

Обоснование параметров инновационных технологий формирования монолитных закладочных массивов для комплексного освоения глубокозалегающих месторождений калийных солей

П. О. Зубков✉

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова»
Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация
✉ paschazubckov@yandex.ru*

Резюме. При отработке калийных солей на глубинах 900–1100 м устойчивость очистных камер, междукammerных целиков и водозащитной толщи в значительной мере определяется полнотой заполнения выработанного пространства и сроком возведения закладочного массива, способного нагружаться совместно с вмещающими соляными породами. Традиционная гидравлическая закладка при сложной морфологии силвинитового пласта не обеспечивает своевременного формирования из закладочной смеси конструктивного элемента системы разработки из-за длительного отставания закладочных работ, образования прикровельных пустот и недостаточной жесткости формируемого закладочного массива. В статье обоснованы параметры инновационной технологии возведения монолитного консолидированного закладочного массива на основе кристаллизации солеотходов обогащения силвинитов с локальным упрочнением прикровельной зоны цементсодержащей смеси. Исследования выполнены на примере Гремячинского месторождения калийных солей. Использованы результаты лабораторных испытаний, натурного мониторинга, опытно-промышленных изысканий и численного геомеханического моделирования. Установлен рациональный состав закладочной смеси: 1 780 кг/м³ солеотходов и 280 кг/м³ оборотного рассола, при котором обеспечивается консолидация смеси и достижение прочности закладочного массива более 3 МПа к 90-м суткам. Доказано, что полное заполнение камеры снижает вертикальную конвергенцию кровли и почвы до 5,4 раза по сравнению с незаложенным состоянием. Увеличение прикровельного недозаклада с 0,2 до 0,6 м приводит к росту зон неупругих деформаций, причем наиболее чувствительным элементом является кровля. Для камер шириной 6 м предложено вести выемку пласта мощностью 3 м одной проходкой комбайна, а при мощности 3–13 м – нисходящими проходами с последующей закладкой на всю высоту камеры. Фаза готовой смеси производится по трубопроводу, закрепленному в кровле камеры из верхней точки. Прикровельная зона дозаполняется смесью с добавлением цемента 200 кг/м³, имеющей подвижность 8 см. Разработанные решения обеспечивают максимальное заполнение камеры, ограничение развития зон неупругих деформаций и возможность поэтапного вовлечения запасов междукammerных целиков в эксплуатацию.

Ключевые слова: калийные соли, монолитный закладочный массив, консолидированная закладка, солеотходы, прикровельный недозаклад, пневматический транспорт, междукammerный целик, геомеханическое моделирование

Для цитирования: Зубков П.О. Обоснование параметров инновационных технологий формирования монолитных закладочных массивов для комплексного освоения глубокозалегающих месторождений калийных солей. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (4): 83-93. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-4-83-93>.

Substantiation of the parameters of innovative technologies for forming monolithic backfill masses for the integrated development of deep-seated potash deposits

P. O. Zubkov✉

Academician N. V. Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ paschazubckov@yandex.ru

Abstract. The stability of mining chambers, interchamber pillars, and the water-protective strata during potash mining at depths of 900–1100 m is largely governed by the degree of backfill placement and the time required to form a backfill mass capable of interacting mechanically with the surrounding salt rock mass. Under conditions of complex sylvinite seam morphology, conventional hydraulic backfilling fails to ensure the timely formation of a structural element of the mining system due to the significant delay in backfilling operations, the formation of roof voids, and the insufficient stiffness of the resulting backfill mass. This paper substantiates the parameters of an innovative technology for constructing a monolithic consolidated backfill mass based on the crystallization of sylvinite processing waste with local reinforcement of the roof-contact zone using a cement-containing mixture. The investigations were carried out using the Gremyachinskoye potash deposit as a case study. The research methodology included laboratory testing, in situ monitoring, pilot-scale investigations, and numerical geomechanical modeling. The optimum composition of the backfill mixture was established to be 1780 kg/m³ of sylvinite processing waste and 280 kg/m³ of recycled brine, providing effective consolidation and enabling the backfill mass to achieve a compressive strength exceeding 3 MPa after 90 days of curing. It was demonstrated that complete filling of the mining chamber reduces the vertical convergence of the roof and floor by up to 5.4 times compared with an unfilled chamber. An increase in the roof-contact underfill from 0.2 m to 0.6 m results in a significant expansion of inelastic deformation zones, with the roof being the most sensitive structural element. For chambers 6 m wide, a single-pass mining method is recommended for seam thicknesses of 3 m, whereas seams 3–13 m thick should be extracted by descending mining passes followed by full-height backfilling. The prepared backfill mixture is pneumatically delivered through a pipeline fixed to the roof and discharged from the uppermost point of the chamber. The roof-contact zone is subsequently filled with a cement-containing mixture incorporating 200 kg/m³ of cement and having a slump of 8 cm. The proposed technological solutions ensure maximum chamber filling, limit the development of inelastic deformation zones, and enable the phased extraction of interchamber pillar reserves.

Keywords: potash deposits; monolithic consolidated backfill mass; consolidated backfilling; sylvinite processing waste; roof-contact underfill; pneumatic transport; interchamber pillar; geomechanical modeling

For citation: Zubkov P.O. Substantiation of the parameters of innovative technologies for forming monolithic backfill masses for the integrated development of deep-seated potash deposits. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (4): 83-93. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-4-83-93>.

Введение

Рост глубины разработки месторождений калийных солей сопровождается усложнением исходного напряженного состояния массива горных пород, усилением реологических проявлений к техногенным деформациям. Известно, что для соляных пород характерны ползучие, зависимость прочности от времени и влажности, а также перераспределение нагрузок в породах и закладочном массиве. Поэтому закладка выработанного пространства должна рассматриваться не только как способ размещения отходов, но и как элемент геотехнологии, параметры которой определяют устойчивость массива горных пород и полноту извлечения запасов месторождения [1–10].

Гремячинское месторождение отличается высокой глубиной залегания продуктивного пласта (900–1100 м), переменной мощностью сильвинитовой залежи (3–13 м) и сложной волнистой либо куполообразной морфологией кровли и почвы, наличием флексурных нарушений. Камерно-целиковая система отработки с гидрозакладкой предусматривает ширину камеры 6 м и ограничение межкамерных и барьерных целиков расчетными коэффициентами, однако длительное

отставание закладки от очистной выемки и наличие прикровельной незаполненной зоны не позволяют своевременно передавать горное давление на закладочный массив [1, 2, 11, 12].

Слабым местом проекта является допущение, что факт заполнения камеры автоматически означает формирование несущего массива. Это неверно. Геомеханический эффект определяется не объемом размещенного материала как таковым, а сочетанием полноты заполнения, плотности, деформационных характеристик, прочности, закладочного массива и его контактом с кровлей. При наличии даже сравнительно небольшой прикровельной пустоты закладочный массив длительное время не участвует в совместном деформировании с породным массивом, а лишь создает боковой отпор.

Цель исследования заключалась в обосновании технологических и геомеханических параметров формирования монолитного закладочного массива, обеспечивающего максимально возможное заполнение камер, локальное упрочнение прикровельной зоны и возможность безопасного вовлечения части запасов межкамерных целиков в эксплуатацию [3, 12].

**Систематизация геотехнологических факторов
и условия применения монолитной закладки
на основе солеотходов**

Сопоставление отечественного и зарубежного опыта разработки калийных месторождений показывает, что выбор системы разработки и параметров закладочных работ определяется не одним фактором, а сочетанием горно-геологических и геомеханических условий. Наиболее существенное влияние оказывают глубина залегания продуктивного пласта, температурный режим массива, мощность и состояние водозащитной толщи, а также морфология и изменчивость мощности калийной залежи. Для обобщения указанных факторов и оценки их влияния на выбор технологии закладки выполнена систематизация основных геотехнологических условий освоения соляных месторождений, приведенная в таблице 1.

Анализ данных таблицы 1 свидетельствует, что Гремячинское месторождение характеризуется сочетанием факторов, существенно осложняющих выбор технологии добычи и закладки: большой глубиной разработки, повышенной температурой массива, изменчивостью мощности водозащитной толщи и резко изменчивой морфологией продуктивного пласта. Негативное влияние такого сочетания усиливается ползучестью соляных пород, что ускоряет развитие деформационных процессов в техногенно изменяемом массиве. В этих условиях традиционные схемы разработки с применением гидравлической закладки, разработанные и широко апробированные для месторождений, залегающих на меньших глубинах, не в полной мере обеспечивают требуемую устойчивость горнотехнических решений и требуют совер-

шенствования применительно к глубокозалегающим сложноструктурным соляным месторождениям

Выбор параметров технологии закладки выполнен с учетом глубины разработки, мощности и морфологии продуктивного пласта, размеров камер и целиков, физико-механических свойств соляных и вмещающих пород, водозащитной толщи и доступного объема солеотходов, мощности пласта сильвинита. При мощности пласта 3 м камера может быть отработана одним проходом комбайна. При мощности пласта более 3 м сплошная выемка на полную высоту формирует чрезмерно высокий незакрепленный контур и повышает вероятность развития неупругих деформаций, поэтому рациональной является нисходящая выемка с последующей закладкой на всю высоту [1–3] (табл. 2).

Основной объем камеры заполняется консолидируемой смесью на базе исключительно солеотходов, для которой необходимы высокая плотность укладки и равномерность распределения. Прикровельная зона заполняется смесью с повышенной подвижностью, способной проникать в локальные участки пустот в кровле и иметь более высокие темпы набора прочности.

Материал и методы исследования

Обоснование параметров геотехнологии выполнено по многоуровневой схеме. На первом этапе были исследованы гранулометрические, минералогические и физико-механические свойства солеотходов, а также динамика консолидации образцов при различном расходе рассола. На втором этапе проведены испытания образцов при одноосном и объемном сжатии для определения модуля деформации, коэффициента Пуассона, сцепления и угла внутреннего трения. На третьем этапе изучались результаты натурного мониторинга конверген-

Таблица 1 / Table 1

**Систематизация геотехнологических факторов, влияющих на выбор геотехнологии освоения
глубокозалегающих соляных месторождений /
Systematization of geotechnological factors influencing the selection of a mining technology f
or the development of deep-seated salt deposits**

Параметр	Верхнекамское	Беларуськалий	Зарубежные (Германия, Канада)	Гремячинское	Геомеханическое следствие
Глубина залегания продуктивного пласта, м	300–600	600–1000	До 1 200	900–1100	Рост вертикальных напряжений
Температура соляного массива, °C	15–20	20–25	20–30	30–40	Ускорение реологических процессов
Мощность ВЗТ, м	150–400	200–350	100–300	60–325	Повышенные требования к сохранности
Характеристика морфологии пласта	Выдержанная	Умеренно изменчивая	Различная	Резко изменчивая	Неравномерное перераспределение нагрузок

Таблица 2 / Table 2

Основные характеристики геотехнологии / Main Characteristics of the Proposed Mining Technology

Параметр	Принятое значение	Геотехнологическое значение
Глубина кровли пласта	900–1100 м	Высокий уровень горного давления и реологических деформаций
Мощность сильвинитового пласта	3–13 м	Определяет число проходок и порядок закладки
Ширина очистной камеры	6 м	Согласована с комбайновой выемкой и параметрами целиков
Схема выемки при мощности 3 м	Одна проходка	Минимальное время существования незаложенной камеры
Схема выемки при мощности 3–13 м	Нисходящие проходки	Ограничение высоты свободного контура
Расчетный прикровельный недозаклад	Не более 0,3 м	Условие своевременного включения массива в работу
Основной материал	Солеотходы обогащения сильвинита	Утилизация отходов и формирование несущего массива
Упрочненная прикровельная смесь	200 кг цемента/м³, подвижность 8 см	Заполнение сложнопрофильной прикровельной зоны

ции горных выработок для калибровки численной модели. На четвертом этапе выполнено геомеханическое моделирование одиночных камер и группы камер в панели при изменении высоты, типа закладки и величины прикровельного недозаклада. Предлагаемые технологические решения были проверены при опытно-промышленном формировании закладочных консолидированных массивов механизированным и пневматическим способами в поверхностных траншеях и подземных нишах. Исходные физико-механические свойства среды, используемые при моделировании, приведены в таблице 3.

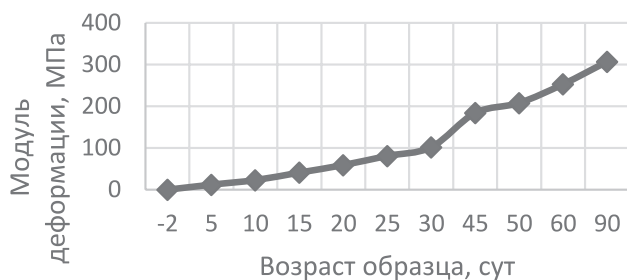


Рис. 1. Значения модуля деформации, полученные при испытании кубических образцов при одноосном сжатии в динамике / Fig. 1. Deformation modulus values obtained during uniaxial compression testing of cubic specimens over time

Критерием выделения области влияния очистной выработки принималась относительная деформация, превышающая $0,5 \cdot 10^{-3}$. Зоны неупругих деформаций определялись по достижении предельного состояния согласно принятой упругопластической модели. При сравнении вариантов контролировались размеры зон в кровле, почве и стенках, концентрация вертикальных и горизонтальных напряжений, а также конвергенция контура камеры. Используемые при геомеханическом моделировании состояния нелинейной деформируемой среды положения приведены ниже.

Моделирование процессов ползучести и разрушения нелинейно-упругой среды

Классическая схема метода конечных элементов предполагает моделирование только линейно-упругих сред.

При этом связь напряжений и деформаций определяется законом Гука, который в матричной форме записывается в следующем виде

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}) + \{\sigma_0\}, \quad (1)$$

где $\{\sigma\}$ и $\{\sigma_0\}$ — соответственно компоненты тензоров полных и начальных напряжений; $\{\varepsilon\}$ и $\{\varepsilon_0\}$ — компоненты тензоров полных и начальных деформаций; $[D]$ — матрица упругости, определяющая связь напряжений и деформаций и зависящая только от решаемой задачи и свойств среды.

За счет применения итерационных схем правомерно распространить линейные решения на линейные задачи. Распространение метода конечных элементов на решение нелинейных задач состоит в подборе таких значений $[D]$, $\{\varepsilon\}$ и $\{\sigma_0\}$ для соотношения (1), при которых решение соответствующей линейной задачи будет близко к искомому нелинейному решению [13, 14]. Подбор матрицы жесткости или компонент тензоров начальных деформаций и напряжений осуществляется методом итераций, причем на каждой итерации среда считается линейно-упругой. Метод, заключающийся в подборе $\{\varepsilon\}$, называется методом начальных деформаций, метод начальных напряжений предполагает поиск компонент тензора $\{\sigma_0\}$. Поиск элементов матрицы упругости $[D]$ определяет метод варьируемой жесткости.

При расчетах параметров целиков и оценке напряженно-деформированного состояния (НДС) массива в условиях Гремячинского месторождения использовался метод варьируемой жесткости. Метод был обоснован еще в 1948 году А. А. Ильиным и назывался тогда «методом упругих решений». Позже в геомеханических исследованиях появилась новая формулировка: «метод секущей жесткости» [15–19].

Суть метода состоит в последовательном изменении модуля деформации на каждой итерации расчетов. На первом шаге решается линейно-упругая задача с начальными значениями модуля деформации E_0 и соответствующего ему модулю сдвига G_0 . Затем проводится проверка всех элементов на выполнение выбранного критерия прочности, например критерия Кулона – Мора. Момент начала пластических деформаций определяется по паспорту прочности (рис. 2). На кривой напряжение – деформация находится точка А, соответствующая напряжению сдвига τ_c и касательной предельной деформации γ_c , рассчитанной в этом элементе в момент его разрушения.

По этим данным рассчитывается новый (секущий) модуль сдвига G :

$$G = \tau_c / \gamma_c. \quad (2)$$

Задавшись законом изменения коэффициента Пуассона ν (обычно его принимают неизменным в течение всего итерационного процесса), по секущему модулю сдвига рассчитывается секущий модуль деформации:

$$E = 2G(1 + \nu). \quad (3)$$

После вычисления новых (секущих) упругих констант всех элементов, перешедших в пластическое состояние, реализуется следующая итерация решения новой упругой задачи. Процесс повторяется до тех пор, пока напряженное состояние во всех элементах не будет с заданной точностью удовлетворять критерию прочности.

Таблица 3 / Table 3

Физико-механические характеристики среды, использованные при моделировании / Physical and Mechanical Properties of the Materials Used in Numerical Modeling

Материал	Модуль деформации, ГПа	Коэффициент Пуассона	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град.
Сильвинит	1,0	0,30	7,5	29
Каменная соль	1,2–1,5	0,30–0,35	5,0–8,0	25–30
Карналлитсодержащие породы	1,1	0,38	3,6	18
Консолидированный закладочный массив	По результатам испытаний (рис. 1)	По результатам испытаний	Калибруется	Калибруется

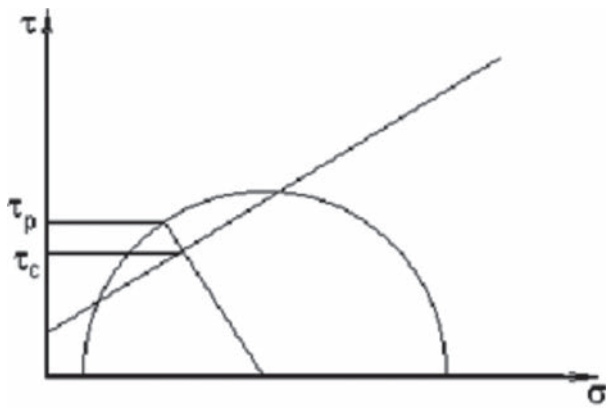


Рис. 2. Паспорт прочности пород для решения нелинейно-упругой задачи методом секущей жесткости: τ_c – напряжение сдвига; σ_c – сдвиговая деформация, соответствующая моменту разрушения /

Fig. 2. Rock strength envelope used for solving the nonlinear elastic problem by the secant stiffness method: τ_c – shear stress; σ_c – shear strain corresponding to failure

При моделировании исходили из того, что закладочная смесь, размещенная в отработанную камеру, первоначально не нагружена ни силой тяжести налегающих пород, ни действующими в массиве горизонтальными силами. При дальнейшей отработке запасов панели происходит дополнительное деформирование вмещающего массива, приводящее к нагружению закладки. Особенностью деформирования закладочного массива является его более низкий по сравнению с вмещающими породами модуль деформации. При этом вмещающие породы не полностью передают нагрузку на закладочный массив, что определяет его деформирование в режиме заданной деформации [20, 21].

Учет последовательности отработки запасов и формирования закладочного массива на НДС породного и закладочного массивов также осуществляется за счет выполнения серии итераций, на каждой из которых последовательно решается линейно-упругая задача.

Авторами [16, 22, 23] в основу решения было положено использование методов начальных деформаций или начальных напряжений, определяемых соотношением (1). Сам же метод расчета был назван авторами методом последовательных циклов (итераций).

Схема расчета базируется на вычислении дополнительных напряжений, вызываемых отработкой очередного блока, и суммировании этих напряжений с начальными напряжениями.

Расчетная схема выглядит следующим образом:

1. Для каждого из блоков закладочного массива рассчитываются тензоры начальных напряжений и деформаций, определяемые силой тяжести закладки в условиях ограниченного бокового расширения. Результаты расчетов в виде стандартных результатов по элементам для каждого блока записываются в отдельный файл.

2. Для первой вынимаемой камеры блока обычным образом решается задача о распределении напряжений и деформаций в ее окрестности. Всем конечным элементам, находящимся в пределах этой камеры, присваивается пренебрежимо малый (нулевой) модуль деформации. В случае моделирования весомой среды на контуре камеры задается отпор, определяемый весом закладочного массива и его коэффициентом Пуассона. Расчет для каждого элемента определяются компоненты полных напряжений и деформа-

ций. Полученный вектор стандартных результатов соответствует периоду завершения отработки камеры.

3. В найденном векторе результаты расчетов для всех элементов, находящихся в контуре выработанного пространства, до закладки и заполнения закладочной смесью, заменяются результатами расчета элементов (при моделировании невесомой среды – заменяются нулями). Полученный вектор результатов определяет компоненты полных напряжений и деформаций на момент отработки камеры и заполнения ее закладочным массивом.

4. При вычислении дополнительных деформаций и напряжений, вызываемых выемкой запасов следующей камеры (заходки), обнуляются модули деформации элементов, находящихся в контуре обрабатываемой камеры, а из стандартных результатов этих элементов, полученных в п. 3, составляется глобальный вектор узловых сил (результаты остальных элементов и граничные условия, использованные в п. 2, не учитываются). С полученным глобальным вектором узловых сил и новой глобальной матрицей жесткости обычным образом производится расчет дополнительных напряжений и деформаций.

5. Полученные компоненты дополнительных напряжений и деформаций прибавляются к компонентам полных напряжений и деформаций, определенных в п. 3. Далее процесс возвращается на п. 3.

6. При моделировании нелинейно-упругих сред производится проверка выполнения выбранных критериев прочности в каждом конечном элементе. В случае необходимости производится корректировка деформационных свойств элементов, перешедших в предельное состояние, составляется новая глобальная матрица жесткости и проводится новый расчет НДС массива пород и закладочного с прежним глобальным вектором узловых сил. После этого процесс возвращается на п. 5.

Итерации продолжают до тех пор, пока погрешность расчетов не превысит заданную.

При этом важно учитывать, что при заполнении камер твердеющей смесью неизбежен их частичный недозаклад. В результате образуется полость, через которую не передаются нагрузки от налегающих пород. По мере «схлapyивания» этой полости нагрузки на закладочный массив начинают возрастать.

Для моделирования этой ситуации в работах [23–25] было рекомендовано применение варианта метода секущей жесткости с применением модели упрочняющейся среды. Суть подхода состоит в том, что для конечных элементов (или контакт-элементов) задается критическая деформация сжатия $\epsilon_{кр}$, при достижении которой модуль деформации конечных элементов, аппроксимирующих такую среду, становится отличным от нуля и начинает расти.

Очевидно, что при моделировании контакта закладки с породами кровли величина этой критической деформации должна быть равна $\epsilon_{кр} = 1$ (в дальнейшем будем считать сжимающие деформации положительными). Предельная величина модуля деформации такой среды не должна превышать наибольшего из модулей деформации контактирующих материалов и, как правило, должна совпадать с модулем деформации закладочного массива.

Характер деформирования контакта пород и закладочный массив после достижения им критической деформации по аналогии с трещинами описывается гиперболической зависимостью вида:

$$\frac{\varepsilon_n - \varepsilon_{кр}}{\varepsilon_{кр}} = A \left(\frac{\varepsilon_n - \varepsilon_{кр}}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{кр}} \right)^t, \quad (4)$$

где ε_n – нормальная к поверхности контакта деформация; $\varepsilon_{\max}$ – нормальная деформация, при которой достигается предельный модуль деформации; A и t – безразмерные коэффициенты.

Выражение, определяющее модуль деформации, в общем случае имеет следующий вид:

$$0 \leq E = E_0 + (E_{\max} - E_0) \left(\frac{\varepsilon_n - \varepsilon_{кр}}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{кр}} \right)^b, \quad (5)$$

где E_0 – значение начального модуля деформации при $\varepsilon_n < \varepsilon_{кр}$ ($E_0 \approx 0$); $E_{\max}$ – значение максимально возможного модуля деформации контакта.

Обоснование состава и свойств основного объема закладочного массива

Лабораторные исследования показали, что консолидация солеотходов определяется не только продолжительностью процессов кристаллизации солей, но и исходной влажностью, плотностью укладки смеси и расходом оборотного рассола. Недостаточное содержание жидкой фазы не обеспечивает перераспределение частиц и формирование тесных контактных связей, тогда как избыточная влажность приведет к росту объема отжимного рассола, повышенной усадке закладочного массива и росту сроков набора им прочности. Для рассматриваемых солеотходов рациональным принят состав 1 780 кг/м³ солеотходов и 280 кг/м³ рассола [11, 12, 26, 27]. Рекомендуемые составы представлены в таблице 4.

Таблица 4 / Table 4

Рекомендуемые составы закладочных смесей и технология их укладки /

Recommended Backfill Mix Designs and Placement Technology

Функциональная зона	Состав смеси	Назначение
Основной объем камеры	1 780 кг/м ³ солеотходов + 280 кг/м ³ оборотного рассола	Формирование плотного консолидированного массива
Прикровельная зона	Твердеющая смесь, расход цемента 200 кг/м ³ ; подвижность 8 см	Контакт с кровлей, заполнение локальных пустот, ускоренное упрочнение
Основание камеры	Гидроизолирующий экран и зумпф	Сбор отжимных растворов и защита карналлитсодержащих пород

К 90-м суткам прочность образцов рационального состава превышала 3 МПа. Для закладки на калийных месторождениях данное значение не следует трактовать как норматив: требуемая прочность зависит от срока вовлечения междуканальных целиков в эксплуатацию, высоты камеры, размера недозаклада и жесткости вмещающих пород. Более важным результатом является подтверждение устойчивого процесса консолидации солей и возможности формирования закладочного массива с формированием требуемых прочностных и деформационных характеристик. При расходе рассола порядка 100 кг/м³ в закладочной смеси выраженная

консолидация не развивается, поэтому снижение влажности только ради уменьшения усадки массива является ошибочным решением.

Во время испытания образцов в ходе объемного сжатия установлено, что консолидированный закладочный массив способен воспринимать возрастающую нагрузку при боковом обжатии, характерном для замкнутого выработанного пространства. Следовательно, оценка его работоспособности только по пределу прочности при одноосном сжатии недостаточна. В натурных условиях массив работает в сложном напряженном состоянии, а его несущая способность возрастает при контакте с боковыми породами и кровлей.

Оценка влияния полноты заполнения выработанного пространства смесью на геомеханическое состояние подработанного массива

Численное моделирование было выполнено для незаложенной камеры, камеры с консолидируемой закладкой при недозакладе 0,2 и 0,6 м, полностью заполненной камеры и камеры с гидравлической закладкой при недозакладе 0,6 м. Результаты показали, что именно полнота заполнения камеры является определяющим параметром. При сроке существования незаложенной камеры более 90 суток зоны неупругих деформаций развиваются в кровле, почве и стенках, а последующая закладка не устраняет уже накопленные необратимые деформации [1, 2, 7, 12]. Результаты моделирования представлены на рисунке 3, а сравнительная оценка результатов приведена в таблице 4.

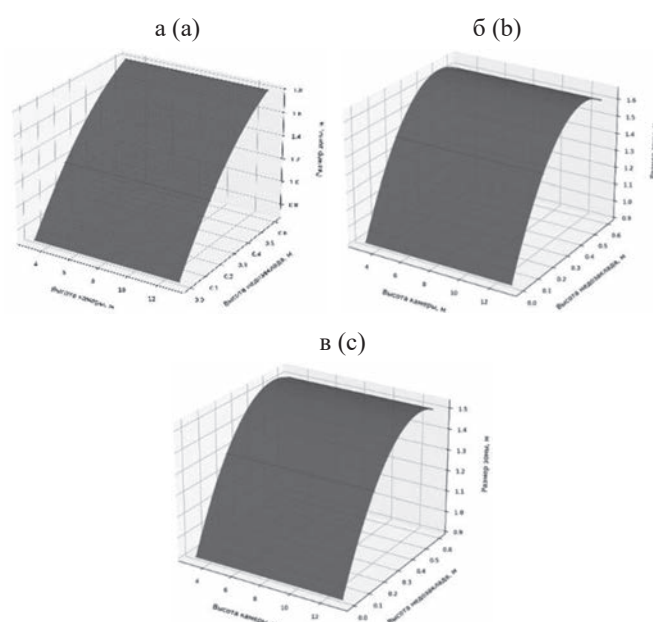


Рис. 3. Зависимость размеров зоны неупругих деформаций в кровле (а), почве (б), стенках (в)

от высоты камеры и величины прикровельного недозаклада / Fig. 3. Dependence of the dimensions of the inelastic deformation zone in the roof (a), floor (b), and sidewalls (c) on chamber height and roof-contact underfill thickness

Различие формы поверхности на рисунке 3а обусловлено тем, что при одинаковой квадратичной структуре зависимостей коэффициенты при линейном и квадратичном членах неодинаковы. В частности, меньшее по модулю значение коэффициента при $(h_n / H_k)^2$ в уравнении для $L_{кр}$ приводит к

более плавному изменению функции и меньшей кривизне поверхности по сравнению с зависимостями для L_n и L_{cr} .

Рост высоты камеры увеличивает размеры зон неупругих деформаций во всех элементах контура камеры. Одновременно возрастает чувствительность системы к прикровельному недозакладу. Кровля является наиболее критичным элементом: увеличение незаполненной зоны с 0,2 до 0,6 м способствует прогибу кровли и повышает концентрацию напряжений в краевых частях целиков. Полное заполнение выработанного пространства сокращает размеры этих зон и снижает вертикальную конвергенцию в 5,4 раза.

Полученные данные опровергают принятый подход, когда степень заполнения камеры оценивается только отношением объема подаваемой закладочной смеси к геометрическому объему камеры. Для сложнопрофильной залежи одинаковый коэффициент заполнения может соответствовать различному положению пустот. Локальная прикровельная полость в зоне перегиба кровли значительно опаснее равномерно распределенной усадки того же объема. Поэтому в технологическом регламенте необходимо нормировать не только интегральный коэффициент заполнения выработанного пространства, но и максимальную высоту локального недозаклада.

Технология формирования монолитного консолидированного закладочного массива

Предлагаемая технология основана на размещении передвижного подземного закладочного комплекса в непосредственной близости от очистных работ. Солеотходы дозируются, доувлажняются оборотным рассолом и пневмонасосом подаются по трубопроводу, закрепленному в кровле камеры. Трубопровод закрепляется в верхней точке заполняемого пространства. Такое расположение исключает преждевременное перекрытие потока нижними слоями, обеспечивает заполнение участков переменной высоты и создает возможность непрерывного наращивания закладочного массива [3, 11, 12].

Принципиальная схема показана на рисунке 4.

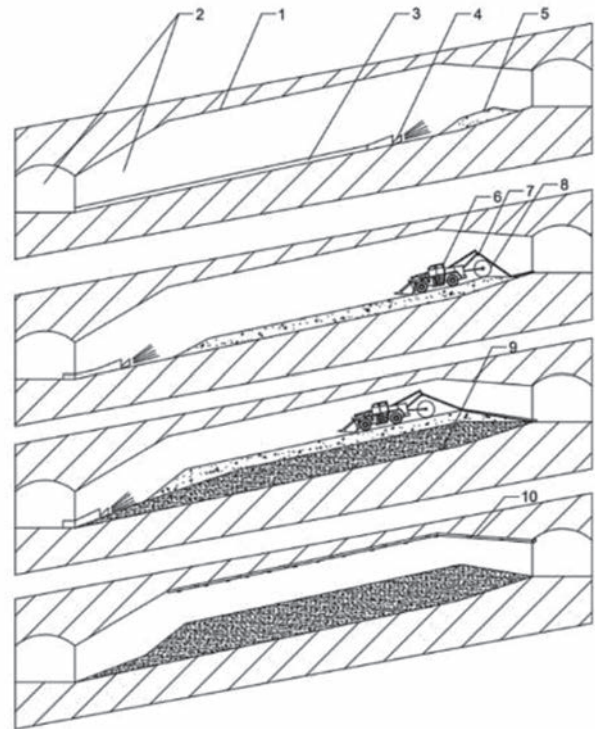


Рис. 4. Стадии возведения консолидированного закладочного массива в камере /

Fig. 4. Stages of Construction of the Consolidated Backfill Mass within the Mining Chamber

Основной объем закладочного массива формируется без длительных перерывов, что уменьшает количество ослабленных межслойных контактов.

После окончания подачи основного состава смеси выполняется контроль положения поверхности массива и дозаполнение прикровельной зоны твердеющей смесью. При

Таблица 5 / Table 5

Сравнительная геомеханическая оценка вариантов закладки / Comparative Geomechanical Assessment of Backfilling Options

Вариант	Контакт с кровлей	Геомеханический результат	Оценка
Камера без закладки	Отсутствует	Интенсивное развитие пластических зон и ползучести	Недопустим как штатный режим
Консолидированная закладка, недозаклад 0,6 м	Запаздывающий	Рост зон в кровле и стенках	Нерационален
Консолидированная закладка, недозаклад 0,2–0,3 м	Ранний	Ограничение конвергенции и зон неупругих деформаций	Допустим
Полное заполнение камеры	Непосредственный	Минимальные зоны, снижение конвергенции до 5,4 раза	Наиболее эффективен
Гидрозакладка, недозаклад 0,6 м	Запаздывающий	Наихудшие показатели среди заложенных вариантов	Не обеспечивает конструктивную функцию

Таблица 6 / Table 6

Основные требования и характеристики закладки / Main Requirements and Characteristics of the Backfill

Элемент технологии	Рекомендуемый параметр	Обоснование
Размещение комплекса	В панели, вблизи зоны очистных работ	Снижение длины транспортирования и повышение мобильности
Транспорт основного состава	Пневмоподача по кровельному трубопроводу	Заполнение верхней точки и камер переменной мощности
Режим формирования	Непрерывный либо с минимальными перерывами	Исключение ослабленных межслойных контактов
Высота локального недозаклада	Не более 0,3 м	Ограничение развития зон неупругих деформаций
Дозакладка	Бетононасосом твердеющей смесью	Формирование контакта с кровлей
Контроль растворов	Гидроизоляция основания и зумпф	Защита карналлитсодержащих подстилающих пород

сложной морфологии кровли подача ведется через отдельные участки трубопровода либо последовательно перемещаемые выпускные патрубки. Применение смеси подвижностью 8 см позволяет заполнить локальные неровности, однако чрезмерное увеличение подвижности недопустимо из-за риска расслоения и роста количества отжимного раствора. Основные требования и характеристики стадий возведения закладочного массива в камере приведены в таблице 6.

Параметры выемки и последовательность отработки запасов

При мощности пласта 3 м отработку камеры следует вести одним проходом комбайна с последующим возведением закладочного массива. При мощности пласта 6–13 м выемку следует вести нисходящими заходками. После отработки верхней или очередной проходки формируется закладочный слой на всю высоту камеры. Конкретное число слоев определяется мощностью пласта и возможностями выемочного оборудования [12].

Рекомендуемая последовательность отработки панели приведена в таблице 6.

Для выемки запасов предложена четырехстадийная последовательность. На первой стадии отрабатываются две фланговые камеры, на второй – центральная камера, на третьей – две камеры между ранее отработанными участками, на четвертой – оставшиеся камерные запасы. Такой порядок рассредоточивает зоны концентрации напряжений и формирует чередование несущих целиков с уже консолидированными закладочными массивами. Вовлечение в эксплуатацию междукamerных целиков допускается только после достижения закладочным массивом требуемых характеристик.

Таблица 7 / Table 7

Рекомендуемая последовательность отработки панели / Recommended Mining Sequence for Panel Extraction

Стадия	Отрабатываемые элементы	Функция стадии
I	Две фланговые камеры	Формирование опорных заложённых зон по краям панели
II	Центральная камера	Симметрирование перераспределения нагрузок
III	Две камеры между ранее отработанными	Последовательное сокращение пролетов целиков
IV	Оставшиеся камеры и при обосновании часть МКЦ	Завершение отработки с опиранием на сформированные массивы

Практическая и технико-экономическая эффективность

Практический эффект от реализации технологии складывается из четырех компонентов: повышения полноты извлечения силвинита, сокращения срока стояния незаложенных камер, использования отходов обогащения в качестве техногенного сырья и ограничения деформаций налегающего подработанного массива. Наиболее существенный экономический результат связан не с удешевлением одного кубометра закладочной смеси, а с возможностью вовлечения части запасов междукamerных целиков и продления срока службы рудника [3, 12].

Обобщение эффектов внедрения представлено в таблице 8.

Консолидированная закладка требует дополнительных затрат на подготовку смеси, пневматический транспорт, ги-

дроизоляцию и дозаполнение прикровельной зоны. Ее преимущество формируется на уровне всей геотехнологической системы: повышается извлечение, уменьшается объем поверхностного складирования солеотходов, снижаются геомеханические риски и создаются условия для последовательной доработки запасов.

Таблица 8 / Table 8

Эффекты внедрения предлагаемой технологии / Expected Benefits of the Proposed Technology

Показатель	Результат
Геомеханика	Снижение конвергенции и размеров зон неупругих деформаций при раннем контакте с кровлей
Полнота извлечения	Возможность поэтапного вовлечения части запасов МКЦ; прирост извлечения не менее 20 % в рассматриваемых вариантах
Обращение с отходами	Возврат солеотходов в выработанное пространство вместо поверхностного складирования
Безопасность	Сокращение времени существования незаложенных камер и ограничение деформаций водозащитной толщ
Срок службы рудника	Продление за счет вовлечения ранее оставляемых запасов

Обсуждение результатов

Полученные результаты показывают, что применительно к глубокозалегающим месторождениям калийных солей геомеханическая эффективность закладки определяется не столько прочностью закладочного массива, сколько условиями и временем его включения в совместное деформирование с вмещающими породами. При отсутствии контакта с кровлей закладочный массив в начальный период воспринимает преимущественно боковое давление и не ограничивает вертикальные смещения контура камеры. Поэтому одинаковые значения интегрального коэффициента заполнения выработанного пространства могут соответствовать принципиально различному геомеханическому состоянию массива в зависимости от расположения и высоты незаполненной прикровельной зоны. Это подтверждает необходимость нормирования не только общего объема поданной смеси, но и максимальной величины локального недозаклада.

Установленное снижение вертикальной конвергенции кровли и почвы до 5,4 раза при полном заполнении камеры подтверждает определяющую роль раннего контакта закладочного массива с кровлей. При этом увеличение недозаклада с 0,2 до 0,6 м приводит к росту зон неупругих деформаций во всех элементах контура, однако наиболее выраженная реакция наблюдается в кровле. Такая закономерность обусловлена тем, что прикровельная полость исключает непосредственную передачу нагрузки на закладочный массив и создает условия для прогиба пород кровли, локального увеличения пролета и концентрации напряжений в краевых частях междукamerных целиков. Следовательно, ограничение недозаклада величиной не более 0,3 м является не только технологическим требованием к качеству заполнения камеры, но и геомеханическим условием своевременного включения закладки в работу.

Сравнение рассмотренных вариантов показывает, что гидравлическая закладка с прикровельным недозакладом 0,6 м не обеспечивает требуемой конструктивной функции. Несмотря на размещение значительного объема материа-

ла в выработанном пространстве, позднее вступление гидрозакладочного массива в контакт с кровлей не позволяет компенсировать необратимые деформации, накопленные в период существования незаложенной камеры. Тем самым подтверждается несостоятельность подхода, при котором эффективность закладочных работ оценивается преимущественно по объему размещенных отходов. Для глубоких калийных рудников критерием эффективности должно выступать фактическое участие сформированного массива в перераспределении горного давления.

Результаты лабораторных исследований подтверждают возможность формирования монолитного консолидированного массива без использования цемента в основном объеме камеры. Состав, включающий 1 780 кг/м³ солеотходов и 280 кг/м³ оборотного рассола, обеспечивает устойчивое развитие процессов кристаллизационной консолидации и достижение прочности более 3 МПа к 90-м суткам. Вместе с тем полученное значение прочности не следует рассматривать как универсальный норматив. Требуемые характеристики закладки должны назначаться с учетом высоты камеры, величины прикровельного недозаклада, срока последующей выемки междуканальных целиков и деформационных свойств вмещающих пород. Более существенным результатом является установленная способность массива воспринимать возрастающую нагрузку в условиях ограниченного деформирования, характерного для замкнутого выработанного пространства. Это означает, что оценка закладки только по пределу прочности при одноосном сжатии недостаточна и должна дополняться определением ее деформационной жесткости и поведения в условиях объемного напряженного состояния.

Предлагаемое разделение закладочного массива на две функциональные зоны позволяет устранить противоречие между экономичностью и необходимостью обеспечить надежный контакт с кровлей. Основной объем камеры формируется из относительно дешевой консолидируемой смеси на основе солеотходов и оборотного рассола, тогда как цементосодержащая смесь применяется локально, только для заполнения сложнопрофильной прикровельной зоны. Расход цемента 200 кг/м³ и подвижность смеси 8 см обеспечивают проникновение материала в локальные неровности кровли и ускоренное формирование контактного слоя. Такой подход рациональнее полного заполнения всей камеры цементной твердеющей смесью, поскольку позволяет ограничить расход вяжущего без снижения геомеханического эффекта.

Технологическая схема пневматической подачи смеси по трубопроводу, закрепленному в кровле и выведенному в верхнюю точку камеры, согласуется со сложной волнистой и куполообразной морфологией сильвинитового пласта. В отличие от подачи материала из нижних участков камеры, такое расположение выпускного патрубка снижает вероятность преждевременного перекрытия транспортного потока ранее уложенными слоями и повышает полноту заполнения участков переменной высоты. Однако эффективность данной схемы зависит от непрерывности формирования массива, контроля положения его поверхности и своевременной дозакладки локальных пустот. Следовательно, предлагаемую технологию необходимо рассматривать как единый комплекс операций, а не только как способ транспортирования смеси.

Обоснованный порядок выемки – одной проходкой при мощности пласта 3 м и нисходящими проходами при мощности 3–13 м – направлен на сокращение времени существо-

вания высокого незакрепленного контура. Четырехстадийная последовательность отработки панели дополнительно обеспечивает рассредоточение зон концентрации напряжений и формирование чередующихся междуканальных целиков и консолидированных закладочных массивов. Это создает предпосылки для последующего вовлечения части запасов целиков, однако само наличие закладки не является достаточным основанием для их выемки. Такое решение должно приниматься только после подтверждения требуемой прочности и жесткости закладочного массива, анализа фактической конвергенции и контроля состояния водозащитной толщи.

Практическое значение результатов заключается в переходе от традиционного понимания закладки как способа размещения солеотходов к ее использованию в качестве управляемого конструктивного элемента геотехнологии. Применение предложенных решений позволяет одновременно уменьшить деформации подработанного массива, сократить продолжительность существования незаложенных камер, вернуть отходы обогащения в выработанное пространство и повысить полноту извлечения запасов. Вместе с тем результаты получены применительно к конкретным горно-геологическим условиям Гремячинского месторождения. Для их распространения на другие участки или месторождения необходима дополнительная адаптация параметров смеси, допустимого недозаклада и последовательности выемки с учетом глубины разработки, температуры массива, мощности водозащитной толщи и реологических свойств соляных пород.

Закключение

1. Для глубокозалегающих калийных месторождений эффективность закладки определяется не только объемом размещенного материала, но и качеством контакта с кровлей, величиной локального недозаклада, деформационной жесткостью закладочного массива и скоростью его консолидации.

2. Доказано, что состав монолитной закладочной смеси 1 780 кг/м³ солеотходов и 280 кг/м³ оборотного рассола обеспечивает устойчивую консолидацию и достижение прочности к 90-м суткам более 3 МПа.

3. Установлено, что увеличение прикровельного недозаклада с 0,2 до 0,6 м вызывает рост зон неупругих деформаций на контуре очистной камеры; наиболее чувствительной является кровля. Полное заполнение камеры снижает вертикальную конвергенцию кровли и почвы в 5,4 раза.

4. Разработана технологическая схема пневматической подачи закладочной смеси по закрепленному в кровле трубопроводу в верхнюю точку камеры с последующим дозаполнением прикровельной зоны твердеющей смесью с расходом цемента 200 кг/м³, что обеспечивает подвижность смеси 8 см.

5. Рекомендована для камер шириной 6 м при мощности пласта 3 м выемка одной проходкой комбайна, а при мощности 3–13 м – нисходящими проходами с последующей закладкой камеры на всю высоту при ограничении недозаклада до 0,3 м.

6. Обоснован четырехстадийный порядок отработки панели, что создает систему чередующихся целиков и консолидированных закладочных массивов, что позволяет рассматривать перспективу поэтапного вовлечения запасов междуканальных целиков при обязательном мониторинге состояния техногенно изменяемого массива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Барях А.А., Котляр Е.К., Самodelкина Н.А. и др. Геомеханический анализ влияния извлечения калийной руды на безопасность горных работ. *Горный журнал*. 2015; 11: 14-19. <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.11.03>.
Baryakh A.A., Kotlyar E.K., Samodelkina N.A., et al. Geomechanical analysis of the influence of potash ore extraction on mining safety. *Mining Journal*. 2015; (11): 14-19. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.11.03>.
2. Ветров С.В., Одинцев В.Н., Слоним М.Э. Сопоставление технологических схем разработки Яковлевского месторождения по фактору напряженно-деформированного состояния массива горных пород и закладки. *Проблемы комплексного освоения месторождений: сборник научных трудов*. 1979: 110-124.
Vetrov S.V., Odintsev V.N., Slonim M.E. Comparison of mining layouts for the Yakovlevskoye deposit based on the stress-strain state of the rock mass and backfill. *Problems of Integrated Mineral Deposit Development: Collection of Scientific Papers*. 1979: 110-124. (In Russ.).
3. Кузнецов С.В., Одинцев В.Н. Метод последовательных циклов расчета напряженно-деформированного состояния массива горной породы и закладки выработанного пространства. *Вопросы механики горных пород при разработке рудных месторождений твердых полезных ископаемых: сборник научных трудов*. Москва, 1979: 97-109.
Kuznetsov S.V., Odintsev V.N. Method of successive calculation cycles for determining the stress-strain state of the rock mass and mined-out void backfill. *Rock Mechanics Problems in the Development of Solid-Mineral Ore Deposits: Collection of Scientific Papers*. Moscow, 1979: 97-109. (In Russ.).
4. Соловьев В.А., Аптуков В.Н., Тарасов В.В. и др. Аспекты повышения эффективности разработки Верхнекамского калийного месторождения. Новосибирск, 2019: 179.
Soloviev V.A., Aptukov V.N., Tarasov V.V., et al. *Aspects of Improving the Efficiency of the Verkhnekamskoye Potash Deposit Development*. Novosibirsk, 2019: 179. (In Russ.).
5. Трубецкой К.Н., Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Принципы и методы ресурсосберегающего освоения недр. Москва, 2012: 328.
Trubetskoy K.N., Kaplunov D.R., Rylnikova M.V. *Principles and Methods of Resource-Saving Subsurface Development*. Moscow, 2012: 328. (In Russ.).
6. He M., Wang Q. Rock dynamics in deep mining. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2023; 33 (9): 1065-1082. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2023.07.006>.
7. Ranjith P.G., Zhao J., Ju M. et al. Opportunities and Challenges in Deep Mining: A Brief Review. *Engineering*. 2017; 3 (4): 546-551. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.04.024>.
8. Ushakova E., Perevoshchikova A., Menshikova E., et al. Environmental Aspects of Potash Mining: A Case Study of the Verkhnekamskoe Potash Deposit. *Mining*. 2023; 3: 2. <https://doi.org/10.3390/mining3020011>.
9. Vandeginste V., Ji Y., Buyschaert F., et al. Mineralogy, microstructures and geomechanics of rock salt for underground gas storage. *Deep Underground Science and Engineering*. 2023; 2 (2): 129-147. <https://doi.org/10.1002/dug2.12039>.
10. Weber F., Konietzky H. Concept to proof long-term safety of abandoned salt mines by hydro-mechanical coupled simulations with FLAC3D and Ansys Fluent. *Deep Resources Engineering*. 2025; 2 (4): 100201. <https://doi.org/10.1016/j.deeps.2025.100201>.
11. Рыльникова М.В., Бергер Р.В., Зубков П.О. и др. Развитие научно-методических основ технологий закладки выработанного пространства с учетом специфики горно-геологических и горнотехнических условий освоения соляных месторождений. *Рациональное освоение недр*. 2024; 1 (75): 36-43.
Rylnikova M.V., Berger R.V., Zubkov P.O., et al. Development of scientific and methodological foundations for mined-out void backfilling technologies considering the specific geological and mining conditions of salt-deposit development. *Rational Development of Mineral Resources*. 2024; 1 (75): 36-43. (In Russ.).
12. Соловьев В.А., Аптуков В.Н., Ваулина И.Б. Поддержание горных выработок в породах соленосной толщи. Теория и практика. Новосибирск, 2017: 264.
Soloviev V.A., Aptukov V.N., Vaulina I.B. Maintenance of Mine Workings in Salt-Bearing Rocks: Theory and Practice. Novosibirsk, 2017: 264. (In Russ.).
13. Зотеев О.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород численными методами. *Известия вузов. Горный журнал*. 2003; 5: 108-115.
Zoteyev O.V. Numerical modelling of the stress-strain state of a rock mass. *Universities News. Mining Journal*. 2003; (5): 108-115. (In Russ.).
14. Зенкевич О., Чанг И. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред. Москва, 1974: 240.
Zienkiewicz O.C., Cheung Y.K. *The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics*. Moscow, 1974. 240. (In Russ.).
15. Радченко Д.Н., Бергер Р.В., Татарников В.И. и др. Экспериментальное исследование характера и последствий взаимодействия соляных пород с гидрозакладочными рассолами при подземной разработке месторождений калийных солей. *Маркшейдерия и недропользование*. 2023; 6 (128): 60-67. https://doi.org/10.56195/20793332_2023_6_60_67.
Radchenko D.N., Berger R.V., Tatarnikov V.I., et al. Experimental study of the nature and consequences of the interaction between salt rocks and hydraulic-backfill brines during underground mining of potash deposits. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2023; 6 (128): 60-67. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2023_6_60_67.
16. Ухов С.Б. Скальные основания гидротехнических сооружений. Москва, 1975: 263.
Ukhov S.B. *Rock Foundations of Hydraulic Engineering Structures*. Moscow, 1975: 263. (In Russ.).
17. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. Москва, 1987: 221.
Fadeev A.B. The Finite Element Method in Geomechanics. Moscow, 1987: 221. (In Russ.).
18. Shupletsov Ju.P., Zoteyev O.V., Shashkin V.N. In-situ and analytical investigations of post-peak deformation of rock mass during underground mining. Safety and Environmental Issues in Rock Engineering: Proc. ISRM international symposium. Lissabon. 21-24 June 1993. Ed. L.Riberio E Sousa & N. F. Grossman. Rotterdam, Brookfield: A.A. Balkema, 1993: 709-714.
19. Viokh N.P., Zoteyev O.V. A technique and program for computing stress-strain state of mining system elements and mining openings in solid and fractured rock mass. Numerical Methods in Geomechanics Innsbruck, 1988: Proc. 6 Int. Conf on numerical methods in geomechanics. Innsbruck/ 11-15 April 1988. Ed. G.Swoboda. Rotterdam, Brookfield: A. A. Balkema, 1988; 3: 1947-1952.
20. Барях А.А., Асанов В.А., Самodelкина Н.А. и др. Геомеханическое обеспечение защиты калийных рудников от затопления. *Горный журнал*. 2013; 6: 30-34.
Baryakh A.A., Asanov V.A., Samodelkina N.A., et al. Geomechanical support for protecting potash mines against flooding. *Mining Journal*. 2013; 6: 30-34. (In Russ.).

21. Гудман Р. Механика скальных пород. Москва, 1987: 232.
Goodman R.E. *Introduction to Rock Mechanics*. Moscow, 1987. 232 p. (In Russ.).
22. Курленя М.В., Серяков В.М. О методе расчета напряженно деформированного состояния горных пород с учетом контакта кровли и почвы выработанного пространства. *ФТПРПИ*. 1997; 5: 14-23.
Kurlenya M.V., Seryakov V.M. A method for calculating the stress-strain state of rocks with consideration of contact between the roof and floor of the mined-out space. *Journal of Mining Science*. 1997; (5): 14-23. (In Russ.).
23. Зотеев О.В. Учет последовательности ведения горных работ при оценке устойчивости конструктивных элементов разработки. *Известия УГГА*. 2000; 11: 252-259.
Zoteyev O.V. Accounting for the mining sequence in assessing the stability of structural elements of a mining system. *Izvestiya UGGA*. 2000; (11): 252-259. (In Russ.).
24. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Комбинированная геотехнология. Москва, 2012: 344.
Kaplunov D.R., Rylnikova M.V. *Combined Geotechnology*. Moscow, 2012: 344. (In Russ.).
25. Кузнецов С.В., Одинцев В. Н., Слоним М.Э. и др. Методология расчета горного давления. Москва, 1981: 103.
Kuznetsov S.V., Odintsev V.N., Slonim M.E., et al. *Methodology for Rock Pressure Calculation*. Moscow, 1981: 103. (In Russ.).
26. Хайрутдинов М.М., Вотяков М.В. Возможность применения систем с твердеющей закладкой при отработке калийных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2007; 9: 265-270.
Khairutdinov M.M., Votyakov M.V. Feasibility of using cemented-backfill mining systems in potash-deposit development. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2007; 9: 265-270. (In Russ.).
27. Хайрутдинов М.М., Вотяков М.В. Разработка составов твердеющих закладочных смесей из отходов переработки руд калийных предприятий. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2007; 10: 200-206.
Khairutdinov M.M., Votyakov M.V. Development of cemented backfill mixtures using waste generated by potash-ore processing enterprises. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2007; (10): 200-206. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Павел Олегович Зубков –

аспирант отдела проблем моделирования и управления горнотехническими системами, младший научный сотрудник лаборатории интеллектуальных методов мониторинга горнотехнических систем, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: paschazubckov@yandex.ru

Критерии авторства:

Автор выполнил постановку задачи, планирование и проведение исследований, обработку и интерпретацию результатов, подготовку и редактирование рукописи.

Конфликт интересов:

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 20.07.2026

Поступила после рецензирования: 28.07.2026

Принята к публикации: 03.08.2026

ABOUT THE AUTHOR

Pavel O. Zubkov –

Postgraduate Student, Department of Challenges in Modelling and Management of Mining Systems; Junior Researcher, Laboratory of Intelligent Monitoring Methods of Mining Systems, Academician N. V. Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: paschazubckov@yandex.ru

Contribution:

The author formulated the research problem, planned and conducted the study, processed and interpreted the results, and prepared and revised the manuscript.

Conflict of interest:

The author declares no conflict of interest.

Article info

Received: 20.07.2026

Revised: 28.07.2026

Accepted: 03.08.2026