ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(6–1):100–113
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.2 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_100

РАЗВИТИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ КРЕПИ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТВОЛА, ПРОЙДЕННОГО В СОЛЯНОМ МАССИВЕ

А. Г. Протосеня[1], А. М. Катеров[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, 199106, Россия

Аннотация: Представлено исследование развития напряженно-деформированного состояния комбинированной крепи протяженного участка вертикального ствола, пройденного в соляном массиве на глубине 1250 м. Прогноз напряженно-деформированного состояния крепи выполнялся для 4 участков по трассе ствола, расположенных на глубине 500 м, 750 м, 1000 м 1250 м. В рамках исследования выполнен анализ развития напряженно-деформированного состояния комбинированной крепи ствола, рассмотренных участков для: чугунно-бетонной (жесткой) крепи и податливой крепи, внутренний слой выполнен из чугунных тюбингов, а внешний – из пенополистирола. Величина бетонного и податливого слоя принималась равной 300 мм. Для увеличения точности прогноза напряженно-деформированного состояния чугунная тюбинговая колонна рассматривается с учетом геометрической конфигурации тюбинга с маркировкой типоразмера 7,5–100 из чугуна марки ВЧ-70. Решение задачи выполняется в объемной постановке с учетом развития длительных деформаций ползучести, реализующихся за срок эксплуатации горной выработки – 50 лет. Величина начального поля напряжений равна гидростатическому давлению на рассматриваемых участках вертикального ствола. В рамках исследовательской работы выполнено сравнение напряжений в чугунной тюбинговой крепи и даны рекомендации по области применения той или иной конструкции крепи.

Ключевые слова: Крепь вертикального ствола, комбинированная крепь, компенсационный слой, податливая крепь ствола, соляной массив, реология, моделирование длительных деформаций соляного массива, вязкопластическая модель, степенная модель.

Для цитирования: *Протосеня А. Г., Катеров А. М.* Развитие напряженно-деформированного состояния комбинированной крепи вертикального ствола, пройденного в соляном массиве // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6–1. – С. 100–113. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_100.

Development of stress and strain state of combined support for a vertical shaft driven in salt massif

A. G. Protosenja[1], A. M. Katerov[1]

[1] Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, 199106, Russia

Abstract: The paper presents a study of stress-strain state of a combined shaft lining of an extended section of a vertical shaft developed in a salt massif at a depth of 1250 m. A

© А. Г. Протосеня, А. М. Катеров. 2022

prediction of stress-strain state of lining was carried out for 4 sections along the shaft at depths of 500 m, 750m, 1000m and 1250 m. Within the framework of the research, stress-strain state development of combined shaft lining “rigid” – cast-iron-concrete lining and compressible lining, the inner layer is made of cast-iron tubing and the outer one of polystyrene foam. The size of the concrete and compression layer was assumed to be 300 mm. To increase prediction accuracy of stress-strain state of cast-iron tubing column is considered taking into account geometric configuration of tubing with marking of size 7,5–100 made of cast-iron grade EN-GJS-700–2. Solution of the problem is carried out in volumetric formulation taking into account development of long-term creep deformations which take place during 50 years of mine working life. Value of initial stress field is equal to hydrostatic pressure which is realized on considered parts of vertical shaft. Within the framework of the research work, stresses realised in cast-iron tubing lining have been compared and recommendations for the field of application of one or another lining design have been given.

Key words: Vertical shaft support, combined support, expansion layer, compliant shaft support, salt-mass, rheology, modelling of long deformations of salt-mass, viscoplastic model, power low model.

For citation: Protosenja A. G., Katerov A. M. Development of stress and strain state of combined support for a vertical shaft driven in salt massif. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6–1):100–113. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_100.

Введение

При освоении глубоких месторождений полезных ископаемых подземным способом одним из главных этапов освоения месторождения является обеспечение доступа к полезному ископаемому. Строительство и эксплуатация вертикальных стволов на калийных месторождениях осложнены развитием длительных пластических деформаций соляного массива. По мере увеличения глубины ствола интенсивность развития геомеханических процессов в окрестности подземного сооружения интенсивно растет. Поле естественных напряжений соляного массива на глубинах более 1000 м приравнивается к гидростатическому [*1]*. Развития деформаций ползучести соляных пород приводит к потере устойчивости вертикального ствола. В связи с этим возникает необходимость подбора рациональной конструкции крепи вертикального ствола, позволяющей обеспечить безопасную работу предприятия на этапе строительства и эксплуатации.

В практике сооружения вертикальных стволов применяются различные конструкции крепи *[2, 3]*. Крепи для стволов, расположенных в соляном массиве, можно разделить на две группы по способу работы*:* «жесткие» и обладающие радиальной податливостью. Более изученными и применяемыми являются конструкции жестких крепей*, к которым* можно отнести: бетонные, чугунные, стальные и вариации комбинаций вышеперечисленных материалов. Основная идея применения данных конструкций крепи при сооружении стволов в соляном массиве является способность крепи обеспечивать жесткий отпор непрерывно смещающемуся массиву, тем самым значительно уменьшая интенсивность развития реологических процессов. Исходя из практики эксплуатации стволов с применением жестких конструкций крепи, нагрузка, вызванная непрерывным смещением пород вокруг выработки, приводит к частичной или полной потере несущей способности крепи [*1]*. В связи с потерей устойчи-

вости жесткой крепи стволов на калийных месторождениях проблемные участки стали перекреплять крепью, обладающей радиальной податливостью. Податливые конструкции крепей вертикальных стволов представляют собой многослойные комбинированные крепи, внешний податливый слой которых контактирует с породным массивом и внутренним, несущим, слоем. Податливый слой выполняется из материала, обладающего способностью к уплотнению за счет консолидации, например сыпучие материалы, ячеистые бетоны, пенополистирол. Принцип работы крепи заключается в том, что податливый слой за счет своих деформационных свойств будет воспринимать нагрузку, вызванную смещениями соляного массива, не передавая ее на жесткую крепь ствола, до момента, пока не будет реализован потенциал деформируемости материала. После исчерпания потенциала деформируемости материала, в работу вступает несущая (жесткая) крепь ствола. На рис. 1 представлен общий вид крепи.

Применение компьютерных технологий при прогнозе напряженно-деформированного состояния крепи вертикальных стволов было выполнено многими исследователями. В работе [4] представлена методика прогноза напряженно-деформированного состояния жесткой и податливой крепей вертикального ствола, расположенного в соляном массиве с учетом срока эксплуатации в пространственной постановке. Чугунная крепь рассматривалась как многослойная среда с различной жесткостью. В работе [5] приведен прогноз нагрузок на крепь вертикального ствола, расположенного в соляном массиве, где рассматривается жесткая бетонная крепь и податливая крепь из пенополистирола и внутреннего бетонного слоя. В работе [6] выполнено численное моделирование развития напряжений в комбинированной крепи вертикального ствола в соляном массиве с применением податливого слоя из пенополистирола, задача решалась в объемной постановке. В работе [7] представлена методика прогноза напря-

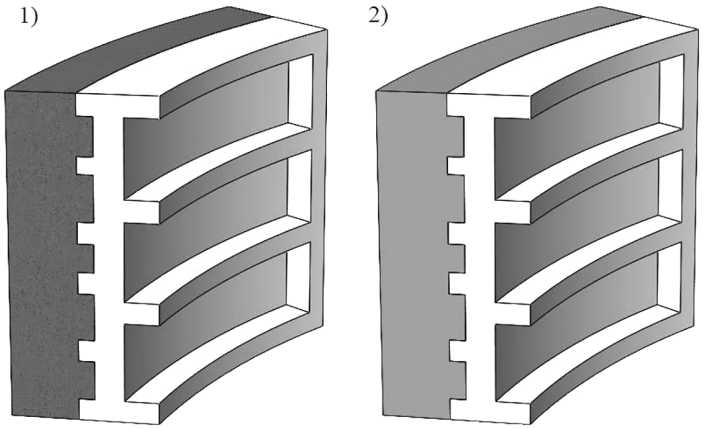

Рис. 1. Схемы конструкций комбинированных крепей: 1 — чугунно-бетонная крепь; *2* — податливая крепь из пенополистирола (внешний слой) и чугунных тюбингов (внутренний слой)

Fig. 1. Diagrams of combined lining constructions: 1 — cast-iron-concrete lining; *2* — compression lining made of polystyrene foam (outer layer) and cast-iron tubing (inner layer)

женно-деформированного состояния комбинированной крепи вертикального ствола с податливым слоем. Авторами работы [8] было проведено сравнение результатов натурных наблюдений с результатами напряженно-деформированного состояния крепи, полученной при помощи моделирования чугунной крепи с учетом геометрической особенности конструкции тюбинга. В работе [9] представлен прогноз нагрузок на тюбинговую крепь вертикального ствола в плоской постановке, в рамках работы тюбинговая крепь рассматривалась в продольном сечении по трассе стола с отражением геометрии ребер жесткости. В исследовании [10] проведен расчет нагрузок на сборную крепь вертикального ствола в плоской и объемной постановке. В работе [11] предложена методика определения параметров крепи вертикального ствола, основанная на прогнозе напряженного состояния вокруг ствола. В работе [12] проведены исследования напряженного состояния временной и постоянной крепи глубокого вертикального ствола рудника Виктория на основании численного моделирования. В работе [13] рассматривается объемная задача, в рамках которой выполнено моделирование бетонной и чугунной тюбинговой крепи вертикального ствола небольшой глубины, расположенного в неравномерно оттаиваемом ледопородном массиве. Тюбинговая крепь рассматривалась как однослойная упругая среда. В диссертационной работе [14] автор описывает методику моделирования комбинированной податливой крепи ствола, расположенного в соляном массиве шахты Болби, расположенной в Англии. Задача рассматривалась как в плоской, так и в объемной постановке. В работе автора [15] выполнено сравнение методик расчета крепи вертикального ствола в породах, склонных к ползучести. Рассматривается аналитический и численные методы расчета.

Изучив работы исследователей, можно сделать вывод, что в основном исследования касаются конкретных производственных условий и применяемых конструкций крепи. В связи с этим возникает необходимость сравнения развития напряженного состояния комбинированной крепи и зоны ее рационального применения. Для улучшения достоверности прогноза нагрузок на крепь вертикального ствола необходимо рассматривать крепь из чугунных тюбингов с учетом геометрической конфигурации.

Методы. Численное моделирование напряженного состояния крепи вертикального ствола

Прогноз развития напряженно-деформированного состояния комбинированной крепи вертикального ствола, заложенного в соляном массиве на глубине 1250 м, выполнялся в пространственной постановке с учетом срока эксплуатации подземного сооружения. Апробирование предложенного подхода к прогнозу напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола было выполнено для крепи стволов двух рудников: Закарпатского и Пийло [5].

В работе представлен вертикальный ствол с диаметром в проходке, равным 8,3 м, и диаметром в свету, равным 7,0 м. Величина внешнего слоя для обоих типов крепи равна 0,3 м. Рассматривается 4 сечения крепи протяженного ствола, участки располагаются с шагом 250 м с отметки 500 м и до 1250 м.

Результаты численного моделирования напрямую зависят от подбора параметров модели деформирования материалов. На рис. 2 представлена схема модели исследуемых участков. Задача

решается в осесимметричной постановке с использованием программного комплекса Abaqus CAE. Численная модель состоит из соляного массива (50 м), в котором пройден вертикальный ствол, закрепленный комбинированной крепью. По периметру модель была ограничена в перемещениях, в массиве было создано поле естественных напряжений, равное гидростатическому, и определялось по градиенту давления 0,0226 МПа/м. К верхней и нижней частям модели прикладывалось давление, равное гидростатическому. Для учета развития напряжений в конструкции крепи ствола была построена пространственная модель, учитывающая геометрическую конфигурацию тюбинговой крепи.

Для получения достоверных результатов моделирования необходимо подобрать модели деформирования породного массива и материалов крепи, отражающие прочностные и деформационные характеристики материала. Выбор модели деформирования соляного массива является сложной задачей, поскольку соляные породы обладают реологическими свойствами [16—18]. Для описания реологических свойств соляного массива использовалась феноменологическая модель, описанная степенным законом ползучести — Power low [19], позволяющая описать первую стадию ползучести и частично вторую. Комбинированная крепь вертикального ствола создает отпор и препятствует интенсивности развития реологических процессов. В связи с этим

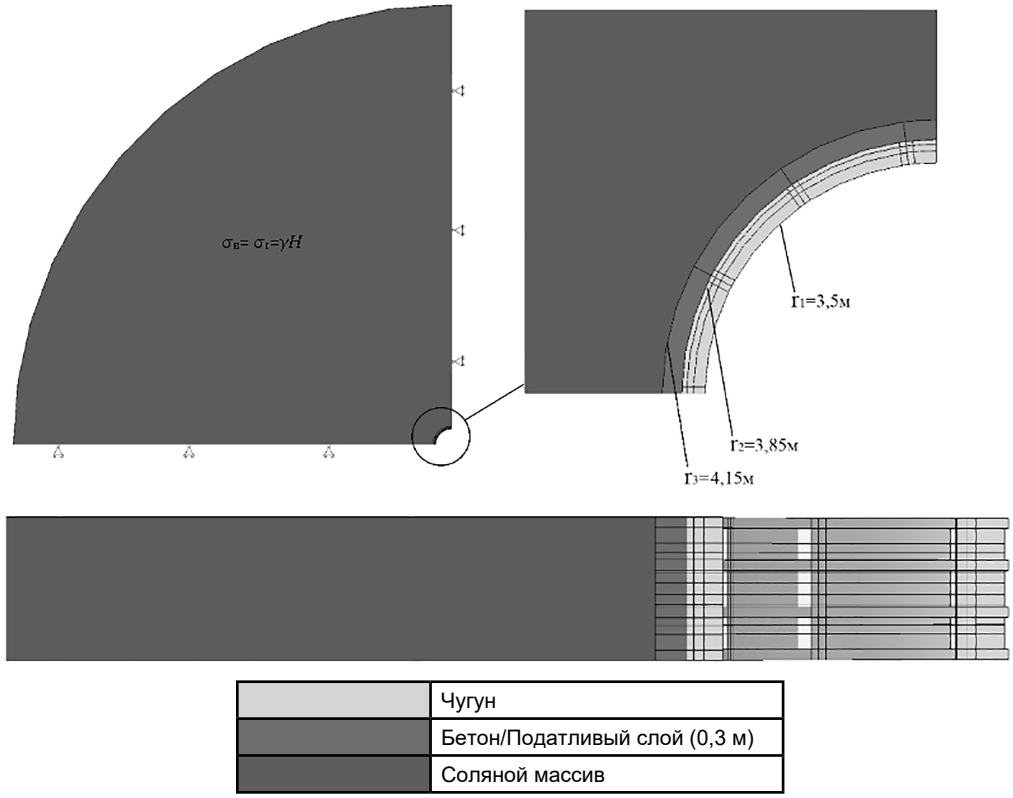

Рис. 2. Схема модели исследуемого участка
Fig. 2. Schematic of the model of the study area

развитие третьей — прогрессирующей ползучести — не прогнозируется.

Таким образом, выбранная модель обладает необходимыми функционалом для решения постановленной задачи. Зависимость между приращением деформаций ползучести и состоянием породного массива представлена формулой:

$$\dot{\varepsilon}^{cr} = (Aq^n((m+1)\varepsilon_{cr})^m)^{\frac{1}{m+1}}, \qquad (1)$$

где *A, m, n* — показатели модели; $\overline{\sigma}_{cr}$ — эквивалентные напряжения ползучести; $\dot{\varepsilon}_{cr}$ — эквивалентные относительные деформации ползучести. Верификация модели производилась на основании содержащихся в работе [20] натурных данных для незакрепленной горной выработки, расположенной на глубине порядка 850 м. На рис. 3 представлены результаты верификации параметром модели деформирования соляного массива.

Проанализировав кривые натурных наблюдений и результатов численного моделирования, можно сделать вывод, что подобранные параметры позволяют с необходимой точностью описать деформационное поведение соляного массива. Данная модель будет применяться для прогноза напряжений в тюбинговой колонне крепи ствола. Параметры модели деформирования соляного массива приведены ниже в табл.

Поведение чугуна и бетона рассматривалось в рамках теории упругости [21]. Принято, что модуль деформации бетона составляет 30 ГПа при коэффициенте Пуассона 0,2. При выполнении расчетов учитывалось снижение прочностных характеристик бетона, связанных с особенностью его длительного деформирования. Для чугунной крепи, представленной тюбингом типоразмера «7,0—100» модуль упругости составлял 180 ГПа при коэффициенте Пуассона 0,3.

В качестве модели описания поведения пенополистирола, используемого в качестве компенсационного слоя

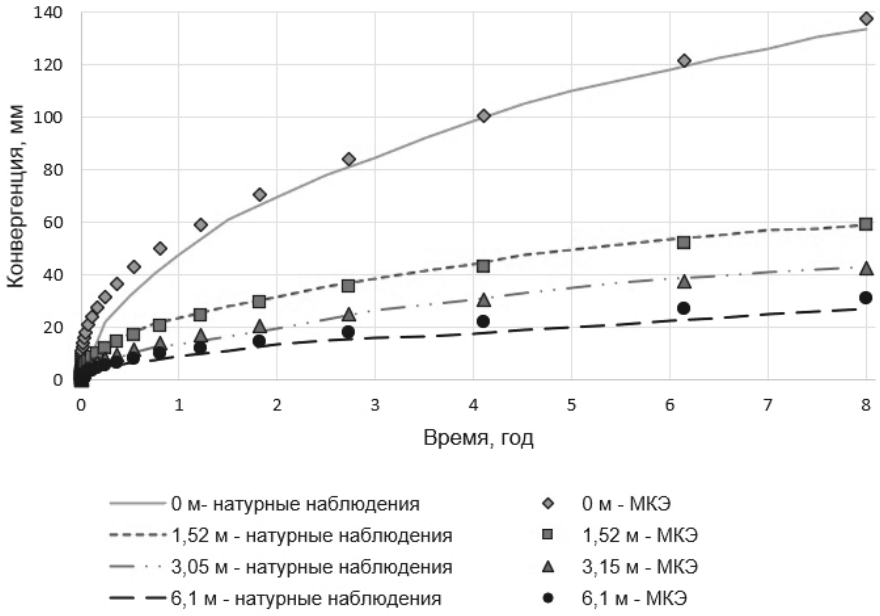

Рис. 3. Верификация результатов МКЭ (метод конечных элементов) с натурными данными
Fig. 3. Verification of FEM results with field data

Таблица
Усреднённые механические характеристики соляного массива
Averaged mechanical characteristics of the salt mass

Упругие параметры материала		
№	Параметр	Значение
1	Модуль упругости, МПа	20000
2	Коэффициент Пуассона	0,35

использовалась модель Crushable Foam [5, 22]. Применение данной модели позволяет увеличить точность прогноза напряженно-деформированного состояния комбинированной крепи за счет рассмотрения физико-механических свойств материала. Модель описывает пластические деформации материала. Основной особенностью модели является изменение объема за счет консолидации пористой структуры выбранного материала –пенополистирола. На рис. 4 приведена диаграмма уплотнения пенополистирола, применяемого в качестве податливого слоя комбинированной крепи. Для описания упругой деформации материала был принят модуль деформации 10 МПа при коэффициенте Пуассона 0,2.

Результаты

Формирование напряженного состояния жесткой крепи вертикального ствола на разных участках протяженной части показано на рис. 5.

Максимальные напряжения, возникшие в чугунной тюбинговой крепи за 50 лет на глубине 500 м, составили 183 МПа, для глубины 750 м — 264 МПа, для 1000 м — 390 МПа и 526 МПа для глубины 1250 м. Приращение напряжений по мере увеличения глубины ствола, можно определить как равномерно развивающиеся и равные 1,4 раза. Максимальные значения реализуются во внутренних ребрах тюбинга. Аналогичная диаграмма, была построена для податливой крепи и представлена на рис. 6.

Максимальные напряжения в податливой крепи ствола для глубины 500 м составляют 6,3 МПа, для глубины 750 м — 8 МПа, для 1000 м — 25 МПа и 100 МПа при глубине 1250 м. Стоит отметить, что в отличии от жесткой крепи, приращение напряжений в податливой крепи в разы отличается и равно: для участка 500 м — 750 м ≈ 1,25 раза; для участка 750 м — 1000 м ≈ 3,1 раза; для 1000 м — 1250 м ≈ 4 раза. В первую очередь это связано с исчерпаемостью потенциала сжимаемости материала податливого слоя.

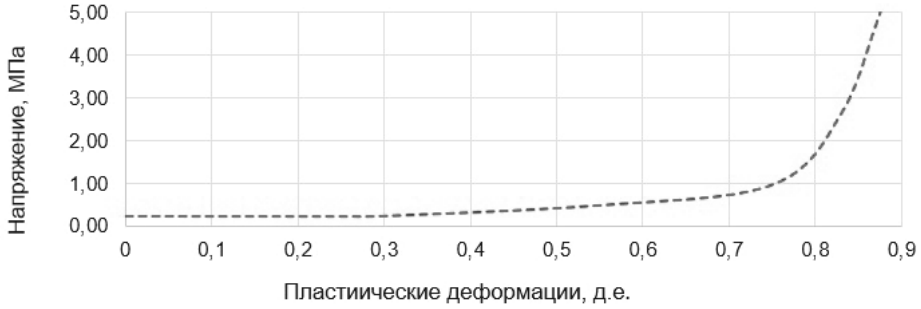

Рис. 4. Диаграмма уплотнения пенополистирола
Figure 4. Compacting diagram for polystyrene foam

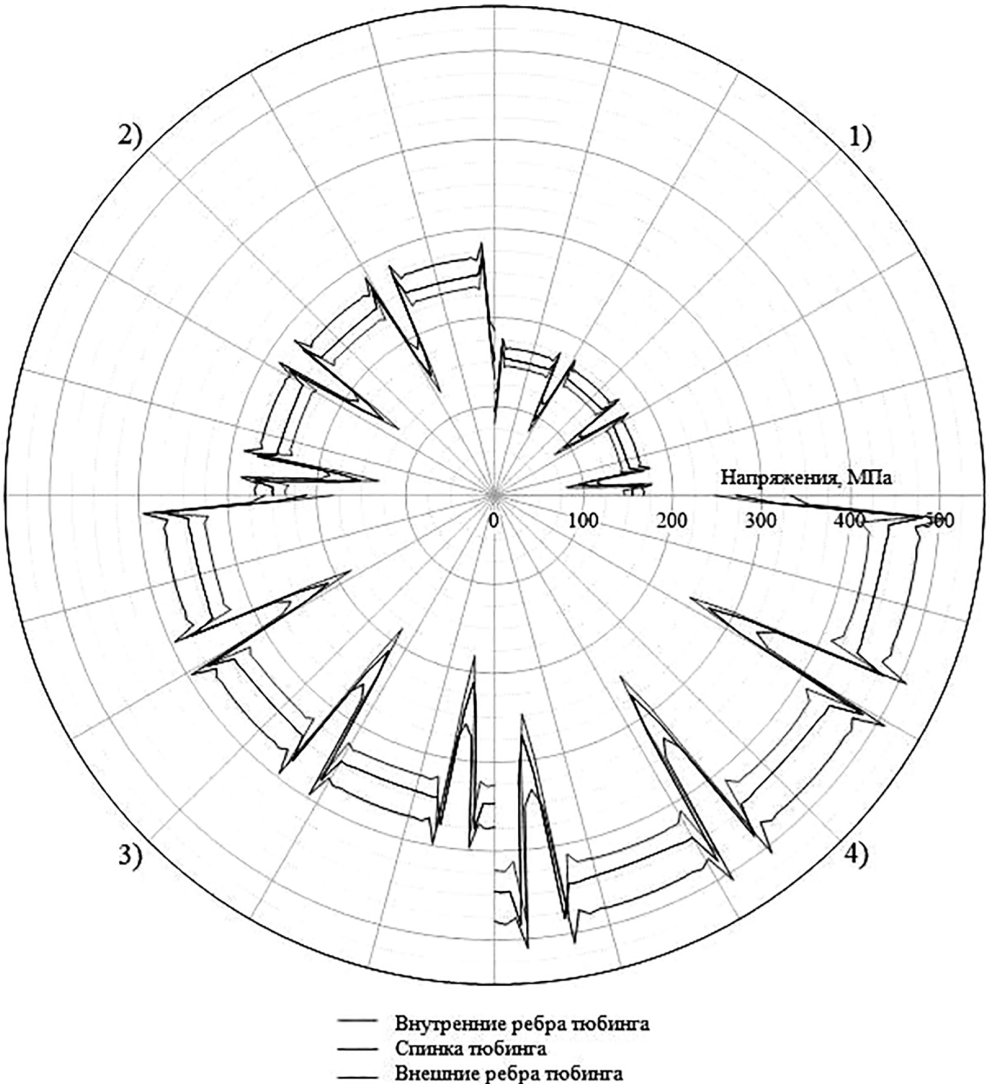

Рис. 5. Диаграмма развития максимальных напряжений в жесткой комбинированной крепи (измерения НДС выполнены в чугунной тюбинговой крепи) вертикального ствола на глубине: 1—500 м; 2—750 м; 3—1000 м; 4—1250 м.

Fig. 5. Diagram of maximum stresses development in a rigid combined lining (stress-strain state measurements are made in cast-iron tubing lining) of a vertical shaft at depths of: 1—500 m; 2—750 m; 3—1000 m; 4—1250 m.

Обсуждения результатов

На рис. 7 приведен график развития напряжений для разных участков ствола с учетом срока эксплуатации 50 лет. На графике выделен предел текучести чугуна ВЧ-70 равный 420 МПа, данная величина будет служить границей допустимых напряжений в тюбинговой крепи ствола.

Полученные результаты наглядно демонстрируют основные отличия жесткой и податливой крепи друг от друга.

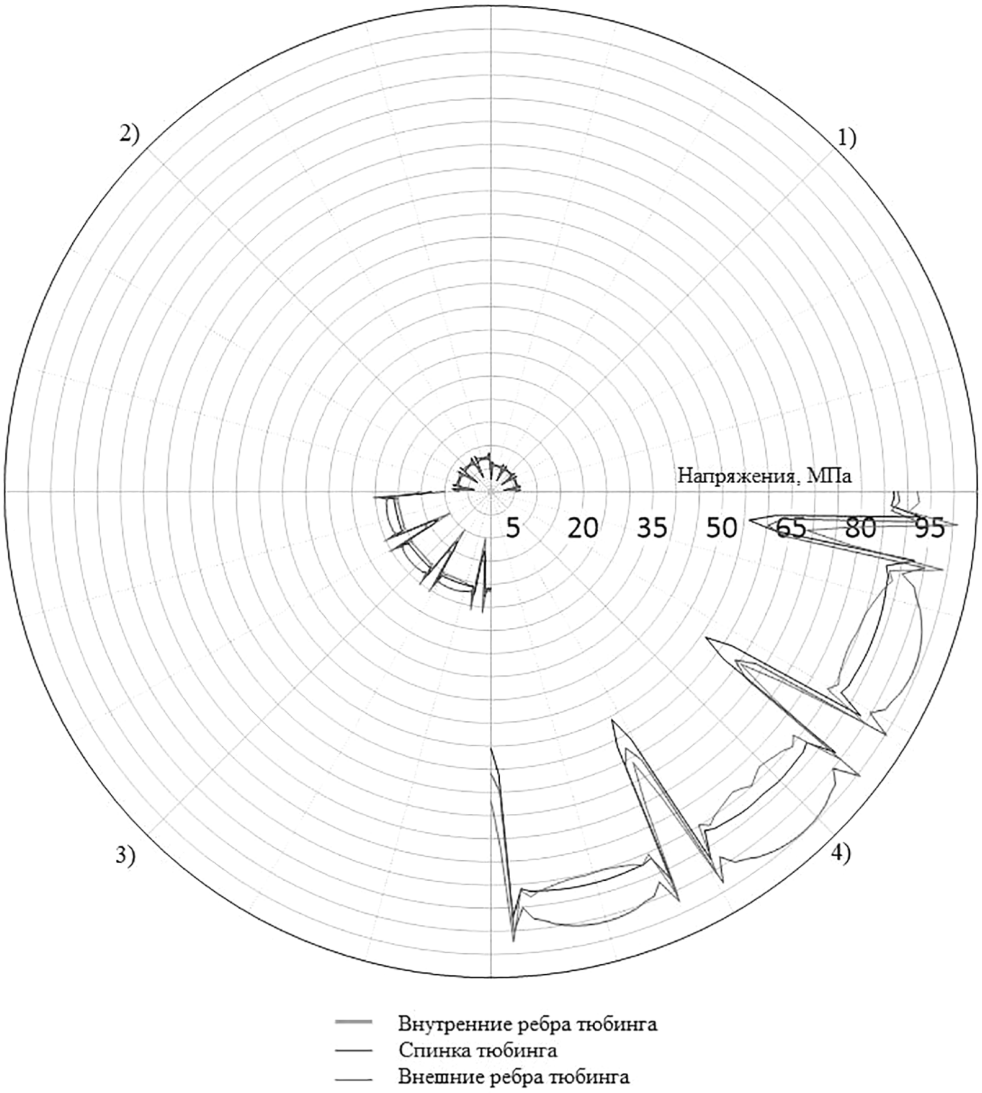

Рис. 6. Диаграмма развития максимальных напряжений в податливой комбинированной крепи (измерения НДС выполнены в чугунной тюбинговой крепи) вертикального ствола на глубине: 1—500 м; 2—750 м; 3—1000 м; 4—1250 м.
Fig. 6. Development diagram of maximum stresses in composite composite lining (stress-strain state measurements are made in cast-iron tubular lining) of vertical shaft at depths: 1—500 m; 2—750 m; 3—1000 m; 4—1250 m

Проанализировав график развития напряжений для жесткой крепи, стоит отметить, что большая часть напряжений реализуются в первые годы эксплуатации ствола, в то время как напряжения в податливой крепи плавно развиваются на протяжении всего срока эксплуатации.

Проанализировав диаграммы развития напряжений, можно сделать вывод, что величина напряжений, рав-

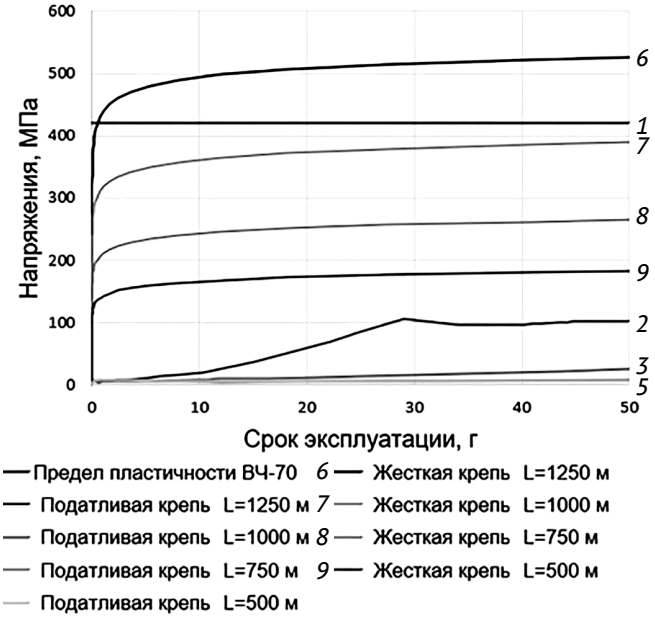

Рис. 7. Диаграмма развития максимальных напряжений в комбинированной крепи (замеры в чугунных тюбингах) вертикального ствола на разных глубинах.
Fig. 7. Maximum stress development diagram for a combined lining of vertical shaft with a cast-iron casing at different depths

ная 526 МПа, превысила величину предела пластичности ВЧ-70, это говорит о том, что применение «жесткой» конструкции крепи на глубине 1250 м в той конфигурации, которая рассматривалась при решении задачи, не обеспечивает целостности крепи ствола. Для обеспечения запаса прочности необходимо использование более высокой марки чугуна либо использование тюбинга другого типоразмера. Изучив диаграмму развития максимальных напряжений для податливой крепи на глубине 1250 м, стоит отметить, что предел потенциала деформируемости податливого слоя был исчерпан на 27 год, после чего характер развития напряжений стал схож с развитием напряжений в жестокой крепи.

На рис. 8 приведена диаграмма развития максимальных напряжений по трассе ствола.

Данная диаграмма демонстрирует область рационального применения той или иной конструкции крепи. До глубины 1050 м не происходит разрушения жесткой крепи ствола, далее по мере увеличения глубины происходит ее разрушение. Для крепления более глубоких участков ствола с использованием жесткой крепи следует изменить типоразмер тюбинговой крепи на больший либо увеличить толщину бетонного слоя. Однако увеличение бетонного слоя повлечет за собой увеличение диаметра проходимого ствола, поэтому стоит переходить на податливые конструкции крепей с величиной податливого слоя 300 мм.

Заключение

В работе рассмотрен прогноз НДС протяженного участка комбинированной крепи вертикального ствола, прой-

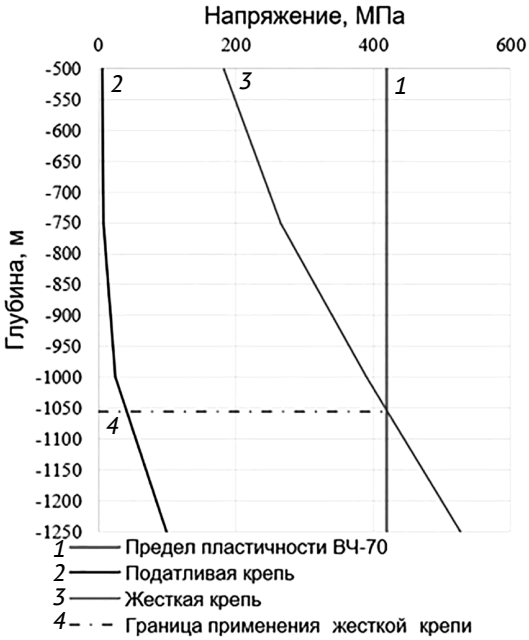

Рис. 8. Диаграмма развития максимальных напряжений за 50 лет комбинированной крепи вертикального ствола по трассе ствола
Fig. 8. Diagram of maximum stress development over 50 years of a combined vertical shaft lining along the shaft trace

денного в соляном массиве на глубине 1250 м, по трассе ствола было выделено 4 участка для замера развития напряжений в крепи. В рамках исследования было выполнено сравнения развития НДС для двух типов комбинированных крепей, таких как: жесткая комбинированная крепь и податливая. Пространственная постановка задачи позволила получить качественную картину развития НДС в чугунной тюбинговой колоне комбинированной крепи.

На основе выполненных расчетов даны рекомендации по выбору крепления участков вертикального ствола, расположенного в соляном массиве. Для протяженного участка ствола, находящегося в отметках –500 м до –1050 м стоит применять жесткую комбинированную крепь, для крепления участка –1050 м до –1250 следует применять податливую конструкцию крепи. Представленная методика и результаты могут быть применены при обосновании конструкции крепи вертикальных стволов, а также при обосновании типоразмера чугунных тюбингов, для стволов, пройденных в соляном массиве на больших глубинах.

Вклад авторов

Катеров А. М. — Разработка численной модели, оформление результатов моделирования, написание текста статьи.

Протосеня А. Г. — постановка задачи исследования, редакция текстового и графического материала статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Казикаев Д. М.*, *Сергеев С. В.* Диагностика и мониторинг напряженного состояния крепи вертикальных стволов. — М.: Горная книга, 2011. — 244 с.
2. *Ольховиков Ю. П.* Крепь капитальных выработок калийных и соляных рудников. — М.: Недра, 1984. — 238 с.
3. *Булычев Н. С.*, *Абрамсон Х. И.* Крепь вертикальных стволов шахт. — М.: Недра, 1978. — 300 с.
4. *Карасев М. А.*, *Буслова М. А.*, *Вильнер М. А.*, *Нгуен Т. Т.* Методика прогноза напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола на участке сопряжения с горизонтальной выработкой в соляных породах // Записки Горного института. – 2019. – Т. 240. – С. 628—637. https://doi.org/10.31897/pmi.2019.6.628.
5. *Соловьев В. А.*, Апт.уков В. Н., *Котляр Е. К.* Геомеханические и технологические аспекты совершенствования конструкции шахтных стволов в соляных породах // Горный журнал. – 2015. – № 11. – С. 24—28.
6. *Соловьев В. А.*, *Аптуков В. Н.*, *Ваулина И. Б.* Поддержание горных выработок в породах соленосной толщи: Теория и практика. — Новосибирск: Наука, 2017. — 264 с.
7. *Hollingsworth S. E.*, *Colbeck S. O.*, *Auld F. A.* Design of shaft linings to resist time dependent deformation in evaporite rocks. Mining Technology, 2013, vol. 122, pp. 221—227.
8. *Качурин Н. М.*, *Афанасьев И. А.*, *Пестрикова В. С.*, *Стась П. П.* Мониторинг устойчивости вертикальных стволов калийных рудников // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2020. – № 3. – С. 304—317.
9. Du *Judeel G. T.*, *Keyter G. J.*, *Harte N. D.* Shaft Sinking and Lining Design for a Deep Potash Shaft in Squeezing Ground. Harmonising Rock Engineering and the Environment — Proceedings of the 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics, 2012, pp. 1697—1704.
10. *Georgiannou V. N.*, *Serafis A.*, *Pavlopoulou E. M.* Analysis of a vertical segmental shaft using 2D & 3D finite element codes. International Journal of GEOMATE, 2017, vol. 13, pp. 138—146.
11. *Hasan O.*, *Erdogan G.* A methodology for lining design of circular mine shafts in different rock masses. International Journal of Mining Science and Technology, 2016, vol. 26(5), pp. 761—768.
12. *Fabich S.*, *Bauer J.*, *Rajczakowska M.*, *Switon S.* Design of the shaft lining and shaft stations for deep polymetallic ore deposits: Victoria mine case study. Mining Science, 2015 , vol. 22, pp. 127 – 146.
13. *Tiutkin O.*, *Miroshnyk V.*, *Radkevych A.*, *Alkhdour A.* Nonuniform stress state of a hoisting shaft lining as a result of disturbance of the ground freezing technology. E3S Web of Conferences, 2019, vol. 109, pp. 1—6.
14. *Yudan J.* Numerical Modelling of Shaft Lining Stability. Abstract of Ph.D. Dissertation. — Nottingham, 2010. — 311 p.
15. *Кириенко Ю. А.* Расчет крепи сопряжений стволов в породах, склонных к ползучести // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 8. — С. 142–153. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_142.
16. *Паньков И. Л.*, *Морозов И. А.* Деформирование соляных пород при объемном многоступенчатом нагружении // Записки Горного Института. – 2019. – Т. 239. – С. 510—519.
17. *Козловский Е. Я.*, *Журавков М. А.* Определение и верификация параметров расчетной модели соляных пород с учетом разупрочнения и ползучести // Записки Горного института. – 2021. – Т. 247. – С. 33—38.

18. *Морозов И. А.*, *Ударцев А. А.*, *Паньков И. Л.* Анализ деформирования соляных пород Гремячинского и Верхнекамского месторождений в лабораторных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 10. — С. 16–28. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10—0-16—28.

19. Van *Sambeek L. L.* Creep of rock salt under inhomogeneous stress conditions Abstract of Ph.D. Dissertation. Colorado, 1986. — 325 p.

20. *Dawson P. R.*, *Munson D. E.* Numerical simulation of creep deformations around a room in a deep potash mine. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1983, vol. 20, pp. 33—42.

21. *Labuz J. F.*, *Zang A.* Mohr – Coulomb failure criterion. The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring. 2012, vol. 45(6), pp. 227—231.

22. *Deshpande V. S.*, *Fleck N. A.* Isotropic Constitutive Model for Metallic Foams. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2000, vol. 48, pp. 1253—1276. ГИАБ

REFERENCES

1. Kazikaev D. M., Sergeev S. V. Diagnosis and Monitoring of Stress State of Vertical Shaft Supports, Moscow, Gornaya Kniga, 2011, 244 p. [In Russ].

23. Olkhovikov Y. P. Fastening capital workings of potash and salt, Moscow, Nedra, 1984, 238 p. [In Russ].

24. Bukichev N. S., Abramson H. I. Strengthening of vertical shafts of mines, Moscow, Nedra, 1978, 300 p. [In Russ].

4. Karasev M. A, Buslova M. A, Villner M. A, Nguyen T. T. Methodology for predicting the stress and strain state of vertical shaft support at the interface with horizontal workings in salt. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 240, pp. 628—637. [In Rus.]. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.628.

5. Solovyov V. A. Maintaining mine workings in the rocks of the saline strata: Theory and practice, Novosibirsk, Nauka, 2017, 264 p. [In Russ].

6. Solovyov V. A., Aptukov V. N., Kotlyar E. K. Geomechanical and technological aspects of improving the design of mine shafts in salt formations. *Mining Journal*. 2015, vol. 11, pp. 24—28. [In Russ.]. DOI: 10.17580/gzh.2015.11.05.

7. Hollingsworth S. E., Colbeck S. O., Auld F. A. Design of shaft linings to resist time dependent deformation in evaporite rocks. *Mining Technology*. 2013, vol. 122, pp. 221—227. DOI: 10.1179/1743286313Y.0000.

8. Kachurin N. M. Afanasyev Monitoring the stability of vertical shafts of potash mines. *Proceedings of TulSU. Earth Sciences*, 2020, vol. 3, pp. 304—317. [In Russ].

9. Du Judeel G. T., Keyter G. J., Harte N. D. Shaft Sinking and Lining Design for a Deep Potash Shaft in Squeezing Ground. *Harmonising Rock Engineering and the Environment Proceedings of the 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics*. 2012, pp. 1697—1704. DOI: 10.1201/b11646—322

10. Georgiannou V. N., Serafis A., Pavlopoulou E. M. Analysis of a vertical segmental shaft using 2D & 3D finite element codes. *International Journal of GEOMATE,* 2017, vol. 13, pp. 138—146. DOI: 10.21660/2017.36.88132.

11. Hasan O., Erdogan G. A methodology for lining design of circular mine shafts in different rock masses. *International Journal of Mining Science and Technology,* 2016, vol. 26, no. 5, pp. 761 – 768. DOI: 10.1016/j.ijmst.2016.05.049.

12. Fabich S., Bauer J., Rajczakowska M., Switon S. Design of the shaft lining and shaft stations for deep polymetallic ore deposits: Victoria mine case study. *Mining Science*, 2015, vol. 22, pp. 127—146. DOI: 10.5277/msc152213.

13. Tiutkin O., Miroshnyk V., Radkevych A., Alkhdour A. Nonuniform stress state of a hoisting shaft lining as a result of disturbance of the ground freezing technology. *E3S Web of Conferences*. 2019, vol. 109, pp. 1—6.

14. Yudan J. Numerical Modelling of Shaft Lining Stability. Abstract of Ph.D. Dissertation, Nottingham, 2010, 311 p.

15. Kirienko Y. A. Support system design for shaft junctions in creeping rocks. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2021;(8):142—153. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_142.

16. Pankov I. L., Morozov I. A. Deformation of salt rocks under volumetric multistage loading. *Journal of the Mining Institute*, 2019, vol. 239, pp. 510—519. DOI: 10.31897/pmi.2019.5.510.

17. Kozlovsky E. Y., Zhuravkov M. A. Determination and verification of parameters of the computational model of salt rocks taking into account softening and creep. *Journal of the Mining Institute*, 2021, vol. 247, pp. 33—38. DOI:10.31897/PMI.2021.1.4.

18. Morozov I. A., Udarcev A. A., Pankov I. L. Laboratory deformation testing of salt rocks from the Gremyachinsk and Upper Kama deposits. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull., 2020, vol. 10, pp. 16—28. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10—0-16—28.

19. Van Sambeek L. L. Creep of rock salt under inhomogeneous stress conditions, Abstract of Ph.D. Dissertation, Colorado, 1986, 325 p.

20. Dawson P. R., Munson D. E. Numerical simulation of creep deformations around a room in a deep potash mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts,* 1983, vol. 20, pp. 33—42. [In Russ]. DOI: 10.1016/0148—9062(83)91612—1.

21. Labuz J. F.,Zang A. Mohr-Coulomb failure criterion. *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring*, 2012, vol. 45, no. 6, pp. 227—231. DOI 10.1007/s00603-012-0281-7

22. Deshpande V. S., Fleck N. A. Isotropic Constitutive Model for Metallic. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids.* 2000, vol. 48, pp. 1253—1276. DOI: 10.1016/S0022—5096(99)00082—4.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Катеров Андрей Максимович — аспирант, https://orcid.org/0000-0002-8566-4724, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, линия 21-ая В. О., дом 2, e-mail: andrey.katerov292@gmail.com;
Протосеня Анатолий Григорьевич — докт. техн. наук, профессор, https://orcid.org/0000-0001-7829-6743, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, линия 21-ая В. О., дом 2, e-mail: Protosenya_AG@pers.spmi.ru.
Для контактов: *Катеров Андрей Максимович*, e-mail: andrey.katerov292@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Katerov A. M., postgraduate student, https://orcid.org/0000-0002-8566-4724, St. Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, line 21 V. O., 2, e-mail: andrey.katerov292@gmail.com;
Protosenja A. G., Dr. Sci. (Eng.), Professor, https://orcid.org/0000-0001-7829-6743, St. Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, 21-ya V. O., 2, e-mail: Protosenya_AG@pers.spmi.ru.
For contact: *Katerov Andrej Maksimovich*, e-mail: andrey.katerov292@gmail.com.

Получена редакцией 14.01.2022; получена после рецензии 30.05.2022; принята к печати 10.05.2022.
Received by the editors 14.01.2022; received after the review 30.05.2022; accepted for printing 10.05.2022.