

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 622.2

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-117-127

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА ЗОН ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В ПОРОДАХ ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ ДЛЯ УСЛОВИЙ ГЛУБОКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

Протосеня Анатолий Григорьевич
Андреева Анна Владиславовна *

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

* для корреспонденции: dementyeva_av@mail.ru



Информация о статье

Поступила:

03 марта 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

22 сентября 2025 г.

Принята к публикации:

30 сентября 2025 г.

Опубликована:

23 октября 2025 г.

Ключевые слова:

Водозащитная толща,
трещинообразование,
калийные соли, глубокое
месторождение, модель
Concrete, численное
моделирование

Аннотация.

Разработка месторождений калийных солей сопряжена с необходимостью охраны горных выработок от проникновения в них пресных вод с вышележащих водоносных горизонтов. Вода может поступать в выработки по водопроводящим трещинам, образующимся в результате прогиба водозащитной толщи в выработанное пространство. Для оценки высоты произрастания водопроводящих трещин на современных глубоких калийных рудниках существуют инженерные методики расчета, в основе которых формулы с эмпирическими коэффициентами. Методика разработана на основе комбинации аналогов для неглубоких месторождений солей и глубоких угольных месторождений. Для расчета высоты трещинообразования применительно к конкретному участку ведения работ предлагается использовать численные методы, учитывающие реальную геологию месторождения и особенности поведения пород. В работе построены численные модели участка месторождения с усредненным геологическим разрезом, по усредненным свойствам пород подобраны параметры моделей: для пород водозащитной толщи – модель Concrete, учитывающая накопление повреждений, для соляных пород продуктивного и подстилающего пластов – модель, учитывающая их длительное деформирование. В моделях оцениваются зависимости высоты трещинообразования от времени ведения работ, а также от ширины очистного пространства. Для этого построены две численные модели: модель камерно-столбовой системы с последовательной разработкой камер в камерных блоках и последующим расчетом на 30 лет и модель камерной системы с постоянно увеличивающимся очистным пространством. Установлено, что существует предельная высота трещинообразования, при достижении которой дальнейшее увеличение времени ведения работ и ширины очистного пространства не влияет на высоту прорастания трещины.

Для цитирования: Протосеня А.Г., Андреева А.В. Совершенствование методики прогноза зон трещинообразования в породах водозащитной толщи для условий глубоких месторождения калийных солей // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 5 (171). С. 117-127. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-117-127, EDN: GJZGHJ

Введение

Добыча калийных солей на крупных современных российских месторождениях производится на большой глубине с расположением водоносных горизонтов над

продуктивным пластом. Белбажское и Верхнекамское месторождения отрабатывают пласты на глубине до 500 м, в то время как Илецкое и Тирецкое месторождения уходят вглубь массива на глубину до 700 м [1]. Однако

более новые месторождения, такие как Гремячинское и Нивенское, начинают разработку с глубины 1 км и ведут работы вглубь массива [2]. Толща пород, разделяющих продуктивный пласт и водопродводящие горизонты, называется водозащитной толщей (ВЗТ) [3]. Появление в водозащитной толще водопродводящих трещин (ВПТ) будет приводить к вымыванию продуктивного пласта поступающими в выработанное пространство водными потоками, так как соли склонны к растворению в ненасыщенных рассолах [4].

Таким образом, сохранение целостности водозащитной толщи является первостепенной задачей в процессе ведения горных работ на глубоких калийных рудниках. Разработка месторождений калийных солей сопряжена с необходимостью сохранения сплошности надсоляных пород, расположенных между продуктивным пластом и водоносным горизонтом. Образование в породах водозащитной толщи водопродводящих трещин приведет к поступлению воды в пространство горных выработок и необходимости ликвидации рудника или его частей [5, 6], поэтому прогноз напряженно-деформированного состояния водозащитной толщи является важной задачей для обеспечения безопасности ведения работ [7]. Оценка безопасности условий подработки производится путем определения ожидаемой высоты трещинообразования и сравнения ее с допустимой величиной [8].

Процесс разработки соляных месторождений осложняется тем, что соляные породы склонны к проявлению реологических свойств [9] – процесс деформирования не затухает с течением времени [10], [11], что влияет на величину прогиба ВЗТ. Прогиб ВЗТ, в свою очередь, определяет высоту и степень раскрытия возникающих трещин.

Разработка соляных месторождений в России ведется по камерной и камерно-столбовой системе проходческими комбайнами [12]. Выемка полезного ископаемого осуществляется блоками камер (или отдельными камерами в случае камерной системы [13]) со средней шириной 5,5 м [14]. Между блоками камер оставляются междукамерные целики. В камерно-столбовой системе подразумевается оставление более массивных барьерных целиков между блоками камер. Основная нагрузка от вышележащей толщи пород в таком случае распределяется на массивные целики [15], а междукамерные целики оставляются из условий безопасности выработок в течение времени ведения в них горнопроходческих работ [16]. Считается, что камерная и камерно-столбовая системы наиболее благоприятны с точки зрения сохранения сплошности ВЗТ и минимизации ее прогиба [17, 18].

В основе современных методик расчета параметров отработки, разрабатываемых под конкретные месторождения, оценка высоты трещинообразования ВЗТ производится по эмпирической формуле, основанной на предельном прогибе ВЗТ [4].

$$H_{\text{тр}} = 0,28 \frac{\eta_0}{\varepsilon_{\text{кр}}} \cdot k_t, \quad (1)$$

где η_0 – максимальная величина оседания подрабатываемой толщи; $\varepsilon_{\text{кр}}$ – критическая деформация, $\varepsilon_{\text{кр}} = 6 \cdot 10^{-3}$; k_t – коэффициент, учитывающий уменьшение скорости деформирования подрабатываемой толщи.

При этом длительное деформирование соляных пород учитывается только эмпирическим коэффициентом. Характер прогиба ВЗТ свидетельствует о том, что максимальные деформации и ВПТ, следовательно, образуются в краевых участках ВЗТ. При этом скорость деформации зависит от ползучести подстилающих пластов [19]. В процессе увеличения прогиба и нарастания трещин общая жесткость конструкции изменяется, что влияет на скорость деформирования пород и на общее сопротивление трещинообразованию. Таким образом, современные методики применимы лишь в ограниченном диапазоне и не дают полного представления о состоянии ВЗТ.

Гремячинское месторождение калийных солей, например, отличается сложностью горно-геологических условий – глубокое залегание продуктивного пласта (до 1200 м) и близость к нему водоносных горизонтов (до 800 м) [20] определяет необходимость внимательного подхода к оценке состояния водозащитной толщи. На этапе проектирования охрана водозащитной толщи обеспечивается путем выбора оптимальных параметров отработки и расчета высоты образования трещины над очистным пространством по инженерной методике.

В краевых участках месторождений мощность ВЗТ, как правило, уменьшается, что совместно со складчатым строением пласта требует более внимательного подхода к назначению параметров ведения работ. При этом прогноз высоты трещинообразования должен производиться с повышенной точностью, что не может быть достигнуто за счет применения инженерных методик [21].

Методы численного моделирования основаны на применении сложных моделей материалов, учитывающих поведение горных пород при различном нагружении [22]. Численное моделирование позволяет учесть реальное геологическое строение участка месторождения и параметры ведения горных работ, а также оценить напряженно-деформированное

состояние пласта в процессе его отработки [23, 24].

Разрушение материала в явном виде моделируется в рамках метода дискретных элементов, позволяющего задавать межмолекулярное взаимодействие между элементами [25]. Однако большее распространение получили методики механики

сплошной среды.

В рамках механики сплошной среды учесть трещинообразование в явном виде не представляется возможным, однако существуют модели, позволяющие учесть изменение жесткости материала вследствие его упрочнения и разупрочнения, что косвенно свидетельствует о разрушении [26]. В основном такие модели

Таблица 1. Параметры типового геологического разреза (составлено автором)

Table 1. Geology layer parameters (made by the author)

Абс. отметка кровли	Характеристика слоя	Мощность, м	Абс. отметка кровли	Характеристика слоя	Мощность, м
-995	Пластический	15	-1096	Хрупкий	6
-1010	Пластический	55	-1102	Пластический	2
-1065	Хрупкий	5	-1104	Хрупкий	13
-1070	Пластический	5	-1117	Пластический	3
-1075	Хрупкий	13	-1120	Вязкопластический	5
-1088	Пластический	8	-1125	Вязкопластический	32

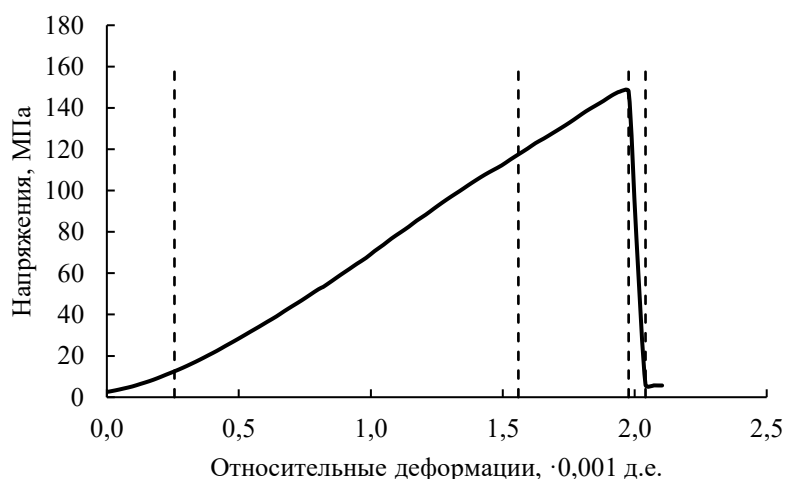


Рис. 1. Типовая диаграмма деформирования хрупких пород ВЗТ (составлено автором)

Fig. 1. Stress-strain curve of brittle rock in waterproof strata (made by the author)

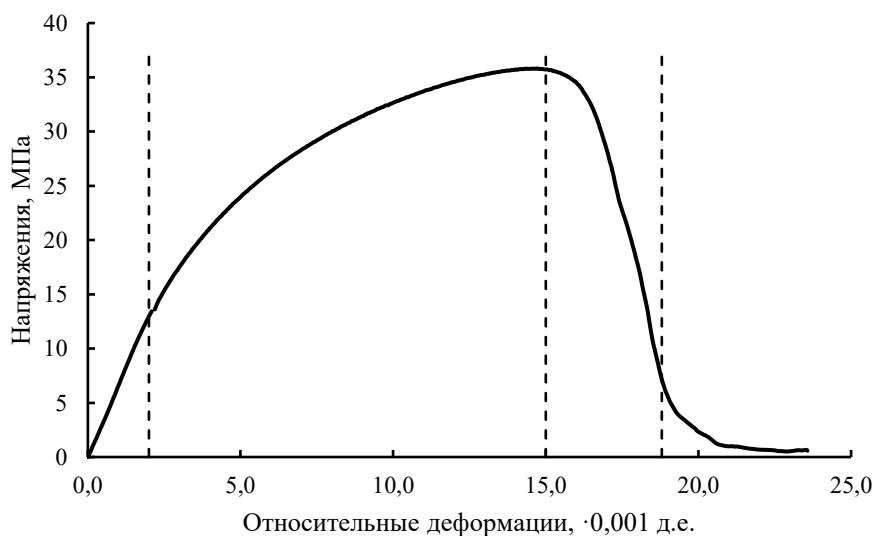


Рис. 2. Типовая диаграмма деформирования соляных пород ВЗТ (составлено автором)

Fig. 2. Stress-strain curve of salt rock in waterproof strata (made by the author)

используются для описания поведения бетона в конструкциях различного назначения [27, 28]. Однако модели показывают хорошую корреляцию с реальными данными при описании поведения горных пород [29, 30].

Целью исследования является прогноз напряженно-деформированного состояния ВЗТ при разработке продуктивного пласта в краевой части месторождения. Задачи исследования состоят в изучении закономерностей формирования зон развития ВПТ в ВЗТ, применении моделей деформирования, учитывающих накопление повреждений материала, и апробации методики прогноза зон трещинообразования ВЗТ.

Методы

Для оценки высоты развития трещин в результате ведения горных работ были проанализированы геологические разрезы глубоких месторождений калийных солей. В строении ВЗТ явно прослеживается закономерность – хрупкие породы (ангидриты и ангидрит-доломиты) переслаиваются с вязкопластическими (каменная соль). При этом качественное поведение пород также схоже. Различие наблюдается в количественных характеристиках (предел прочности, предельная деформация), однако это различие влияет не на концептуальное распределение зон трещинообразования, а на количественную величину раскрытия частных трещин.

Моделирование производится в плоской постановке. Граничные условия принимаются стандартными для решения геомеханических задач – нижняя и боковые границы моделей закрепляются от перемещений, верхняя граница остается свободной.

Для построения численных моделей был выделен типовой геологический разрез (Таблица 1). Солесодержащие породы, такие как каменная соль, галит-ангидрит и галит, в таблице обозначаются как вязкие. Ангидриты, ангидрит-доломиты и доломиты в общем случае обозначаются как хрупкие породы. Было принято, что продуктивный пласт располагается на глубине 1120 м. Мощности слоев приведены в Таблице 1.

В диаграммах деформирования как ангидрит-доломитов (Рис. 1), так и каменных солей (Рис. 2) выделяются 4 зоны – упругое деформирование, пластические деформации и разрушение, запредельное разупрочнение и выход на остаточную ползучесть. С течением деформирования жесткость материала меняется, особенно это касается запредельного деформирования, что требует учета при моделировании путем применения моделей, позволяющих учесть изменение жесткости материала вследствие его упрочнения и

разупрочнения, что косвенно свидетельствует о разрушении.

Одной из таких моделей является модель поведения бетона Concrete. Модель позволяет учитывать накопление упругих и пластических деформаций, а также деформаций ползучести, и может использоваться для описания пород водозащитной толщи в процессе ведения горных работ и разработки месторождения. Модель также учитывает деформационное упрочнение материала при сжатии и растяжении, а в зоне действия сжимающих напряжений учитывает пластическое допредельное деформирование. Параметры модели подбирались для каждого из слоев ВЗТ.

Напряженно-деформированное состояние пород продуктивного и подстилающего пластов напрямую влияет на величину прогиба ВЗТ. Так как соляные породы характеризуются проявлением вязкопластических свойств [31], их поведение описывается соответствующей моделью. В данной работе поведение пород описывалось моделью Norton-double-Power-Law, учитывающей процесс длительного деформирования пород. Поверхность пластичности в модели задается условием Кулона-Мора. Модель описывает поведение пород на стадии установившейся ползучести, не учитывая первую стадию ползучести, поэтому упругие параметры модели определялись с учетом накопления деформаций на первой стадии. Пластические параметры пород корректировались с учетом длительной прочности пород.

Целью численного моделирования является определение зон повреждений пород ВЗТ. Для анализа построены две численные модели – на первой модели исследуется зависимость высоты трещинообразования от времени эксплуатации месторождения, а на второй модели – зависимость высоты развития трещин от ширины очистного пространства.

Для построения первой модели принято, что ширина камер составляет 6 м, а ширина междуканальных целиков – 5 м при выемочной мощности 5 м. Ширина барьерных целиков, оставляемых между блоками камер, принята 27 м (Рис. 3). Всего в модели приведено три блока камер. Количество блоков камер выбиралось из условия полной подработки земной поверхности.

Во второй модели ширина камер составляет также 6 м, а ширина междуканальных целиков – 6 м. Выемочная мощность пласта – 5 м. При этом ширина очистного пространства постоянно увеличивается. Начальная ширина очистного пространства аналогична ширине очистного пространства из модели 1 для сохранения условия полной подработки. Затем моделируется постепенное увеличение очистного пространства

путем последовательной выемки каждого блока камер.

В моделях учитываются породы ВЗТ, продуктивный пласт и подстилающий слой. Породы, лежащие над ВЗТ, задаются эквивалентной нагрузкой, приложенной к верхней границе модели.

Принято, что контакт между слоями в ВЗТ жесткий, без возможности отлипания и проскальзывания. Расчет производится на 30-летний срок службы рудника для 1 модели. Для второй модели критерием окончания расчета принимается отсутствие положения равновесия в модели, то есть когда в процессе расчета прекращается сходимость задачи. В процессе решения при рассмотренном количестве камер положение равновесия достигается во всех расчетных случаях, что говорит о возможности дальнейшего увеличения ширины очистного пространства.

Итоговое напряженно-деформированное состояние формируется последовательно: на начальном этапе рассчитывается величина естественного напряженно-деформированного состояния, затем его изменение в результате ведения горных работ (последовательная разработка камер слева направо. Одна камера

разрабатывается в течение 30 суток).

Начальные напряжения в модели задавались путем задания естественного поля напряженного состояния, состоящего из вертикальных напряжений, возникающих вследствие давления вышележащих пород, и горизонтальных напряжений, перераспределяющихся из вертикальных пропорционально коэффициенту бокового распора для каждого из видов пород. Для пластических и вязкопластических пород коэффициент был принят равным 1, для хрупких – 0,6.

За критерий трещинообразования в модели принято превышение предела прочности на растяжение. Развитие трещин происходит с учетом изменения жесткости материала в точках превышения напряжений.

Результаты

Результатом расчета является картина распределения напряжений над очистным пространством, а также точек с превышением растягивающих напряжений (Рис. 4). В реальности этим точкам будут соответствовать зоны разрыва сплошности. Для каждой из моделей были измерены высоты этих зон от отметки кровли продуктивного пласта до устья трещины.

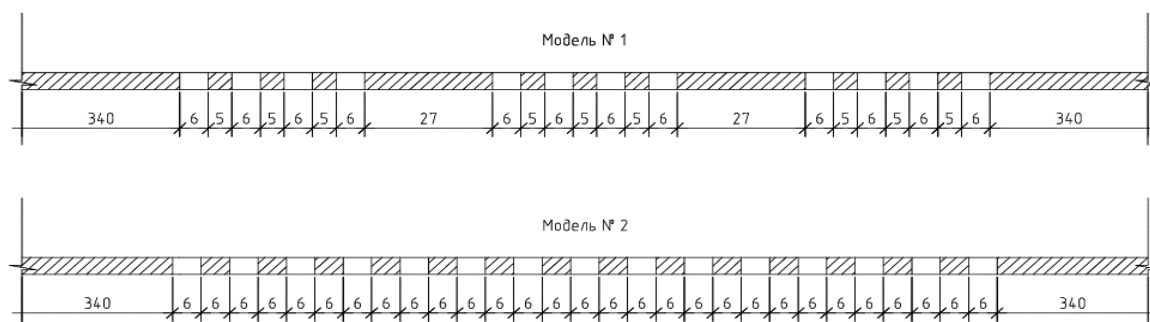


Рис. 3. Технологические схемы для моделирования (составлено автором)

Fig. 3. Numerical modelling design parameters (made by the author)

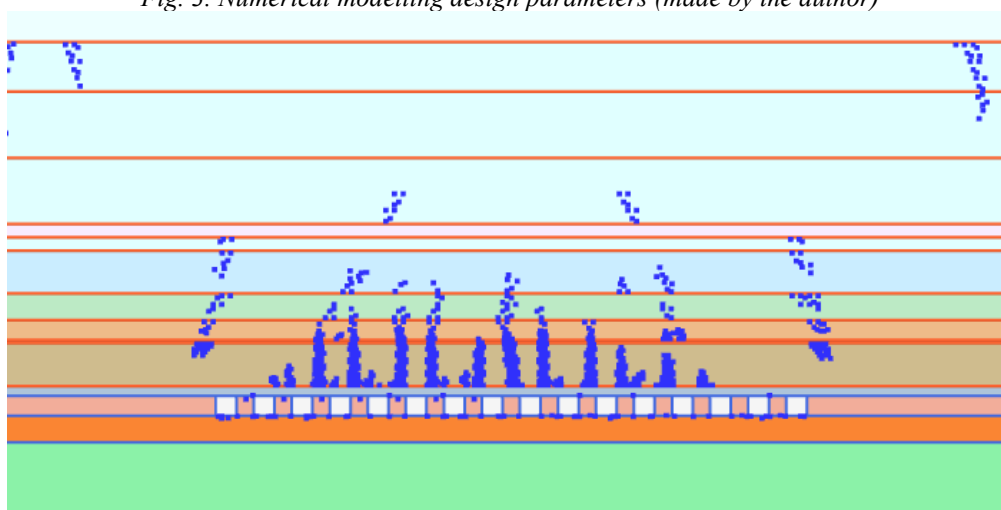


Рис. 4. Зоны образования трещин для модели 2 (составлено автором)

Fig. 4. Crack formation zones for model 2 (made by the author)

Для первой модели высота развития трещин выводилась с течением времени (Рис. 5), для второй – по мере развития очистного пространства (Рис. 6).

Максимальная высота трещинообразования в модели достигается примерно через 15 лет после окончания работ, в дальнейшем прорастания трещин не происходит.

Обсуждение

Трещины, возникающие над очистным пространством в результате ведения работ, развиваются в процессе прогиба водозащитной толщи. Максимальные трещины наблюдаются в

левой части очистного пространства, так как работы ведутся от крайней левой камеры вправо. Трещины возникают не только над очистным пространством, но и в краевых частях пласта, что может быть связано с изгибом ВЗТ. В основном трещины формируются в породах, склонных к хрупкому разрушению, что объясняется различием в энергии трещинообразования у хрупких и пластических пород.

Согласно полученным результатам, с течением времени высота трещин достигает своего предельного значения и в процессе дальнейшего деформирования пород не

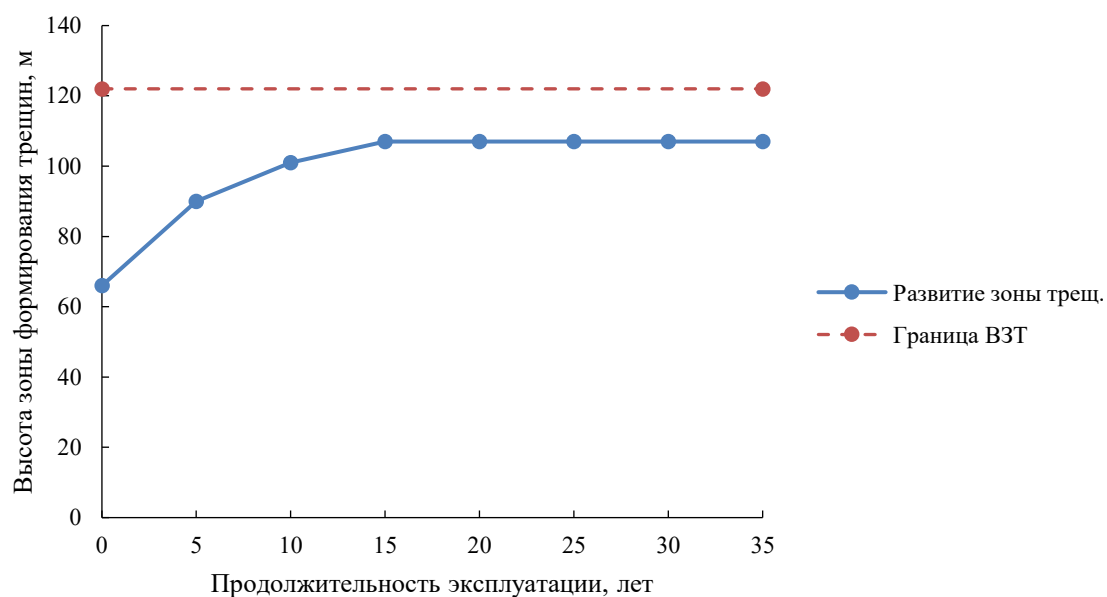


Рис. 5. Высота развития трещин с течением времени по модели 1 (составлено автором)

Fig. 5. Crack propagation height time dependence for model 1 (made by the author)

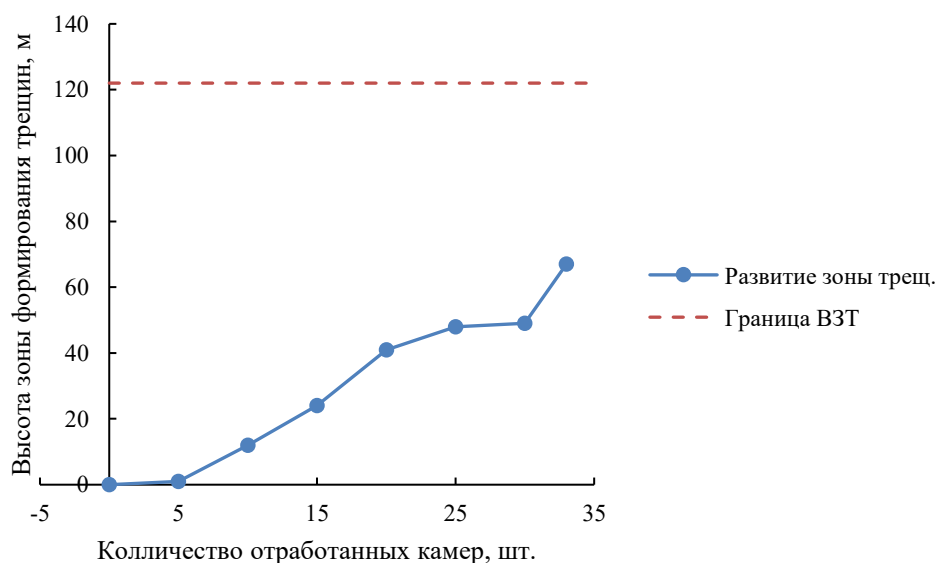


Рис. 6. Высота развития трещин в зависимости от ширины очистного пространства по модели 2 (составлено автором)

Fig. 6. Crack propagation height excavation length dependence for model 2 (made by the author)

увеличивается. Энергия разрушения в таком случае тратится не на прорастание трещины, а на расширение уже существующих. Для анализа ширины зоны нарушенных пород над очистным пространством необходимо дополнительно определить критерий, учитывающий соотношение нарушенных и ненарушенных пород. Последующее развитие трещин позволяет говорить о том, что массив в окрестностях очистного пространства находится в пластическом состоянии, а породы над пластом – в состоянии сильного разупрочнения. В таком состоянии массив не склонен к сохранению устойчивого равновесия.

Размер зоны трещинообразования увеличивается с увеличением ширины очистного пространства (увеличением числа камер). Предполагается, что бесконечное увеличение высоты развития трещин невозможно. В таком случае существует предельная высота трещинообразования, после достижения которой дальнейшее увеличение ширины очистного пространства не будет вносить значительный вклад в прогиб ВЗТ.

Как видно из Рис. 5 и 6, высота трещинообразования не зависит от выемочной мощности и от мощности ВЗТ (т. к. они остаются постоянными для двух моделей), однако может определяться общим коэффициентом извлечения в системе камер и целиков. При этом для камерной системы наблюдается ступенчатое увеличение высоты трещин, что свидетельствует о том, что процесс трещинообразования происходит нелинейно и зависит от накопленных в модели деформаций растяжения.

Выводы

Образование водопроводящих трещин в породах водозащитной толщи при разработке месторождений калийных солей приводит к угрозе безопасности рудника, поэтому сохранение сплошности ВЗТ является первостепенной задачей при ведении горных работ. В работе производится оценка высоты развития водопроводящих трещин для участка глубокого месторождения калийных солей. Геологический разрез подобран по усредненным данным для разрабатываемых глубоких месторождений. Поведение пород ВЗТ описывается с учетом их разупрочнения в результате трещинообразования. Для этого используется модель, позволяющая учитывать накопление повреждений. Модель Concrete может успешно применяться для решения задач прогноза напряженно-деформированного состояния водозащитной толщи и оценки образования в ней водопроводящих трещин, так как позволяет в рамках механики сплошной среды локализовать наличие трещин и их развитие.

Породы продуктивного и подстилающего пластов описываются вязкопластической моделью, так как их длительное поведение влияет на прогиб ВЗТ.

Численные модели построены для двух систем разработки – камерной и камерно-столбовой. На модели камерно-столбовой системы исследуется высота трещинообразования в зависимости от времени эксплуатации рудника – разработка ведется блоками камер. Ширина камер 6 м, разработка камеры идет в течение 30 дней с оставлением между камерами междукamerных целиков шириной 5 м. Между блоками камер оставляются целики шириной 27 м. По окончании разработки всех камер исследуется поведение системы в течение 30 последующих лет. Для камерной системы строится модель с постоянно увеличивающейся шириной очистного пространства – фронтом ведения работ. Ширина камер и ширина МКЦ составляет 6 м, время разработки одной камеры – 30 дней.

По результатам работы получено, что существует предельная высота развития трещинообразования для ширины очистного пространства и времени эксплуатации рудника. При увеличении ширины очистного пространства максимальная высота трещинообразования увеличивается нелинейно, что говорит о том, что рост трещин происходит с накоплением деформаций растяжения.

Моделирование реализовано из предположения, что контакт между породами ВЗТ является жестким, то есть в процессе деформирования не происходит разрывов и отделений слоев друг от друга. Однако в реальном массиве может наблюдаться проскальзывание слоев друг относительно друга и разрыв слоев в месте их контакта. Поэтому в дальнейших исследованиях планируется исследовать влияние контакта на величину прогиба ВЗТ и высоту прорастания трещин. Кроме того, в параметрах модели Concrete задается величина энергии разрушения, определяющая критерий раскрытия трещины. В модели энергия разрушения определялась исходя из условий сплошности материала пород ВЗТ, однако в реальности в породах наблюдается начальная трещиноватость, которая будет ухудшающим фактором при прорастании трещин.

Полученные значения высоты трещинообразования необходимо верифицировать, что планируется выполнить на следующих этапах исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zubov V. P., Smychnik A. D. The concept of reducing the risks of potash mines flooding caused by groundwa-ter inrush into excavations // Journal of

Mining Institute. 2015. Vol. 215. Pp. 29–37.

2. Andreiko S. S., Nesterova S. Y. The nature of sudden destruction of the near-contour part of the massif during the driving of development workings in the mine of the Gremyachinsky mining and processing plant // Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering. 2022. Vol. 22. № 3. Pp. 144–150. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.3.6.

3. Baryakh A. A., Smirnov E. V., Kvitkin S. Y., Tenison L. O Russian potash industry: issues of rational and safe mining // Mineral resources. 2022. Vol. 1. Pp. 41–50. DOI: 10.30686/1609.

4. Baryakh A. A., Tenison L. O. Justification of engineering safety criteria for undermining of water-proof layer in the upper kama salt deposit // Gornyi Zhurnal. 2021. № 4. Pp. 57–63. DOI: 10.17580/gzh.2021.04.08.

5. Pankov I. et al.. Studying the deformation and failure of salt rocks for geomechanical assessing the stability of elements of the system for the mining at potash deposits // Perm Scientific Center Journal. 2022. № 3. Pp. 14–24. DOI: 10.7242/2658-705x/2022.3.2.

6. Baryakh A. A., Gubanova E. A. On flood protection measures for potash mines // Journal of Mining Institute. 2019. Vol. 240. Pp. 613–620. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.613.

7. Шиман М. И. Предотвращение затопления калийных рудников. Москва : Недра, 1992.

8. Zubov V. P., Kovalski E. R., Antonov S. V., Pachgin V. V. Improving the safety of mines in developing verkh-nekamsk potassium and magnesium salts // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2019. Vol. 2019. № 5. Pp. 22–33. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-22-33.

9. Morozov I. A., Udarcev A. A., Pankov I. L. Laboratory deformation testing of salt rocks from the Gre-myachinsk and Upper Kama deposits // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2020. № 10. Pp. 16–28. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-16-28.

10. Dawsont P. R., Munson D. E. Numerical Simulation of Creep Deformations Around a Room in a Deep Potash Mine // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 1983. Vol. 20. №1. Pp. 33–42.

11. Pankov I. L., Morozov I. A. Salt rock deformation under bulk multiple-stage loading // Journal of Mining Institute. 2019. Vol. 239. Pp. 510–519. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.510.

12. Борисенко С. Г., Копица Ф. А. Камерная система разработки в горнорудной промышленности. Госгортехиздат, 1960.

13. Belikov A. A., Belikov N. A. Method of numerical modeling of rheological processes on the contour of single mine working // Mining Informational-Analytical Bulletin. 2024. Vol. 1. Pp. 94–108. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_94.

14. Хомченко В. Н., Карасев В. А., Масаев Ю. А. Зависимость расчетных размеров целиков от глубины разработки в системах с короткими очистными забоями // Вестник КузГТУ. 2015. Vol. 107. Pp. 45–50.

15. Слесарев В. Д. Определение оптимальных размеров целиков различного назначения. Москва : Углетехиздат, Министерство Западугля, 1948.

16. Методические указания по расчету податливых междукammerных целиков на калийных месторождениях. Ленинград, 1982.

17. Kovalskii E. R., Gromtsev K. V. Development of the technology of stowing the developed space during mining // Journal of Mining Institute. 2022. Vol. 254. Pp. 202–209. DOI: 10.31897/PMI.2022.36.

18. Belikov A. A., Belyakov N. A. Method of predicting the stress-strain state of interchamber pillars lined with a compliant rope fastener // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2023. № 4. Pp. 20–34. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_20.

19. Lyu C., Liu J., Ren Y., Liang, and Y. Liao, Study on very long-term creep tests and nonlinear creep-damage constitutive model of salt rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2021. Vol. 146. Oct. 2021. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104873.

20. Toksarov V. N., Morozov I. A., Beltyukov N. L., Udartsev A. A. Deformation of underground excavations un-der conditions of the Gremyachinsk potassium salt deposit // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2020. № 7. Pp. 113–124. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-113-124.

21. Karasev M. A., Protosenya A. G., Katerov A. M., Petrushin V. V. Analysis of shaft lining stress state in anhy-drite-rock salt transition zone // Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik. 2022. Vol. 37. № 1, Pp. 151–162. DOI: 10.17794/rgn.2022.1.13.

22. Zhuravkov M. A., Lopatin S. N. Numerical modeling of rheological processes at insufficient number of rheolog-ical constants // Fundamental and Applied Problems of Mining Sciences. 2021. Vol. 8. № 1. Pp. 79–85. DOI: 10.15372/fpvgn2021080111.

23. Belyakov N. A., Belikov A. A. Prediction of the integrity of the water-protective stratum at the Verkhnekam-skoye potash ore deposit // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2022. № 6–2. Pp. 33–46. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_33.

24. Trushko V. L., Baeva E. K. Substantiation of rational parameters of mine support system for underground roadways in difficult geological conditions // Mining Informational-Analytical Bulletin. 2023. Vol. 12. Pp. 55–69. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_55.

25. Karasev M. A., Petrushin V. V., Rysin A. I. The hybrid finite/discrete element method in description of macro-structural behavior of salt rocks // Mining Informational-Analytical Bulletin. 2023. № 4. Pp. 48–66. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_48.

26. Rakić D. M., Bodić A. S., Milivojević N. J., Dunić V. L., Živković M. M. Concrete damage plasticity material model parameters identification // J Serbian Soc Comput Mech. 2021. Vol. 15. № 2. Pp. 111–122. DOI: 10.24874/jsscm.2021.15.02.11.

27. Hafezolzghorani M., Hejazi F., Vaghei R., Bin

Jaafar M. S., Karimzade K. Simplified damage plasticity model for concrete. In Structural Engineering International, Int. Assoc. for Bridge and Structural Eng. Eth-Honggerberg, Feb. 2017. Pp. 68–78. DOI: 10.2749/101686616X1081.

28. Karasev M. A., Sotnikov R. O. Prediction of the stress state of the shotcreting support under repeated seismic load // Journal of Mining Institute. 2021. Vol. 251. Pp. 626–638. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.2.

29. Unteregger D., Fuchs B., Hofstetter G. A damage plasticity model for different types of intact rock // International Journal of Rock Mechanics and

Mining Sciences. 2015. Vol. 80. Pp. 402–411. Dec. 2015, DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.09.012.

30. Pourhosseini O., Shabanimashcool M. Development of an elasto-plastic constitutive model for intact rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2014. Vol. 66 Pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2013.11.010.

31. Karasev M. A. and Petrushin V. V. Methodological issues in determination of initial parameters for modeling deformation of rock salt as a polycrystalline discrete medium // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 024. Vol. 9. Pp. 47–64. 2024.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Андреева Анна Владиславовна, аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, (21-я лин. В.О., 2, Санкт-Петербург, 199106), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6484-2405>, e-mail: dementyeva_av@mail.ru

Протосеня Анатолий Григорьевич, заведующий кафедрой строительства горных предприятий и подземных сооружений, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, (21-я лин. В.О., 2, Санкт-Петербург, 199106), д.т.н., профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7829-6743>, e-mail: kaf-sgp@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Андреева Анна Владиславовна – обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, проведение исследований, выводы, написание текста статьи.

Протосеня Анатолий Григорьевич – постановка исследовательской задачи, курирование проведения научных экспериментов и написания статьи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

IMPROVING THE METHODOLOGY FOR PREDICTING FRACTURE ZONES IN WATERPROOF STRATA FOR DEEP POTASH DEPOSITS

Anatolii G. Protosenya
Anna V. Andreeva*

Empress Catherine II Saint-Petersburg mining university

* for correspondence: dementyeva_av@mail.ru



Article info

Received:

03 March 2025

Accepted for publication:

22 September 2025

Accepted:

30 September 2025

Abstract.

The development of potash deposits is associated with the necessity of protect the mine workings from intrusion of fresh water from overlying aquifers. Water can enter the mine workings through water-conducting fractures formed as a result of the deflection of water-bearing strata into the excavated space. To estimate the height of water-conducting fractures in modern deep potash mines, engineering calculation methods based on formulae with empirical coefficients are available. The methodology is based on a combination of analogues for shallow salt deposits and deep coal deposits. In order to calculate the height of fracture formation in relation to a specific working area, it is proposed to use numerical methods that consider real geology of the deposit and rock behavior. In this paper, numerical models of the field area with an average geological section are built, the model

Published:
23 October 2025

Keywords: Waterproof strata, crack propagation, potash mine, deep deposit, Concrete model, numerical modelling.

parameters are selected according to the average rock properties: for the rocks of water protection layers - concrete model, considering the damage accumulation, for the salt rocks of productive and underlying layers - model, considering their long-term deformation. The models estimate the dependence of the crack height on the working time and the width of the cleaning space. For this purpose, two numerical models were constructed: the model of the chamber-pillar system, with successive development of chambers in chamber blocks and subsequent calculation for 30 years, and the model of the chamber system with constantly increasing cleaning space. It was found that there is a limiting height of fracture formation, above which further increases in working time and cleaning space width do not affect the height of fracture propagation.

For citation: Protosenya A.G., Andreeva A.V. Improving the methodology for predicting fracture zones in waterproof strata for deep potash deposits. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 5(171):117-127. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-117-127, EDN: GJZGHJ

REFERENCES

1. Zubov V.P., Smychnik A.D. The concept of reducing the risks of potash mines flooding caused by groundwater inrush into excavations. *Journal of Mining Institute*. 2015; 215:29–37.
2. Andreiko S.S., Nesterova S.Y. The nature of sudden destruction of the near-contour part of the massif during the driving of development workings in the mine of the Gremyachinsky mining and processing plant. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*. 2022; 22(3):144–150. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.3.6.
3. Baryakh A.A., Smirnov E.V., Kvitkin S.Y., Tenison L.O. Russian potash industry: issues of rational and safe mining. *Mineral Resources*. 2022; 1:41–50. DOI: 10.30686/1609.
4. Baryakh A.A., Tenison L.O. Justification of engineering safety criteria for undermining of waterproof layer in the upper kama salt deposit. *Gornyi Zhurnal* 2021; 4:57–63. DOI: 10.17580/gzh.2021.04.08.
5. I. Pankov et al.. Studying the deformation and failure of salt rocks for geomechanical assessing the stability of elements of the system for the mining at potash deposits. *Perm Scientific Centre Journal*. 2022; 3:14–24. DOI: 10.7242/2658-705x/2022.3.2.
6. Baryakh A.A., Gubanova E.A. On flood protection measures for potash mines. *Journal of Mining Institute*. 2019; 240:613–620. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.613.
7. Shiman M.I., Preventing flooding of potash mines. Moscow: Nedra; 1992.
8. Zubov V.P., Kovalski E.R., Antonov S.V., Pachgin V.V. Improving the safety of mines in developing verkhnekamsk potassium and magnesium salts. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019; 5:22–33. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-22-33.
9. Morozov I.A., Udarcev A.A., Pankov I.L. Laboratory deformation testing of salt rocks from the Gremyachinsk and Upper Kama deposits. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020; 10:16–28. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-16-28.
10. Dawsont P.R., Munson D.E. Numerical Simulation of Creep Deformations Around a Room in a Deep Potash Mine. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 1983; 20(1):33–42.
11. Pankov I.L., Morozov I.A. Salt rock deformation under bulk multiple-stage loading. *Journal of Mining Institute*. 2019; 239:510–519. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.510.
12. Borisenko S.G., Kopitsa F.A. Chamber system of development in the mining industry. Gos-Gortekhzdat, 1960.
13. Belikov A.A., Beliakov N.A. Method of numerical modelling of rheological processes on the contour of single mineworking. *Mining Informational-Analytical Bulletin*. 2024; 1:94–108. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_94.
14. Khomchenko V.N., Karasev V.A., Masaev Y.A. Dependence of calculated sizes of pillars on the depth of mining in systems with short mining faces. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015; 107:45–50.
15. Slesarev V.D. Determination of optimal sizes of pillars for various purposes. Moscow: Ugletekhizdat. Ministry of Zapadugol; 1948.
16. Methodical guidelines for the calculation of pliable inter-chamber targets at potash deposits. Leningrad, 1982.
17. Kovalskii E.R., Gromtsev K.V. Development of the technology of stowing the developed space during mining. *Journal of Mining Institute*. 2022; 254:202–209. DOI: 10.31897/PMI.2022.36.
18. Belikov A.A., Belyakov N.A. Method of predicting the stress-strain state of interchamber pillars lined with a compliant rope fastener. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023; 4:20–34. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_20.
19. Lyu C., Liu J., Ren Y., Liang C., Liao Y. Study on very long-term creep tests and nonlinear creep-damage constitutive model of salt rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021; 146. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104873.

20. Toksarov V.N., Morozov I.A., Beltyukov N.L., Udartsev A.A. Deformation of underground excavations under conditions of the Gremyachinsk potassium salt deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020; 7:113–124. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-113-124.

21. Karasev M.A., Protosenya A.G., Katerov A.M., Petrushin V.V. Analysis of shaft lining stress state in anhydrite-rock salt transition zone. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*. 2022; 37(1):151–162. DOI: 10.17794/rgn.2022.1.13.

22. Zhuravkov M.A., Lopatin S.N. Numerical modelling of rheological processes at insufficient number of rheological constants. *Fundamental and Applied Problems of Mining Sciences*. 2021; 8(1):79–85. DOI: 10.15372/fpvgm.2021080111.

23. Belyakov N.A., Belikov A.A. Prediction of the integrity of the water-protective stratum at the Verkhnekamskoye potash ore deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022; 6–2:33–46. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_2_33.

24. Trushko V.L., Baeva E.K. Substantiation of rational parameters of mine support system for underground roadways in difficult geological conditions. *Mining Informational-Analytical Bulletin*. 2023; 12:55–69. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_55.

25. Karasev M.A., Petrushin V.V., Rysin A.I. The hybrid finite/discrete element method in description of macrostructural behavior of salt rocks. *Mining informational and analytical bulletin*. 2023; 4:48–66. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_48.

26. Rakić D.M., Bodić A.S., Milivojević N.J., Dunić V.L., Živković M.M. Concrete damage plasticity material model parameters identification. *J Serbian Soc Comput Mech*. 2021; 15(2):111–122. DOI: 10.24874/jsscm.2021.15.02.11.

27. Hafezolghorani M., Hejazi F., Vaghei R., Bin Jaafar M.S., Karimzade K. Simplified damage plasticity model for concrete. In *Structural Engineering International, Int. Assoc. for Bridge and Structural Eng. Eth-Honggerberg*. Feb. 2017. Pp. 68–78. DOI: 10.2749/101686616X1081.

28. Karasev M.A., Sotnikov R.O. Prediction of the stress state of the shotcreting support under repeated seismic load. *Journal of Mining Institute*. 2021; 251:626–638. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.2.

29. Unteregger D., Fuchs B., Hofstetter G., A damage plasticity model for different types of intact rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015; 80:402–411. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.09.012.

30. Pourhosseini O., Shabanimashcool M. Development of an elasto-plastic constitutive model for intact rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014; 66:1–12. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2013.11.010.

31. Karasev M.A., Petrushin V.V. Methodological issues in determination of initial parameters for modeling deformation of rock salt as a polycrystalline discrete medium. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024; 9: 47–64.

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

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Anna V. Andreeva, PhD student, Empress Catherine II Saint-Petersburg mining university, (199106, Russia, Saint Petersburg, 21-st V.O. Line, 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6484-2405>, e-mail: dementyeva_av@mail.ru

Anatolii G. Protosenya, Head of Constructing of Underground Structures Department, Empress Catherine II Saint-Petersburg mining university, (199106, Russia, Saint Petersburg, 21-st V.O. Line, 2), Dr. Sci (Eng), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7829-6743>, e-mail: kaf-sgp@mail.ru

Contribution of the authors:

Anna V. Andreeva – literature review, data collection, data analysis, research and experiment execution, conclusion drawing and paper writing

Anatolii G. Protosenya – research problem statement, conceptualization of research, writing the text.

All authors have read and approved the final manuscript.

