, 16 и 32 прослоев (рис. 2, в).

Результаты

Все результаты расчета несущей способности породных целиков представлены через абсолютное значение несущей способности целика и через относительный показатель несущей способности. Относительный показатель численно определяется как значение несущей способности целика с наличием глинистых прослоев $F_{г\lambda}$ к несущей способ-

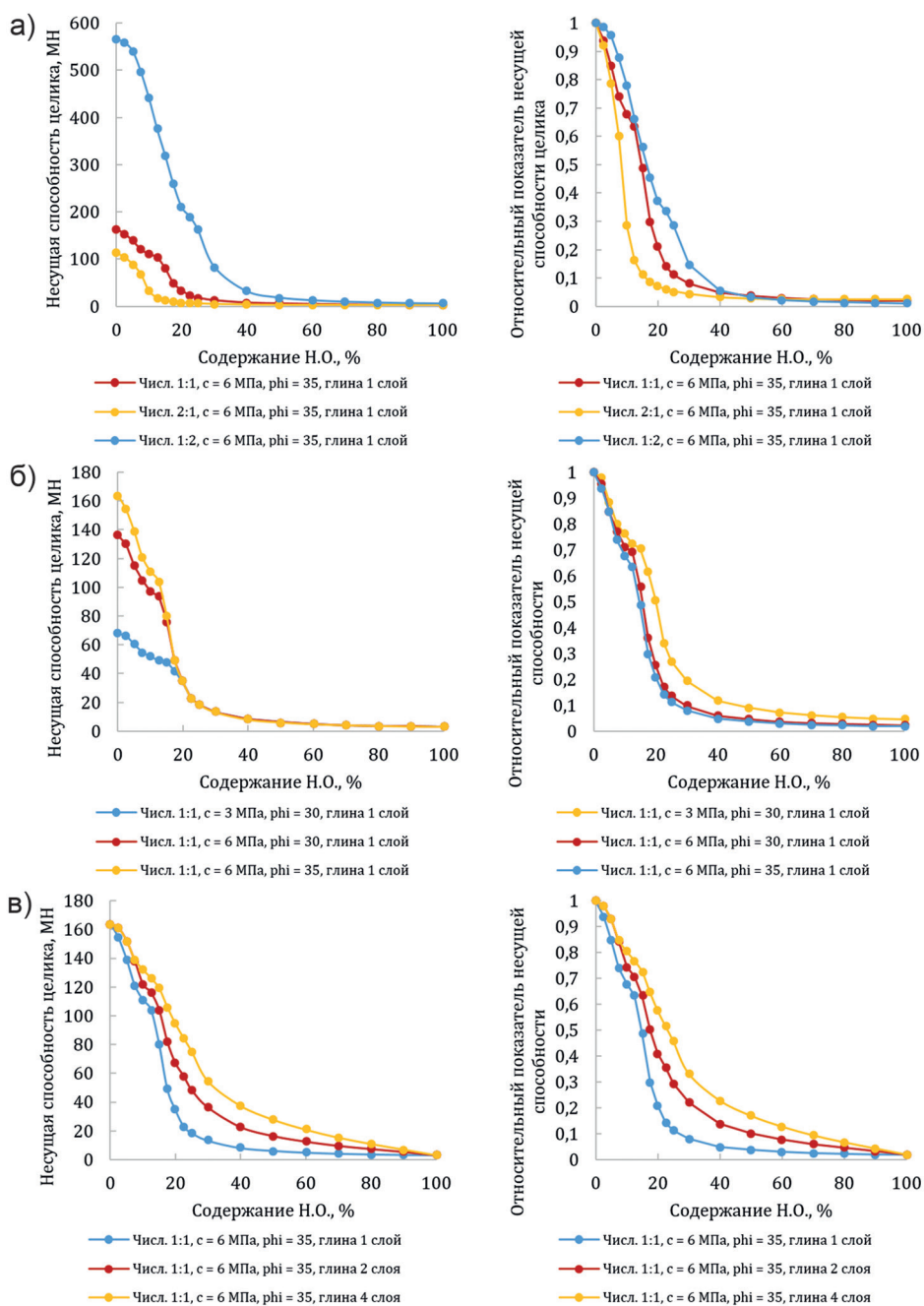


Рис. 3. Характерные зависимости изменения несущей способности междукammerного целика: от соотношения высоты целика к его ширине (а); от соотношения прочности соляных пород к прочности Н.О. (б); от количества прослоев Н.О. (в) [составлено авторами]

Fig. 3. Characteristic load-bearing capacity relationships for inter-chamber pillars: effect of the pillar height-to-width ratio (a); effect of the strength ratio between salt rock and insoluble-residue material (b); effect of the number of insoluble-residue layers (v) [compiled by the authors]

ности целика, полностью сложенного соляными породами $F_{сл}$:

$$F_{отн} = F_{гл} / F_{сл}. \quad (1)$$

С учетом некоторых допущений, принятых при идеализации механического поведения соляных пород и прослоев Н.О., и некоторого отличия в граничных условиях количественное сравнение результатов лабораторных исследований с результатами моделирования не приводится, однако картины изменения несущей способности междукамерного целика в зависимости от процентного содержания Н.О. качественно согласуются. Полученная кривая в диапазоне 0–5% содержания Н.О. имеет характерный выгиб и характеризуется увеличением скорости изменения несущей способности целика. В дальнейшем наблюдается резкое снижение несущей способности целика с ростом содержания Н.О. Верхняя граница данного участка зависит от рассматриваемых условий. Последующее увеличение содержания Н.О. характеризуется дальнейшим снижением несущей способности целика, однако вклад Н.О. в снижение ослабевает.

Рассмотрим влияние размеров целика на его несущую способность. Как видно из представленных данных (см. рис. 3, а), абсолютная величина несущей способности междукамерного целика тем выше, чем меньше соотношение между его высотой и шириной. Этот факт общеизвестен и объясняется изменением напряженного состояния пород целика при различных соотношениях его высоты и ширины. В целом, такая картина наблюдается на всем диапазоне изменения содержания Н.О. Перестроив эти зависимости через относительный показатель несущей способности целика, можно увидеть, что соотношение размеров целика не только влияет на абсолютную величину не-

сущей способности, но и несколько смещает кривую несущей способности. Установлено, что чем больше соотношение между высотой и шириной междукамерного целика, тем большее влияние оказывает содержание Н.О. на его несущую способность. Основное отличие в кривых изменения несущей способности от содержания Н.О. наблюдается в диапазоне от 5 до 40%. При дальнейшем увеличении содержания Н.О. кривые условно можно принять одинаковыми.

Изучение влияния соотношения прочности соляных пород и прочности глинистых прослоев показало (рис. 3, б), что абсолютное значение несущей способности междукамерных целиков различается в диапазоне от 0 до 20% содержания Н.О. В диапазоне 20–100% содержания Н.О. различия между кривыми не наблюдается. Данные результаты, выраженные через относительный показатель несущей способности целика, демонстрируют, что основное влияние на изменение кривой оказывает величина сцепления, в то время как угол внутреннего трения вносит меньший вклад в преобразование кривой изменения несущей способности междукамерного целика от содержания Н.О. Несмотря на некоторое расхождение кривых несущей способности, полученных при разных соотношениях прочности соляных пород и глинистых прослоев, в общем они повторяют друг друга, а различия проявляются при существенном изменении прочности одной из пород. Необходимо также отметить, что на картину развития пластических деформаций в междукамерном целике соотношение между прочностью соляных пород и глинистых прослоев не оказывает влияния.

Отдельно необходимо обратить внимание на влияние количества глинистых прослоев на несущую способность це-

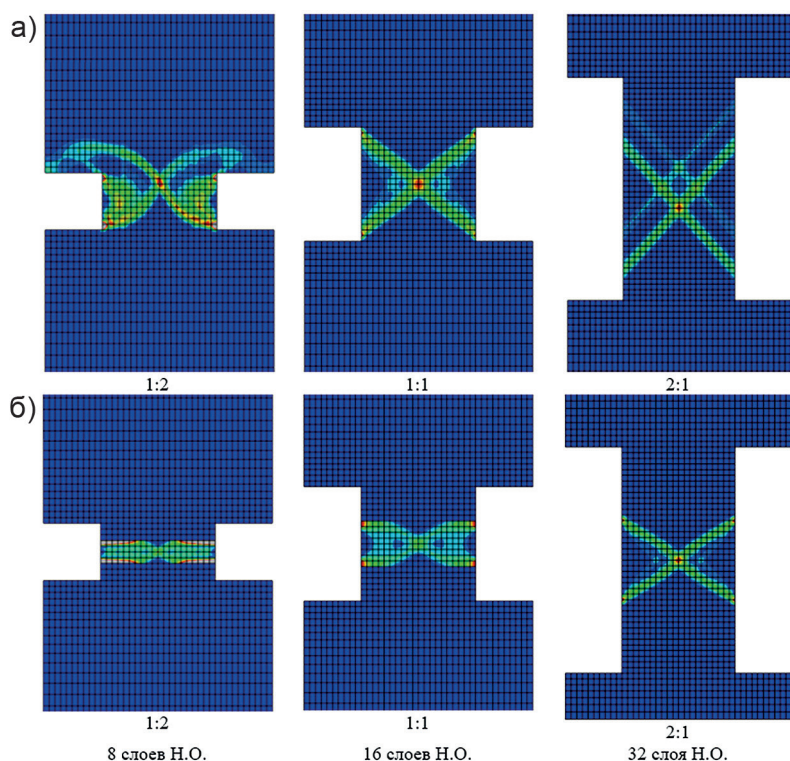


Рис. 4. Характер распределения пластических деформаций в междуканальных целиках на момент достижения его несущей способности: в зависимости от геометрических размеров целика (Н.О. 0%) (а); в зависимости от геометрических размеров целика (Н.О. 40%) (б) [составлено авторами]

Fig. 4. Plastic strain distribution patterns in inter-chamber pillars at ultimate load-bearing capacity: effect of pillar geometry, 0% insoluble residue (a); effect of pillar geometry, 40% insoluble residue (b)[compiled by the authors]

лика (рис. 3, в). Увеличение количества глинистых прослоев при неизменной величине содержания Н.О. приводит к увеличению несущей способности междуканального целика. То есть при распределении глинистых прослоев по целику наблюдается более благоприятная картина с точки зрения сохранения его несущей способности, чем в случае концентрации глинистого прослоя на одном из участков целика. С учетом того, что несущая способность при 0 и 100% содержания Н.О. соответствует прочности соляных пород и глинистой прослойки, картина изменения абсолютной и относительной несущих способностей целика в целом сопоставимы между собой. Наименьшее влияние ко-

личество глинистых прослоев оказывает на несущую способность междуканального целика в интервалах 0 – 15% и 80 – 100% содержания Н.О., а наибольшее – в диапазоне 20 – 40%.

С учетом того, что количество глинистых прослоев в породном целике может быть значительным, интересным представлялось установить зависимость между изменением несущей способности породных целиков и количеством прослоев. Как видно из представленных результатов (рис. 4, 5), наибольшее изменение наблюдается при появлении хотя бы одного глинистого прослоя. Рассматривая картину развития пластических деформаций в междуканальном целике (рис. 5, б), можно отметить, что

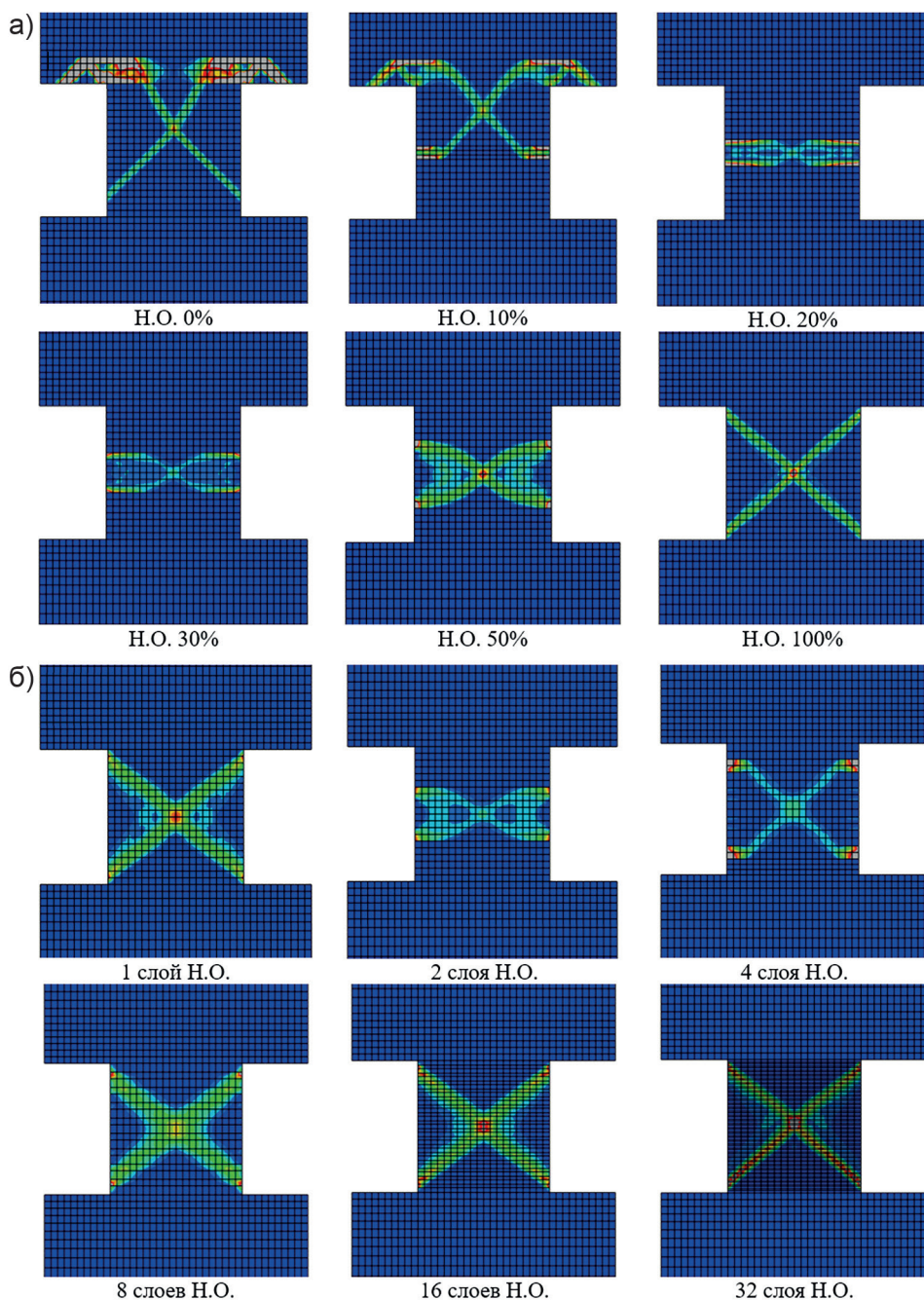


Рис. 5. Характер распределения пластических деформаций в междукammerных целиках на момент достижения его несущей способности: при расположении мощного слоя глинистых пород в кровле (а); в зависимости от количества прослоев Н.О. (Н.О. 40%) (б) [составлено авторами]

Fig. 5. Plastic strain distribution patterns in inter-chamber pillars at ultimate load-bearing capacity: effect of a thick clay layer in the chamber roof (a); effect of the number of insoluble-residue layers, 40% insoluble residue (b) [compiled by the authors]

при наличии в разрезе от 2 до 8 прослоев глинистых пород наблюдается формирование поверхностей скольжений не на всю высоту междукамерного целика, а при большем количестве прослоев не оказывается дальнейшего влияния на характер распределения пластических деформаций.

В диапазоне глинистых прослоев от 1 до 8 наблюдается нелинейная связь между несущей способностью междукамерного целика и числом прослоев.

При изменении количества глинистых прослоев с 8 до 16 наблюдается незначительное изменение несущей способности, а при переходе от 16 до 32 глинистых прослоев отмечается стабилизация несущей способности междукамерного целика. Такая картина получена при 20, 30 и 40% содержания Н.О. Таким образом, можно отметить, что при выполнении практических расчетов для установления несущей способности породных целиков необходимо

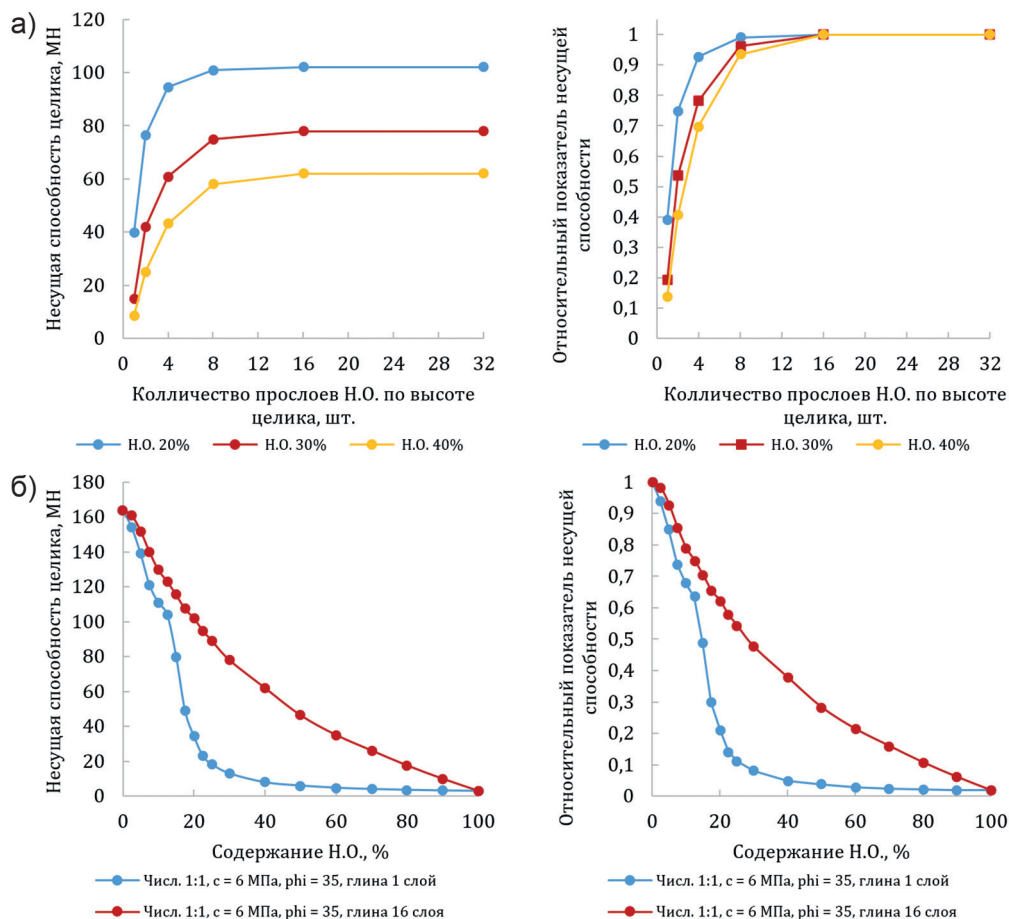


Рис. 6. Граничные значения показателей несущей способности междукамерных целиков: изменение несущей способности от количества прослоев Н.О. в целике (а); положение граничных значений несущей способности в привязке к процентному содержанию Н.О. (б) [составлено авторами]

Fig. 6. Boundary values of load-bearing capacity indicators for inter-chamber pillars: variation in load-bearing capacity with the number of insoluble-residue layers in the pillar (a); position of the boundary values of load-bearing capacity with respect to insoluble-residue content (b) [compiled by the authors]

рассматривать не более 16 глинистых прослоев.

Сравнение кривых несущей способности междукамерных целиков от содержания Н.О., полученных при 1 и 16 прослоях глинистых пород (рис. 6), показывает различие по показателю несущей способности (см. рис. 6, б), существеннее всего это проявляется в диапазоне 12,5–90,0%, где значение данного показателя может отличаться в несколько раз.

Обсуждение

Полученные результаты показывают, что использование коэффициента глинистости, основанного преимущественно на процентном содержании Н.О., является корректным только при определенных допущениях о строении и состоянии массива. Такой подход позволяет получить инженерную оценку влияния глинистого материала, однако не учитывает ряд факторов, способных существенно изменить несущую способность междукамерного целика: распределение Н.О. по высоте целика, число и мощность прослоев, соотношение прочностных характеристик соляных пород и глинистого материала, положение слабого слоя в кровле камеры, а также влажность глинистых пород. Если для конкретной структуры междукамерного целика можно установить связь между его несущей способностью и содержанием Н.О. в виде типовой кривой, то в общем случае это не так. В настоящей работе не ставилась задача получить обобщенное выражение по установлению значения коэффициента глинистости от всего набора изученных факторов, однако при выполнении дальнейших исследований в этом направлении будут проведены дополнительные работы.

Полученная на предыдущих этапах [39] зависимость прочности пород от

содержания Н.О. в целом соответствует нормативным данным при Н.О. $\leq 3\%$, однако при Н.О. $> 3\%$ фиксируется более интенсивное снижение прочности, что свидетельствует о необходимости уточнения расчетных методик для пород с повышенным содержанием глинистого материала. Критически значимым фактором, не учтенным в нормативной базе, является слоистость: единичные мощные прослои снижают несущую способность существенно, чем эквивалентные по толщине множественные тонкие прослои. Данный эффект особенно актуален для Верхнекамского месторождения с преобладанием тонкослоистых глинистых пород в междукамерных целиках.

Кроме того, глинистые породы, находящиеся в приконтурной зоне выработок, обладают повышенной водоудерживающей способностью. При увлажнении они могут терять цементационные связи, переходить в более пластичное состояние и формировать локальные зоны ослабления. В рамках настоящей модели влияние влажности непосредственно не учитывалось, поэтому полученные зависимости следует рассматривать как оценку механического влияния слоистости и прочностного контраста при заданных параметрах материала. Учет изменения свойств глинистых прослоев при увлажнении является отдельным направлением дальнейшего развития модели.

Выполненные расчеты показывают, что геометрические и геомеханические факторы оказывают влияние не только на абсолютные значения несущей способности, но и на форму зависимости этого показателя от содержания Н.О. В действующей нормативной методике такие факторы либо не учитываются напрямую, либо отражаются косвенно, что ограничивает их применение для слоистых массивов. Все это позволяет

говорить о том, что исследования по данному направлению не завершены и требует своего продолжения как в рамках экспериментальных исследований, так и в направлении совершенствования численных моделей прогноза напряженно-деформированного состояния породных целиков.

Заключение

Настоящее исследование посвящено вопросам изучения влияния содержания нерастворимого остатка на прочность соляных пород и несущую способность междукammerных целиков. В работе представлен комплексный подход к изучению данного вопроса. Выполнены лабораторные исследования, направленные на изучение влияния содержания Н.О. на прочность породы, а в рамках численного моделирования изучено влияние количества глинистых прослоев, размеры целиков, соотношения прочности соляных пород и нерастворимых включений, а также положения мощного прослоя глинистых пород в кровле выработки на несущую способность междукammerного целика.

Лабораторные исследования выявили зависимость прочности соляных пород от содержания Н.О. (0 – 100%), позволив уточнить типовую кривую коэффициента для калийных месторождений, однако существующие методики оценки несущей способности целиков требуют дальнейшей доработки на основе

расширенной экспериментально-теоретической базы.

На основании численного моделирования получен набор типовых кривых, отражающих влияние различных факторов на несущую способность породных целиков. Установлено, что полученная в рамках лабораторных экспериментов типовая кривая не может быть распространена на все варианты породных целиков с прослоями Н.О. и требует корректировки в зависимости от наиболее значимых факторов. Основное влияние на качественный характер изменения типовой кривой влияния содержания Н.О. на несущую способность целиков оказывает количество галопелитовых прослоев, в то время как на абсолютную величину данного показателя в той или иной степени влияют и все остальные исследованные факторы.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на количественную верификацию численной модели по результатам испытаний составных образцов и натурных наблюдений, а также на учет предельного деформирования, снижения прочностных параметров и зависимости свойств глинистых прослоев от процента влажности. Это позволит уточнить полученные сравнительные зависимости и использовать их для внедрения в методики оценки несущей способности целиков, что повысит геомеханическую безопасность разработки месторождений калийных солей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ge X., Huang J., Zhou K., Su K., Wang W., Li Y., Shi X. Research of interlayer dip angle effect on stability of salt cavern energy and carbon storages in bedded salt rock // *Geoenery Science and Engineering*. 2024, vol. 243, article 213291. DOI: 10.1016/j.geoen.2024.213291.
2. Yan Z., Wang Z., Wu F., Lyu C. Stability analysis of Pingdingshan pear-shaped multi-mudstone interbedded salt cavern gas storage // *Journal of Energy Storage*. 2022, vol. 56, article 105963. DOI: 10.1016/j.est.2022.105963.
3. Chen X., Li Y., Shi X., Liu Q., Xiong T. Microstructure, seepage regimes and stress-strain analysis of bedded rock salt interface // *Journal of Energy Storage*. 2025, vol. 120, article 116521. DOI: 10.1016/j.est.2025.116521.

4. Zhao Y., Wang X., Tang W., Li Y., Lin H., Wang Y., Zhang L. Creep behavior of layered salt rock under triaxial loading and unloading cycles // *Applied Rheology*. 2023, vol. 33, no. 1, article 20230103. DOI: 10.1515/arh-2023-0103.
5. Xu Y., Li L., Li C., Jiang L., Liu J. The effects of water content and dry – wet cycles of weak-interlayer soil on stability of clastic rock slope // *Geotechnical and Geological Engineering*. 2021, vol. 39, pp. 3753 – 3760. DOI: 10.1007/s10706-021-01722-1.
6. Zhang Z., Wu T. Failure modes of weak interlayers with different dip angles in red mudstone strata, Northwest China // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2023, vol. 82, article 156. DOI: 10.1007/s10064-023-03165-9.
7. Wu F., Meng T., Cao K., Zhang P., Zhang Z., Zhang C., Zhao G., Wang Z., Liu P., Wu X. Influence of layering and fracture angles on the performance of salt – gypsum composites: Implications for the safety of underground energy storage // *Energies*. 2025, vol. 18, no. 9, article 2287. DOI: 10.3390/en18092287.
8. Yang X., Qin Y., Xu N., Zhang B., Feng S., Qin J. Research on the mechanical behavior of interlayer-salt rock interface in salt cavern gas storage under storage-release cycle // *Energies*. 2025, vol. 18, no. 24, article 6497. DOI: 10.3390/en18246497.
9. Ильинов М. Д., Петров Д. Н., Карманский Д. А., Селихов А. А. Аспекты физического моделирования процессов структурных изменений образцов горных пород при термобарических условиях больших глубин // *Горные науки и технологии*. – 2023. – Т. 8. – № 4. – С. 290 – 302. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-09-150.
10. Ильинов М. Д., Коршунов В. А., Поспехов Г. Б., Шоков А. Н. Комплексные экспериментальные исследования механических свойств горных пород: проблемы и пути их решения // *Горный журнал*. – 2023. – № 5. – С. 11 – 18. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.02.
11. Trushko V. L., Baeva E. K., Blinov A. A. Experimental investigation on the mechanical properties of the frozen rocks at the Yamal Peninsula, Russian Arctic // *Eng*. 2025, vol. 6, no. 4, article 76. DOI: 10.3390/eng6040076.
12. Iovlev G., Katerov A., Andreeva A., Ageeva A. Concrete damage plasticity model application to predict stress – strain behavior of impermeable strata in deep rock salt deposits // *Geotechnics*. 2026, vol. 6, no. 2, article 45. DOI: 10.3390/geotechnics6020045.
13. Казанин О. И., Апарин А. Г., Сидоренко А. А. Обоснование параметров поэтапного анкерного крепления для повышения скорости проходки выемочных выработок на угольных шахтах // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2024. – Т. 16. – № 2. – С. 558 – 569. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-558-569.
14. Zhang Q., Song Z., Wang J., Zhang Y., Wang T. Creep properties and constitutive model of salt rock // *Advances in Civil Engineering*. 2021, vol. 2021, article 8867673. DOI: 10.1155/2021/8867673.
15. Iovlev G. A., Protosenya A. G., Petrov N. E. Determination of parameters of soil constitutive models based on field test data // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2024, vol. 60, pp. 528 – 534. DOI: 10.1007/s11204-024-09925-3.
16. Козловский Е. Я., Журавков М. А. Определение и верификация параметров расчетной модели соляных пород с учетом разупрочнения и ползучести // *Записки Горного института*. – 2021. – Т. 247. – С. 33 – 38. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.4.
17. Морозов К. В., Демёхин Д. Н., Котлов С. Н., Абашин В. И. Шахтные экспериментальные исследования фильтрационных свойств горных пород на глубоких горизонтах месторождений калийных солей для создания водозащитных перемычек // *Горный журнал*. – 2023. – № 5. – С. 25 – 31. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.04.
18. Ковальский Е. Р., Конгар-Сюрюн Ч. Б., Петров Д. Н. Проблемы и перспективы внедрения многостадийной выемки руды при отработке запасов калийных месторождений // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2023. – Т. 15. – № 2. – С. 349 – 364. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-349-364.
19. Liu Y., Zhang G., Wang Z., Li H., Zhang H., Liu K. Bipolar coordinate solution of pillar stability for salt cavern energy storage // *Computers and Geotechnics*. 2024, vol. 173, article 106506. DOI: 10.1016/j.compgeo.2024.106506.
20. Wang X., Zhang G., Li J., Xu M., Huang Y., Liu Y., Huang S., Chen L., Hong Y., Liu X., Shi X., Li Y. Pillar safety analysis and layout optimization for hydrogen storage cavern groups in bedded salt formations – A study based on thermal-hydraulic-mechanical (THM) coupling // *Geoenery Science and Engineering*. 2026, vol. 260, article 214417. DOI: 10.1016/j.geoen.2026.214417.

21. Verbilo P., Karasev M., Belyakov N., Iovlev G. Experimental and numerical research of jointed rock mass anisotropy in a three-dimensional stress field // Rudarsko-Geolosko-Naftni Zbornik. 2022, vol. 37, no. 2, pp. 109–122. DOI: 10.17794/rgn.2022.2.10.
22. Барях А. А., Девятков С. Ю., Денкевич Э. Т. Математическое моделирование развития процесса сдвигания при отработке калийных руд длинными очистными забоями // Записки Горного института. — 2023. — Т. 259. — С. 13–20. DOI: 10.31897/PMI.2023.11.
23. Рыбак Я., Хайрутдинов М. М., Кузиев Д. А., Конгар-Сюрюн Ч. Б., Бабырь Н. В. Прогнозирование геомеханического состояния массива при отработке соляных месторождений с закладкой // Записки Горного института. — 2022. — Т. 253. — С. 61–70. DOI: 10.31897/PMI.2022.2.
24. Li H., Ma H., Zhao K., Zhu S., Yang K., Zeng Z., Zheng Z., Yang C. Parameter design of the compressed air energy storage salt cavern in highly impure rock salt formations // Energy. 2024, vol. 286, article 129520. DOI: 10.1016/j.energy.2023.129520.
25. Zhang G., Liu Y., Wang T., Zhang H., Wang Z., Zhao C., Chen X. Pillar stability of salt caverns used for gas storage considering sedimentary rhythm of the interlayers // Journal of Energy Storage. 2021, vol. 43, article 103229. DOI: 10.1016/j.est.2021.103229.
26. Liu X., Pan P., Wang Z., Zhou Y., Xu D. A three-dimensional transversely isotropic equivalent continuum model for layered rock and numerical implementation // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2024, vol. 175, article 105661. DOI: 10.1016/j.ijrmm.2024.105661.
27. Chen Y., Teng J. 3DEC numerical analysis of failure characteristics for tunnel in stratified rock masses // KSCE Journal of Civil Engineering. 2024, vol. 28, no. 6, pp. 2420–2426. DOI: 10.1007/s12205-024-1318-7.
28. Li C., Zhou J., Armaghani D. J., Li X. Stability analysis of underground mine hard rock pillars via combination of finite difference methods, neural networks, and Monte Carlo simulation techniques // Underground Space. 2021, vol. 6, no. 4, pp. 379–395. DOI: 10.1016/j.undsp.2020.05.005.
29. Ram S., Waclawik P., Nemcik J., Kukutsch R., Kumar A., Singh A. K., Gong L. Mechanical behaviors of deep pillar sandwiched between strong and weak layers // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2023, vol. 15, no. 5, pp. 1111–1126. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.11.006.
30. Shen P., Tang H., Zhang B., Ning Y., He C. Investigation on the fracture and mechanical behaviors of simulated transversely isotropic rock made of two interbedded materials // Engineering Geology. 2021, vol. 286, article 106058. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106058.
31. Trushko V. L., Klimov V. Y., Baeva E. K., Ozhigin A. Y. Geomechanical substantiation of the technology of constructing modular pile foundations of technological platforms in permafrost rocks // Geotechnics. 2025, vol. 5, no. 4, article 79. DOI: 10.3390/geotechnics5040079.
32. Cui C., Gratchev I. The effect of clay infill on strength of jointed sandstone: Laboratory and analysis // Geotechnics. 2024, vol. 4, pp. 499–511. DOI: 10.3390/geotechnics4020027.
33. Nie W., Zhang J., Shi C., Yong Z., Ma G., Gong W. Experimental investigation of excavation-induced progressive failure in stratified rock mass with an intersecting weak plane // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2025, vol. 58, no. 12, pp. 12985–13004. DOI: 10.1007/s00603-025-04767-3.
34. Xia K., Ren R., Liu F. Numerical analysis of mechanical behavior of stratified rocks containing a single flaw by utilizing the particle flow code // Engineering Analysis with Boundary Elements. 2022, vol. 137, pp. 91–104. DOI: 10.1016/j.engabound.2022.01.015.
35. Ha J., Tatone B. S. A., Gaspari G. M., Grasselli G. Simulating tunnel support integrity using FEM and FDEM based on laboratory test data // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021, vol. 111, article 103848. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103848.
36. Protosenya A., Ivanov A. Data-driven prediction of stress–strain fields around interacting mining excavations in jointed rock: A comparative study of surrogate models // Mining. 2026, vol. 6, no. 1, article 4. DOI: 10.3390/mining6010004.
37. Li Y., Song L., Tang Y., Zuo J., Xue D. Evaluating the mechanical properties of anisotropic shale containing bedding and natural fractures with discrete element modeling // International Journal of Coal Science and Technology. 2022, vol. 9, article 18. DOI: 10.1007/s40789-022-00473-5.
38. Meng Y., Jing H., Liu X., Yin Q., Wei X. Experimental and numerical investigation on the effects of bedding plane properties on the mechanical and acoustic emission characteristics of sandy mudstone // Engineering Fracture Mechanics. 2021, vol. 245, article 107582. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2021.107582.
39. Рысин А. И., Лебедева А. М., Откупщикова И. А., Нуртдинов А. С. Закономерности изменения прочностных параметров соляных пород вследствие повышения содержания галопелитов // Горный журнал. — 2025. — № 3. — С. 19–27. DOI: 10.17580/gzh.2025.03.03. **ПЧБ**

REFERENCES

1. Ge X., Huang J., Zhou K., Su K., Wang W., Li Y., Shi X. Research of interlayer dip angle effect on stability of salt cavern energy and carbon storages in bedded salt rock. *Geoenergy Science and Engineering*. 2024, vol. 243, article 213291. DOI: 10.1016/j.geoen.2024.213291.
2. Yan Z., Wang Z., Wu F., Lyu C. Stability analysis of Pingdingshan pear-shaped multi-mudstone interbedded salt cavern gas storage. *Journal of Energy Storage*. 2022, vol. 56, article 105963. DOI: 10.1016/j.est.2022.105963.
3. Chen X., Li Y., Shi X., Liu Q., Xiong T. Microstructure, seepage regimes and stress-strain analysis of bedded rock salt interface. *Journal of Energy Storage*. 2025, vol. 120, article 116521. DOI: 10.1016/j.est.2025.116521.
4. Zhao Y., Wang X., Tang W., Li Y., Lin H., Wang Y., Zhang L. Creep behavior of layered salt rock under triaxial loading and unloading cycles. *Applied Rheology*. 2023, vol. 33, no. 1, article 20230103. DOI: 10.1515/arh-2023-0103.
5. Xu Y., Li L., Li C., Jiang L., Liu J. The effects of water content and dry – wet cycles of weak-interlayer soil on stability of clastic rock slope. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2021, vol. 39, pp. 3753 – 3760. DOI: 10.1007/s10706-021-01722-1.
6. Zhang Z., Wu T. Failure modes of weak interlayers with different dip angles in red mudstone strata, Northwest China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2023, vol. 82, article 156. DOI: 10.1007/s10064-023-03165-9.
7. Wu F., Meng T., Cao K., Zhang P., Zhang Z., Zhang C., Zhao G., Wang Z., Liu P., Wu X. Influence of layering and fracture angles on the performance of salt – gypsum composites: Implications for the safety of underground energy storage. *Energies*. 2025, vol. 18, no. 9, article 2287. DOI: 10.3390/en18092287.
8. Yang X., Qin Y., Xu N., Zhang B., Feng S., Qin J. Research on the mechanical behavior of inter-layer-salt rock interface in salt cavern gas storage under storage-release cycle. *Energies*. 2025, vol. 18, no. 24, article 6497. DOI: 10.3390/en18246497.
9. Ilyinov M. D., Petrov D. N., Karmanskiy D. A., Selikhov A. A. Aspects of physical modeling of structural changes in rock samples under thermobaric conditions of great depths. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023, vol. 8, no. 4, pp. 290 – 302. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-09-150.
10. Ilyinov M. D., Korshunov V. A., Pospekhov G. B., Shokov A. N. Comprehensive experimental studies of rock mechanical properties: problems and ways of their solution. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 5, pp. 11 – 18. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.02.
11. Trushko V. L., Baeva E. K., Blinov A. A. Experimental investigation on the mechanical properties of the frozen rocks at the Yamal Peninsula, Russian Arctic. *Eng.* 2025, vol. 6, no. 4, article 76. DOI: 10.3390/eng6040076.
12. Iovlev G., Katerov A., Andreeva A., Ageeva A. Concrete damage plasticity model application to predict stress – strain behavior of impermeable strata in deep rock salt deposits. *Geotechnics*. 2026, vol. 6, no. 2, article 45. DOI: 10.3390/geotechnics6020045.
13. Kazanin O. I., Aparin A. G., Sidorenko A. A. Substantiation of parameters of staged rock bolting to increase the drivage rate of mine workings at coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 2, pp. 558 – 569. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-558-569.
14. Zhang Q., Song Z., Wang J., Zhang Y., Wang T. Creep properties and constitutive model of salt rock. *Advances in Civil Engineering*. 2021, vol. 2021, article 8867673. DOI: 10.1155/2021/8867673.
15. Iovlev G. A., Protosenya A. G., Petrov N. E. Determination of parameters of soil constitutive models based on field test data. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2024, vol. 60, pp. 528 – 534. DOI: 10.1007/s11204-024-09925-3.
16. Kozlovskiy E., Zhuravkov M. Determination and verification of the calculated model parameters of salt rocks taking into account softening and plastic flow. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 247, pp. 33 – 38. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.4.
17. Morozov K. V., Demyokhin D. N., Kotlov S. N., Abashin V. I. Mine experimental studies of filtration properties of rocks at deep horizons of potash salt deposits for creation of waterproof bulkheads. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 5, pp. 25 – 31. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.04.
18. Kovalskiy E. R., Kongar-Syuryun Ch. B., Petrov D. N. Problems and prospects of introducing multistage ore extraction in mining potash deposits. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 2, pp. 349 – 364. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-349-364.

19. Liu Y., Zhang G., Wang Z., Li H., Zhang H., Liu K. Bipolar coordinate solution of pillar stability for salt cavern energy storage. *Computers and Geotechnics*. 2024, vol. 173, article 106506. DOI: 10.1016/j.compgeo.2024.106506.
20. Wang X., Zhang G., Li J., Xu M., Huang Y., Liu Y., Huang S., Chen L., Hong Y., Liu X., Shi X., Li Y. Pillar safety analysis and layout optimization for hydrogen storage cavern groups in bedded salt formations – A study based on thermal-hydraulic-mechanical (THM) coupling. *Geoenergy Science and Engineering*. 2026, vol. 260, article 214417. DOI: 10.1016/j.geoen.2026.214417.
21. Verbilo P., Karasev M., Belyakov N., Iovlev G. Experimental and numerical research of jointed rock mass anisotropy in a three-dimensional stress field. *Rudarsko-Geolosko-Naftni Zbornik*. 2022, vol. 37, no. 2, pp. 109–122. DOI: 10.17794/rgn.2022.2.10.
22. Baryakh A. A., Devyatkov S. Yu., Denkevich E. T. Mathematical modeling of subsidence development during potash ore mining by longwall faces. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 259, pp. 13–20. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.11.
23. Rybak J., Khayrutdinov M., Kuziev D., Kongar-Syuryun C., Babyr N. Prediction of the geomechanical state of the rock mass when mining salt deposits with stowing. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 253, pp. 61–70. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.2.
24. Li H., Ma H., Zhao K., Zhu S., Yang K., Zeng Z., Zheng Z., Yang C. Parameter design of the compressed air energy storage salt cavern in highly impure rock salt formations. *Energy*. 2024, vol. 286, article 129520. DOI: 10.1016/j.energy.2023.129520.
25. Zhang G., Liu Y., Wang T., Zhang H., Wang Z., Zhao C., Chen X. Pillar stability of salt caverns used for gas storage considering sedimentary rhythm of the interlayers. *Journal of Energy Storage*. 2021, vol. 43, article 103229. DOI: 10.1016/j.est.2021.103229.
26. Liu X., Pan P., Wang Z., Zhou Y., Xu D. A three-dimensional transversely isotropic equivalent continuum model for layered rock and numerical implementation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2024, vol. 175, article 105661. DOI: 10.1016/j.ijrmm.2024.105661.
27. Chen Y., Teng J. 3DEC numerical analysis of failure characteristics for tunnel in stratified rock masses. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2024, vol. 28, no. 6, pp. 2420–2426. DOI: 10.1007/s12205-024-1318-7.
28. Li C., Zhou J., Armaghani D. J., Li X. Stability analysis of underground mine hard rock pillars via combination of finite difference methods, neural networks, and Monte Carlo simulation techniques. *Underground Space*. 2021, vol. 6, no. 4, pp. 379–395. DOI: 10.1016/j.undsp.2020.05.005.
29. Ram S., Wacławik P., Nemcik J., Kukutsch R., Kumar A., Singh A. K., Gong L. Mechanical behaviors of deep pillar sandwiched between strong and weak layers. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023, vol. 15, no. 5, pp. 1111–1126. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.11.006.
30. Shen P., Tang H., Zhang B., Ning Y., He C. Investigation on the fracture and mechanical behaviors of simulated transversely isotropic rock made of two interbedded materials. *Engineering Geology*. 2021, vol. 286, article 106058. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106058.
31. Trushko V. L., Klimov V. Y., Baeva E. K., Ozhigin A. Y. Geomechanical substantiation of the technology of constructing modular pile foundations of technological platforms in permafrost rocks. *Geotechnics*. 2025, vol. 5, no. 4, article 79. DOI: 10.3390/geotechnics5040079.
32. Cui C., Gratchev I. The effect of clay infill on strength of jointed sandstone: Laboratory and analysis. *Geotechnics*. 2024, vol. 4, pp. 499–511. DOI: 10.3390/geotechnics4020027.
33. Nie W., Zhang J., Shi C., Yong Z., Ma G., Gong W. Experimental investigation of excavation-induced progressive failure in stratified rock mass with an intersecting weak plane. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2025, vol. 58, no. 12, pp. 12985–13004. DOI: 10.1007/s00603-025-04767-3.
34. Xia K., Ren R., Liu F. Numerical analysis of mechanical behavior of stratified rocks containing a single flaw by utilizing the particle flow code. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2022, vol. 137, pp. 91–104. DOI: 10.1016/j.engabound.2022.01.015.
35. Ha J., Tatone B. S. A., Gaspari G. M., Grasselli G. Simulating tunnel support integrity using FEM and FDEM based on laboratory test data. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021, vol. 111, article 103848. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103848.
36. Protosenya A., Ivanov A. Data-driven prediction of stress–strain fields around interacting mining excavations in jointed rock: A comparative study of surrogate models. *Mining*. 2026, vol. 6, no. 1, article 4. DOI: 10.3390/mining6010004.

37. Li Y., Song L., Tang Y., Zuo J., Xue D. Evaluating the mechanical properties of anisotropic shale containing bedding and natural fractures with discrete element modeling. *International Journal of Coal Science and Technology*. 2022, vol. 9, article 18. DOI: 10.1007/s40789-022-00473-5.

38. Meng Y., Jing H., Liu X., Yin Q., Wei X. Experimental and numerical investigation on the effects of bedding plane properties on the mechanical and acoustic emission characteristics of sandy mudstone. *Engineering Fracture Mechanics*. 2021, vol. 245, article 107582. DOI: 10.1016/j.engfrac-mech.2021.107582.

39. Rysin A. I., Lebedeva A. M., Otkupshchikova I. A., Nurtadinov A. S. Regularities of changes in strength parameters of salt rocks due to increased halopelite content. *Gornyi Zhurnal*. 2025, no. 3, pp. 19–27. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.03.03.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Карасев Максим Анатольевич¹ — д-р техн. наук, доцент, профессор, e-mail: karasev_MA@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0001-8939-0807,

Откупщикова Ирина Александровна¹ — аспирант,

e-mail: otkupschikova2015@gmail.com,

ORCID ID: 0009-0002-6232-8733,

Рысин Александр Игоревич² — руководитель лаборатории,

e-mail: aleksandr.rysin@pte.eurochem.ru,

ORCID ID: 0009-0005-3489-2195,

Лебедева Анастасия Михайловна — аспирант,

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,

e-mail: amlebedeva07@gmail.com,

ORCID ID: 0009-0005-8046-364X,

Нуртдинов Антон Сергеевич² — главный специалист,

e-mail: anton.nurtdinov@pte.eurochem.ru,

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,

² ООО «ПроТех Инжиниринг».

Для контактов: Откупщикова И.А., e-mail: otkupschikova2015@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.A. Karasev¹, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Professor,

e-mail: karasev_MA@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0001-8939-0807,

I.A. Otkupshchikova¹, Graduate Student,

e-mail: otkupschikova2015@gmail.com,

ORCID ID: 0009-0002-6232-8733,

A.I. Rysin², Head of Laboratory,

e-mail: aleksandr.rysin@pte.eurochem.ru,

ORCID ID: 0009-0005-3489-2195,

A.M. Lebedeva, Graduate Student, Lomonosov Moscow State University,

119991, Moscow, Russia, e-mail: amlebedeva07@gmail.com,

ORCID ID: 0009-0005-8046-364X,

A.S. Nurtdinov², Chief Specialist,

e-mail: anton.nurtdinov@pte.eurochem.ru,

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,

199106, Saint-Petersburg, Russia,

² LLC «ProTech Engineering», 199178, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: I.A. Otkupshchikova, e-mail: otkupschikova2015@gmail.com.

Получена редакцией 22.04.2026; получена после рецензии 04.06.2026; принята к печати 10.10.2026.

Received by the editors 22.04.2026; received after the review 04.06.2026; accepted for printing 10.10.2026.