

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОЛЯНОГО МАССИВА

А.Г. Протосеня¹, А.М. Катеров¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: andrey.katerov292@gmail.com

Аннотация: Развитие горной промышленности и отработка месторождений приводит к освоению новых «глубоких» месторождений. Месторождения калийных солей на территории РФ располагаются в Пермском крае, Калининградской и Волгоградской областях и представлены Верхнекамским, Нивинским и Гремячинским месторождениями. Основной сложностью освоения калийных месторождений является склонность соляных пород к большим деформациям, происходящим в течение всего срока эксплуатации месторождения. В связи с этим возникает необходимость в достоверном прогнозе смещений породного контура горных выработок, чей срок эксплуатации совпадает со сроком жизненного цикла самого предприятия и составляет порядка 50 лет и более. Сложность прогноза заключается в отсутствии данных натурных наблюдений за смещением породного контура горных выработок, пройденных в соляных породах. В связи с этим возникает необходимость прогноза смещений контура горных выработок в течение всего периода эксплуатации горного предприятия. Достоверность прогноза напрямую зависит от постановки задачи и моделей сред, описывающих механическое поведение исследуемого горного массива. В рамках исследования предлагается методика определения корректных реологических параметров моделей деформирования соляных пород, обеспечивающих качественные и количественные величины смещений породного контура. Исследования проводилось для феноменологической модели, реализуемой в программном комплексе Abaqus CAE, основанной на степенном законе Double Power Law.

Ключевые слова: соляной массив, реология, ползучесть, метод конечных элементов, численное моделирование, крепь, прогноз нагрузки на крепь, прогноз напряженно-деформированного состояния крепи, степенная модель, Abaqus CAE.

Для цитирования: Протосеня А. Г., Катеров А. М. Обоснование параметров реологической модели соляного массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 3. – С. 16–28. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_16.

Substantiation of rheological model parameters for salt rock mass

A.G. Protosenya¹, A.M. Katerov¹

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: andrey.katerov292@gmail.com

Abstract: Advancement of the mining industry and the expansion of mining necessarily leads to the involvement of new deep-seated deposits into operation. Russia holds potash deposits of Upper Kama, Nivenskoe and Gremyachensky in the Perm Krai and in the Kaliningrad and Volgograd areas, respectively. The major difficulty associated with potash mining is the suscep-

tibility of salt rocks to large deformations within the whole life of a deposit. This calls for the reliable prediction of displacements of boundaries in underground excavations having the same life cycle as the mine does, i.e. 50 years and longer. The complicating factor in this respect is the lack of the field observations over boundary displacements in tunnels driven in salt rocks. For this reason, it is necessary to predict the boundary displacements in underground excavations over the whole period of operation of a mine. The prediction reliability directly depends on the problem formulation and on the models of the mechanical behavior of test rock mass. This article proposes a procedure to determine correct rheological parameters for the salt rock deformation models to obtain the qualitative and quantitative values of perimeter displacements. The studies used a phenomenological model implemented in Abaqus CAE environment and the Double Power Law.

Key words: salt rock mass, rheology, creep, finite element method, numerical model, support system, support load prediction, support stress–strain prediction, power law model.

For citation: Protosenya A. G., Katerov A. M. Substantiation of rheological model parameters for salt rock mass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(3):16-28. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_16.

Введение

Проектирование горных выработок при разработке калийных месторождений — сложная и комплексная задача. Основной проблемой является реологическая составляющая при оценке устойчивости горных выработок на завершающем этапе эксплуатации месторождения (когда срок эксплуатации около 50 лет) [1–3]. Решением задач, связанных с прогнозом смещений контуров горных выработок, которые могут достигать 1 м [4, 5], а также развитием напряженно-деформированного состояния крепи, вызванного смещениями массива горных пород, занималось множество ученых. Основным инструментом для решения задач прогноза смещения является геомеханическое описание механизмов деформирования соляных пород. Для задач, связанных с прогнозом деформаций контура горных выработок, расположенных в соляном массиве или массиве, склонном к большим деформациям, применяют метод конечных элементов, реализованный в различных программных комплексах. Так как соляные породы склонны

к проявлению реологических процессов, основной математической задачей является описание механического поведения материала во времени, а именно стадий ползучести [6, 7]. Основной целью исследования является обоснование параметров модели для длительного прогноза смещений породного контура, требующей качественной и количественной оценки. Так как срок эксплуатации является длительным, а основное развитие деформаций находится в рамках установившейся ползучести, то большинство геомеханических моделей основано на описании установившейся стадии ползучести. Ниже будут представлены наиболее известные модели деформирования соляных пород, созданные для расчета подземных сооружений в соляных породах. В качестве одной из основных моделей стоит выделить модель BGR, разработанную группой авторов [8, 9] и описывающую установившуюся стадию ползучести. Данная модель была создана для описания механического поведения образцов каменной соли, отобранных на руднике Ассе (Германия) и применялась [10] для

решения задач длительной устойчивости подземных хранилищ. Однако данная модель при низких напряжениях приводит к большим ошибкам при решении задач, связанным с длительным анализом. Более усовершенствованная модель LUBBY2 [11, 13] описывает начальную и установившуюся стадии ползучести. Эта модель создавалась для проектирования подземных хранилищ радиоактивных отходов, расположенных в соляном массиве и широко применяется в настоящее время [14] при проектировании подземных сооружений. Как и модель BGR, данная модель не учитывает дилатансию и неспособна описать третью стадии ползучести. Для решения задач, связанных с хранением радиоактивных отходов, в США был создан проект WIPP (Waste Isolation Pilot Plant), в рамках которого была создана модель MD [15 – 17], которая хорошо себя зарекомендовала и была применена в множестве работ [18 – 21]. Среди моделей деформирования соляных пород, созданных в России, нашла применение модель, разработанная С.А. Константиновой [22, 23], которая описывает не только деформирование, но и разрушение соляных пород. Модель основана на нелинейной теории наследственной ползучести. Свое применение данная модель нашла при проектировании Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) и хорошо себя зарекомендовала для описания процессов деформирования горных пород вокруг камер. Большинство программных комплексов имеют в своем инструментарии реологические модели, описывающие ползучесть. Однако все вышеперечисленные модели не являются базовыми и не реализованы для некоммерческого использования.

Так как большинство из представленных реологических моделей, описывающих установившуюся стадию ползучести, основаны на классическом степен-

ном законе Бейли-Нортонa [24], то для описания длительных деформаций могут подойти модели, применяемые для описания ползучести металлов. В работах [25, 26] рассматривалась модель ползучести Друкера-Прагера. В программном комплексе Abaqus CAE представлены две модели — Power Law и Double Power Law [27 – 30]. Наибольший интерес вызывает модель Double Power Law, так как позволяет подобрать более точное описание установившейся нелинейной ползучести. Необходимо изучить возможность применения данных моделей для решения задач, связанных с прогнозом длительных деформаций соляного массива. Проводимое исследование направлено на изучение возможности применения модели Double Power Law, а также разработку методики определения корректных реологических констант, дающих относительно точный прогноз смещений соляного массива, на основе которого можно прогнозировать устойчивость горных выработок и работу крепи подземных сооружений.

Методика определения параметров модели длительного деформированного соляного массива.

Математическое описание моделей деформирования

Модель реализована в программном комплексе Abaqus CAE и описывает установившуюся стадию нелинейной ползучести для металлов. Однако математически формула схожа по своей структуре с формулой, созданной для расчета длительных деформаций ползучести в соляном массиве, а именно с моделью BGRb.

Модель Double Power Law позволяет прогнозировать развитие деформаций соляного массива, характерных для второй стадии ползучести (стадия установившейся ползучести), при этом учиты-

вается влияние интенсивности касательных напряжений на скорость развития деформаций ползучести. Дополнительно модель позволяет учесть влияние величины температуры на интенсивность развития деформаций ползучести.

Зависимость между приращением деформаций ползучести и состоянием породного массива для модели Double Power Low представлена в формуле:

$$\dot{\varepsilon}^{cr} = A_1 \exp\left(-\frac{B_1}{\theta - \theta_z}\right) \cdot \left(\frac{q}{\sigma_0}\right)^{C_1} + A_2 \exp\left(-\frac{B_2}{\theta - \theta_z}\right) \cdot \left(\frac{q}{\sigma_0}\right)^{C_2},$$

где $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2$ – реологические параметры модели; θ – температура породы; θ_z – температура абсолютно нуля; σ_0 – регулирующий параметр, равный 1 МПа; q – интенсивность касательных напряжений.

Определение влияния граничных условий модели на результаты прогноза смещений

Согласно [29], рассматриваемая модель обладает возможностью подбора реологических параметров из результатов лабораторных испытаний, однако они требуют калибровки и верификации с результатами натуральных данных. Основным недостатком модели, реализованной в программном комплексе Abaqus CAE, является зависимость конечных результатов прогноза от геометрических размеров численной модели, что при неправильно определенных размерах численной модели приводит к завышенным результатам прогноза смещений контура горной выработки. В связи с этим возникает необходимость определить зону вокруг горной выработки, когда границы численной модели не оказывают влияния на точность прогноза смещений массива. Для решения данной задачи рас-

сматривалась горная выработка на месторождении Саскачеван, пройденная в однородном соляном массиве, расположенном на глубине порядка 950 м [16]. Рассматриваемая горная выработка, расположенная в калийно-рудной зоне, пройдена комбайном, чем и обусловлена ее ширина в 6,02 м и высота 2,33 м. С точки зрения горно-геологических условий, выработка изолирована от других горных работ и находится между двумя мощными слоями галита. Для измерения конвергенции стенок исследуемой горной выработки применялись глубинные реперы, выполненные из анкерных штаг, забуренных в бока выработки на глубину 6,1; 4,57; 3,05; 1,52 м и на контуре выработки. Для изучения влияния удаления границ от горной выработки при использовании выбранной реологической модели среды и верификации ее реологических параметров была построена численная модель в плоской постановке (рис. 1).

В практике строительства подземных сооружений принято считать, что зона влияния горной выработки равна 5 эквивалентным радиусам. На рис. 1 (в центре) изображен незакрепленный контур горной выработки. Минимальный размер численной модели составил 5 эквивалентных радиусов, он равен 15 м. Размеры модели увеличивались с шагом 3 эквивалентных радиуса, по 9 м соответственно. Деформации фиксировались в двух точках: на контуре выработки и в массиве на удалении 3,05 м соответственно. Поле естественного напряжения массива задавалось как гидростатическое и рассчитывалось исходя из градиента горного давления 0,0226 МПа/м [16]. Задача является осесимметричной, поэтому линия по диаметру была ограничена от горизонтальных смещений, а горизонтальный радиус был ограничен в перемещениях по вертикали. Также к границам модели прикладывалась внеш-

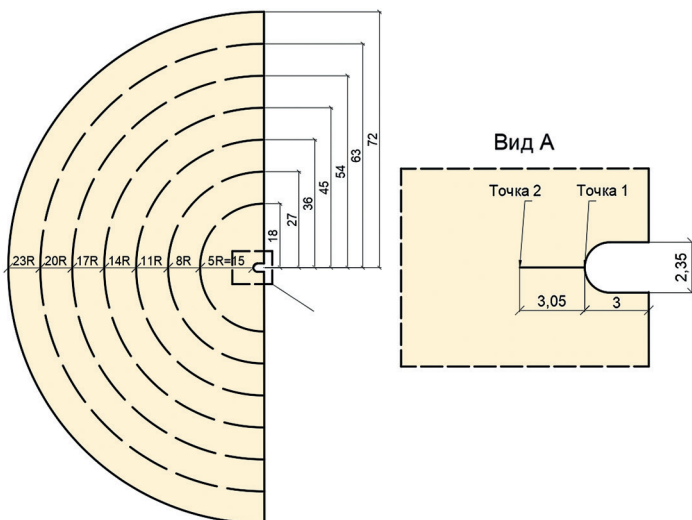


Рис. 1. Постановка задачи
Fig. 1. Problem formulation

няя равномерно распределенная нагрузка, равная величине горного давления, что необходимо для сохранения внутренней энергии, которая расходуется на реализацию смещений контура исследуемой горной выработки. Сетка конечных элементов была сгенерирована с использованием четырехугольных восьмиузловых элементов второго порядка СРЕ8. Размер конечного элемента варьируется от 0,25 м до 5 м по мере удаления от горной выработки к границе модели. Модуль деформации соляного массива был равен 20 ГПа [29, 31], а коэффициент Пуассона 0,32.

После определения влияния размеров численной модели на прогноз смещений массива выполняется подбор реологических параметров математических моделей, описывающих поведение соляных пород (каменной соли). В рамках подбора решалась обратная задача, для верификации и подбора параметров рассматривались натурные данные, полученные при наблюдении конвергенции стенок в камере, расположенной на глубине 950 м [16]. Параметры определяются методом подбора, исходя из величины смещений

в реперах, расположенных в глубине массива на расстоянии 3,05 м от контура выработки и на самом контуре непосредственно.

Результаты и обсуждение

Результаты представлены на рис. 2. Из анализа результатов можно сделать вывод, что характер влияния удаления границ численной модели от горной выработки для каждой исследуемой точки схож. Однако для точки 1 по мере увеличения размера численной модели можно заметить, что скорость развития деформаций в начальный период времени уменьшается, в то время как для точки б увеличение размера численной модели приводит на начальной стадии к увеличению скорости деформирования, но в дальнейшем наблюдается затухание интенсивности развития смещений.

Основное влияние границы численной модели оказывают на прогноз смещений в точке 1, что является наиболее важным, так как деформации, реализуемые на контуре незакрепленной горной выработки в случае расчета крепи подземного сооружения, будут завышать

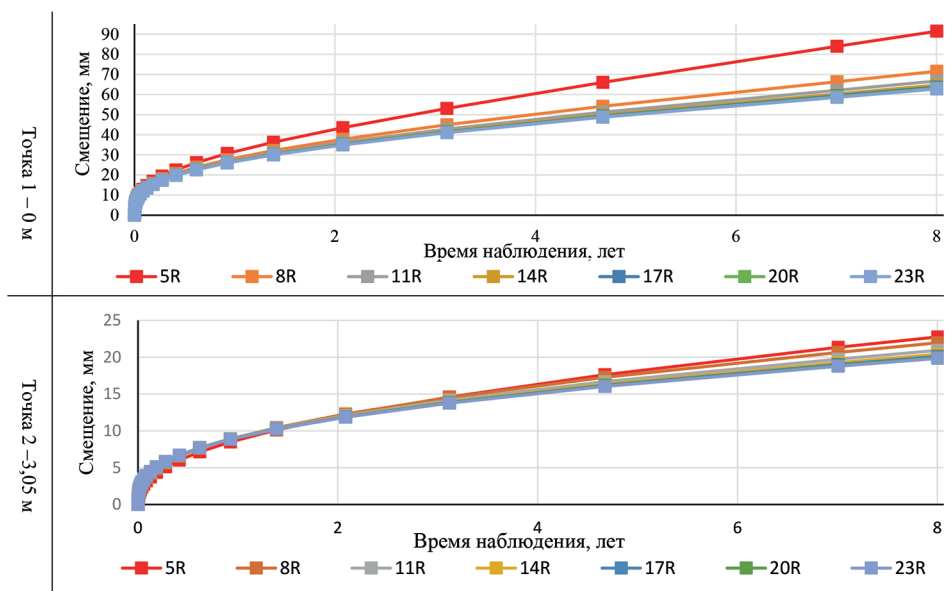


Рис. 2. Влияние граничных условий на прогноз смещений для модели Double Power Law
 Fig. 2. Effect of boundary conditions on displacement prediction for Double Power Law model

значения нагрузок, возникающих в конструкции крепи. На первом этапе необходимо оценить влияние размера численной модели на результаты прогноза; из полученных результатов видно, что влияние для численных моделей с 20 и 23 эквивалентными радиусами отличается незначительно, в процентном соотношении в среднем на 0,17% для Double Power Law, а разница в прогнозе для полных смещений составляет 0,6%,

что говорит о том, что увеличение размера модели не приведет к изменению прогноза смещений на контуре горных выработок. Исходя из этого, можно сделать один из основных выводов — что минимальный размер численной модели должен составлять не менее 20 эквивалентных радиусов при описании соляного массива.

После определения минимального размера численной модели необходимо

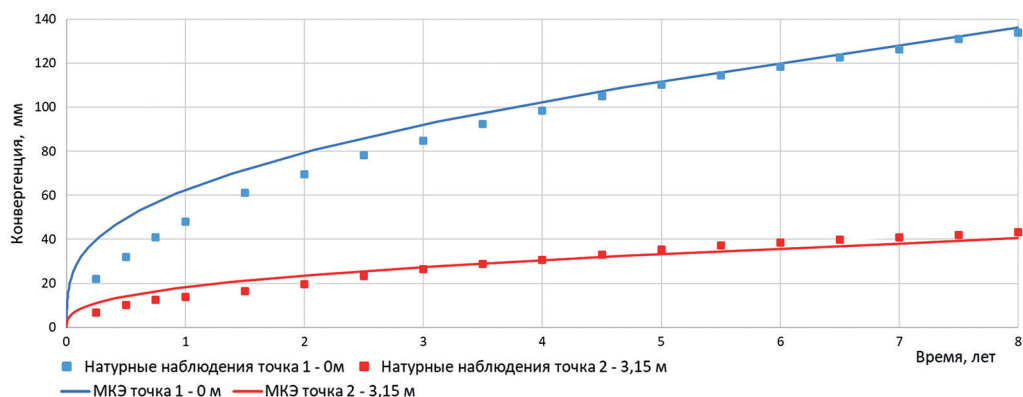


Рис. 3. Верификация параметров модели Double Power Law
 Fig. 3. Verification of parameters of Double Power Law model

Таблица 1

Реологические постоянные для модели Double Power Law
Rheological constants for the Double Power Law model

| A_1 | A_2 | B_1 | B_2 | C_1 | C_2 | σ_1 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|
| 0,04 | 0,019 | 5950 | 7590 | 2,4 | 6,8 | 1 |

подобрать реологические константы геомеханической модели. Для решения данной задачи был выполнен подбор параметров на основе натуральных наблюдений за смещениями незакрепленной горной выработки, пройденной в соляном массиве [16]. Для решения задачи использовалась та же численная модель с 20 эквивалентными радиусами (см. рис. 1). Графики верификации реологических параметров модели деформирования Double Power Law показаны на рис. 3.

Полученные реологические константы для модели Double Power Law представлены в табл. 1. При сравнении результатов прогноза конвергенции стенок горной выработки с данными натуральных наблюдений можно сделать вывод, что точность прогнозируемых смещений на контуре горной выработки превышает данные натуральных наблюдений на 1,7%, для точки 2 различие составляет 6,2%.

Для верификации параметров реологической модели была построена модель для прогноза нагрузок на крепь и развития напряженно-деформированного со-

стояния крепи. Рассматривался участок вертикального ствола № 9 на Закарпатском солеруднике [1, 29, 32], данные получали с замерных станций, расположенных в крепи ствола. Период наблюдения составлял 90 дней. Величина нагрузок на крепь составила 4,5–4,7 МПа, тангенциальные напряжения в бетонном слое крепи составили 23 МПа, в тьюбинговой крепи – 74,2 МПа. Стоит отметить, что горно-геологические условия горной выработки, на основе натуральных данных которой подбирались реологические параметры, схожи с горно-геологическими условиями рассматриваемого сечения вертикального ствола на Закарпатском руднике, а именно каменная соль, в связи с этим подобранные параметры реологической модели не изменялись.

Геометрические характеристики крепи ствола и глубина заложения рассматриваемого сечения приведены в табл. 2.

Размер численной модели равен 20 эквивалентным радиусам ствола и составил 77,7 м. Характер приложения граничных условий и внешней нагрузки иден-

Таблица 2

Краткая характеристика рассматриваемого участка ствола
Brief characteristic of the shaft section in question

| Горно-геологические условия | Каменная соль |
|---|---------------|
| Глубина заложения, м | 492 |
| Величина горизонтальных напряжений, МПа | 11,12 |
| Диаметр в проходке, м | 7,4 |
| Диаметр в свету, м | 6 |
| Толщина бетонной крепи, мм | 430 |
| Толщина спинки чугунного тьюбинга, мм | 60 |
| Толщина ребра чугунного тьюбинга | 210 |
| Коэффициент армирования ребра тьюбинга | 0,1825 |

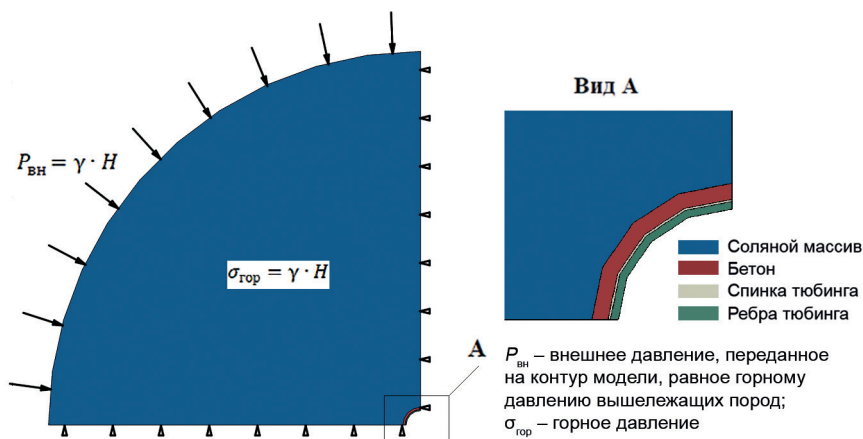


Рис. 4. Расчетная схема численной модели участка ствола № 9 Закарпатского солерудника
 Fig. 4. Schematic of numerical model of the shaft No. 9 of Zakarpatsky salt mine

тичен с рассмотренной выше задачей по исследованию модели.

Расчетная схема рассматриваемой задачи показана на рис. 4.

Крепь ствола рассматривалась в рамках теории упругости, деформационные

характеристики материалов крепи представлены в табл. 3.

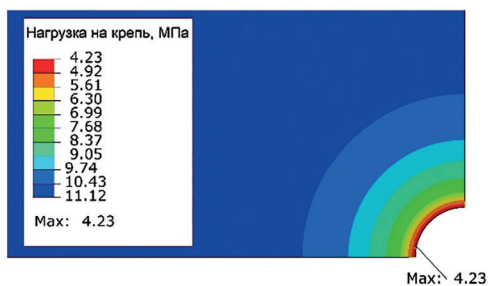
В результате расчета были получены следующие значения: величина нагрузки на крепь составила 4,23 МПа, что находится в диапазоне снятых значений

Таблица 3

Деформационные характеристики материала крепи ствола
Deformation characteristics of shaft lining material

| Материал крепи | Модуль упругости материала, МПа | | Кoeffициент Пуассона |
|----------------|---------------------------------|---------|----------------------|
| Бетон | 30 000 | | 0,2 |
| Чугун СЧ25 | спинка тьюбинга | 100 000 | 0,3 |
| | внутренние ребра тьюбинга | 18 250 | |

а)



б)

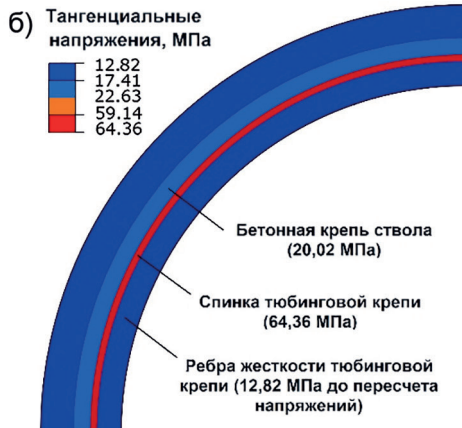


Рис. 5. Прогноз горного давления (нагрузки на крепь) (а); развитие напряжений внутри крепи ствола (б)
 Fig. 5. Prediction of stress (shaft support loads) (а); development of stresses inside shaft support (б)

с замерной станции. Эпюра развития нагрузки на крепь представлена на рис. 5, а. Результаты прогноза тангенциальных напряжений в крепи вертикального ствола (рис. 5, б) составили 20,02 МПа для бетонного слоя и 12,82 МПа в тубинговой крепи до пересчета напряжений. После пересчета напряжений в ребрах жесткости тубинга по методике Булычева получаем величину 70,25 МПа.

Различие полученных результатов прогноза нагрузки на крепь ствола с результатами натуральных данных составило 6%. Для тангенциальных напряжений, реализуемых в различных слоях крепи, различие составило 13% и 5,3% для бетонного слоя крепи и для чугунной крепи соответственно.

Выводы

В рамках исследования были определены минимальные размеры численной модели, не влияющие на качественные результаты прогноза смещения контура горной выработки для модели Double Power Law. Величина минимального размера численной модели составила 20 эквивалентных радиусов исследуемой горной выработки. Дальнейшее увеличение приводит к незначительным различиям в прогнозе порядка 1% по отношению друг к другу.

На основе полученной минимальной величины численной модели были подобраны реологические параметры модели Double Power Law. Результаты прогноза конвергенции стенок горной выработки показали хорошую сходимость с натурными данными. Модель Double Power Law за счет большего количества переменных позволяет более точно описать кривую деформирования соляного массива на стадии установившейся ползучести. Также стоит отметить, что при решении задач, связанных с прогнозом смещений контура горной выработки, модель с достаточной точностью описывает начальную стадию ползучести с геометрической точки зрения.

Полученные параметры модели Double Power Law применялись при прогнозе нагрузок на крепь, а также тангенциальных напряжений в крепи ствола № 9 Закарпатского солерудника, на глубине 492 м. Согласно полученным результатам прогноза и принятым допущениям, связанным с усреднением физико-механических свойств каменной соли и ее реологических параметров, применяемая модель деформирования соляного массива позволяет с необходимой точностью описывать процессы развития смещения контура горной выработки, а также нагрузки на крепь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казикаев Д. М., Сергеев С. В. Диагностика и мониторинг напряженного состояния крепи вертикальных стволов. — М.: Изд-во «Горная книга», 2011. — 244 с.
2. Кириенко Ю. А. Обоснование конструкции крепи сопряжения шахтного ствола, пройденного в солях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6. — С. 20—34. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_20.
3. 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.
4. Аптуков В. Н., Ваулина И. Б. Поддержание горных выработок в породах соленосной толщи: Теория и практика. — Новосибирск: Наука, 2017. — 264 с.
5. 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.

6. Паньков И. Л., Морозов И. А. Деформирование соляных пород при объемном многоступенчатом нагружении // Записки Горного института. — 2019. — Т. 239. — С. 510 — 519. DOI: 10.31897/pmi.2019.5.510.

7. Козловский Е. Я., Журавков М. А. Определение и верификация параметров расчетной модели соляных пород с учетом разупрочнения и ползучести // Записки Горного института. — 2021. — Т. 247. — С. 33 — 38. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.4.

8. Zhou H. W., Wang C. P., Mishnaevsky L., Duan Z. Q., Ding J. Y. A fractional derivative approach to full creep regions in salt rock // Mechanics of Time-Dependent Materials. 2013, vol. 17, pp. 413 — 425. DOI: 10.1007/s11043-012-9193-x.

9. Lin-jian Ma, Xin-yu Liu, Qin Fang, Hong-fa Xu, Hui-min Xia, Er-bing Li, Shi-gang Yang, Wen-pei Li A new elasto-viscoplastic damage model combined with the generalized hoek — Brown failure criterion for bedded rock salt and its application // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2013, vol. 46, pp. 53 — 66. DOI: 10.1007/s00603-012-0256-8.

10. Wu F., Chen J., Zou Q. A nonlinear creep damage model for salt rock // International Journal of Damage Mechanics. 2019, vol. 28, no. 5, pp. 758 — 771. DOI: 10.1177/1056789518792649.

11. Heusermann S., Rolfs O., Schmidt U. Nonlinear finite-element analysis of solution mined storage caverns in rock salt using the LUBBY2 constitutive model // Computers & Structures. 2003, vol. 81, no. 8-11, pp. 629 — 638. DOI: 10.1016/S0045-7949(02)00415-7.

12. Shao J. F., Zhu Q. Z., Su K. Modeling of creep in rock materials in terms of material degradation // Computers and Geotechnics. 2003, vol. 30, no. 7, pp. 549 — 555. DOI: 10.1016/S0266-352X(03)00063-6.

13. Böttcher N., Görke U. J., Kolditz O., Nagel T. Thermo-mechanical investigation of salt caverns for short-term hydrogen storage // Environmental Earth Sciences. 2017, vol. 76, no. 98. DOI: 10.1007/s12665-017-6414-2.

14. Weatherby J. R., Munson D. E., Argüello J. G. Three-dimensional finite element simulation of creep deformation in rock salt // Engineering Computations. 1996, vol. 13, no. 8, pp. 82 — 105.

15. Munson D. E. Constitutive model of creep in rock salt applied to underground room closure // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1997, vol. 34, no. 2, pp. 233 — 247.

16. 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. 1983, vol. 20, no. 1, pp. 33 — 42.

17. Reedlunn B., Guadalupe Argüello J., Hansen F. D. A reinvestigation into Munson's model for room closure in bedded rock salt // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2022, vol. 151, article 105007. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.105007.

18. Chan K. S., Bodner S. R., Munson D. E. Recovery and healing of damage in WIPP salt // International Journal of Damage Mechanics. 1998, vol. 7, no. 2, pp. 143 — 166.

19. Munson D. E., Fossum A. F., Senseny P. E. Approach to first principles model prediction of measured WIPP (Waste isolation pilot plant) in-situ room closure in salt // Tunnelling and Underground Space Technology. 1990, vol. 5, no. 1-2, pp. 135 — 139.

20. Munson D. E., Weatherby J. R., Devries K. L. Two- and three-dimensional calculations of scaled in situ tests using the M-D model of salt creep // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics. 1993, vol. 30, no. 7, pp. 1345 — 1350.

21. Константинова С. А., Аптуков В. Н. Некоторые задачи механики деформирования и разрушения соляных пород. — Новосибирск: Наука, 2013. — 191 с.

22. Кашников Ю. А., Ермашов А. О., Ефимов А. А. Геолого-геомеханическая модель участка Верхнекамского калийного месторождения // Записки Горного института. — 2019. — Т. 237. — С. 259 — 267. DOI: 10.31897/pmi.2019.3.259.

23. Барях А. А., Самоделкина Н. А. Геомеханическая оценка интенсивности деформационных процессов над затопленным калийным рудником // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2017. — № 4. — С. 33–46.
24. Морозов И. А., Паньков И. Л., Токсаров В. Н. Изучение устойчивости горных выработок в соляных породах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 9. — С. 36–47. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_36.
25. Беляков Н. А., Беликов А. А. Прогноз целостности водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении калийных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6-2. — С. 33–46. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_33.
26. Cirone A., Vargas E. A thermodynamic modeling of creep in rock salt // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2023, vol. 162. DOI: 10.1016/j.ijmms.2022.105298.
27. Van Sambeek L. L., Ratigan J. L., Hansen F. D. Dilatancy of rock salt in laboratory tests // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1993, vol. 30, no. 7, pp. 735–738.
28. Van Sambeek L. L. Creep of rock salt under inhomogeneous stress conditions. Abstract of Ph.D. Dissertation. Colorado, 1986, 325 p.
29. 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. DOI: 10.31897/pmi.2019.6.628.
30. Gunther R., Salzer K., Popp T., Ludeling C. Steady-state creep of rock salt: Improved approaches for lab determination and modeling // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2015, vol. 48, pp. 2603–2613. DOI: 10.1007/s00603-015-0839-2.
31. 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-geološko-naftni zbornik. 2022, vol. 37, no. 1, pp. 151–162. DOI: 10.17794/rgn.2022.1.13.
32. Тащи В. М. Гидрогеологические условия Солотвинского месторождения каменной соли и некоторые рекомендации по вопросу дальнейшей его эксплуатации // Труды ВНИИСоль. — 1970. — № 10(18). — С. 21–34. **MIAB**

REFERENCES

- Kazikaev D. M., Sergeev S. V. *Diagnostika i monitoring napryazhennogo sostoyaniya krepki vertikal'nykh stvolov* [Diagnosis and monitoring of stress state of vertical shaft supports], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2011, 244 p.
- Kirienko Yu. A. Justification of support design for tunnel and shaft intersections in salt. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6, pp. 20–34. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_20.
- Kirienko Yu. A. Support system design for shaft junctions in creeping rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 8, pp. 142–153. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_142.
- Aptukov V. N., Vaulina I. B. *Podderzhanie gornyykh vyrabotok v porodakh solenosnoy tolshchi: Teoriya i praktika* [Maintaining rock outcrops in saltmarsh rocks: Theory and practice], Novosibirsk, Nauka, 2017, 264 p.
- Kachurin N. M., Afanasiev I. A., Pestrikova V. S., Stas P. P. Monitoring of stability of vertical shafts of potash mines. *News of the Tula state university. Sciences of Earth.* 2020, no. 3, pp. 304–317. [In Russ].
- Pankov I. L., Morozov I. A. Salt rock deformation under bulk multiple-stage loading. *Journal of Mining Institute.* 2019, vol. 239, pp. 510–519. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2019.5.510.

7. Kozlovskiy E. Ya., Zhuravkov M. A. Determination and verification of the calculated model parameters of salt rocks taking into account softening and plastic flow. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 247, pp. 33 – 38. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.4.
8. Zhou H. W., Wang C. P., Mishnaevsky L., Duan Z. Q., Ding J. Y. A fractional derivative approach to full creep regions in salt rock. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2013, vol. 17, pp. 413 – 425. DOI: 10.1007/s11043-012-9193-x.
9. Lin-jian Ma, Xin-yu Liu, Qin Fang, Hong-fa Xu, Hui-min Xia, Er-bing Li, Shi-gang Yang, Wen-pei Li A new elasto-viscoplastic damage model combined with the generalized hoek – Brown failure criterion for bedded rock salt and its application. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2013, vol. 46, pp. 53 – 66. DOI: 10.1007/s00603-012-0256-8.
10. Wu F., Chen J., Zou Q. A nonlinear creep damage model for salt rock. *International Journal of Damage Mechanics*. 2019, vol. 28, no. 5, pp. 758 – 771. DOI: 10.1177/1056789518792649.
11. Heusermann S., Rolfs O., Schmidt U. Nonlinear finite-element analysis of solution mined storage caverns in rock salt using the LUBBY2 constitutive model. *Computers & Structures*. 2003, vol. 81, no. 8-11, pp. 629 – 638. DOI: 10.1016/S0045-7949(02)00415-7.
12. Shao J. F., Zhu Q. Z., Su K. Modeling of creep in rock materials in terms of material degradation. *Computers and Geotechnics*. 2003, vol. 30, no. 7, pp. 549 – 555. DOI: 10.1016/S0266-352X(03)00063-6.
13. Böttcher N., Görke U. J., Kolditz O., Nagel T. Thermo-mechanical investigation of salt caverns for short-term hydrogen storage. *Environmental Earth Sciences*. 2017, vol. 76, no. 98. DOI: 10.1007/s12665-017-6414-2.
14. Weatherby J. R., Munson D. E., Argüello J. G. Three-dimensional finite element simulation of creep deformation in rock salt. *Engineering Computations*. 1996, vol. 13, no. 8, pp. 82 – 105.
15. Munson D. E. Constitutive model of creep in rock salt applied to underground room closure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1997, vol. 34, no. 2, pp. 233 – 247.
16. 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*. 1983, vol. 20, no. 1, pp. 33 – 42.
17. Reedlunn B., Guadalupe Argüello J., Hansen F. D. A reinvestigation into Munson's model for room closure in bedded rock salt. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2022, vol. 151, article 105007. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.105007.
18. Chan K. S., Bodner S. R., Munson D. E. Recovery and healing of damage in WIPP salt. *International Journal of Damage Mechanics*. 1998, vol. 7, no. 2, pp. 143 – 166.
19. Munson D. E., Fossum A. F., Senseny P. E. Approach to first principles model prediction of measured WIPP (Waste isolation pilot plant) in-situ room closure in salt. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 1990, vol. 5, no. 1-2, pp. 135 – 139.
20. Munson D. E., Weatherby J. R., Devries K. L. Two- and three-dimensional calculations of scaled in situ tests using the M-D model of salt creep. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*. 1993, vol. 30, no. 7, pp. 1345 – 1350.
21. Konstantinova S. A., Aptukov V. N. *Nekotorye zadachi mekhaniki deformirovaniya i razrusheniya solyanykh porod* [Some problems of deformation and fracture mechanics of salt rocks], Novosibirsk, Nauka, 2013, 191 p.
22. Kashnikov Yu. A., Ermashov A. O., Efimov A. A. Geological and geomechanical model of the Verkhnekamsk potash deposit site. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 237, pp. 259 – 267. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2019.3.259.
23. Baryakh A. A., Samodelkina N. A. Geomechanical evaluation of intensity of deformation processes over flooded potash mine. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2017, no. 4, pp. 33 – 46. [In Russ].

24. Morozov I. A., Pankov I. L., Toksarov V. N. Stability of underground openings in salt rock masses. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 9, pp. 36–47. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_36.

25. Belyakov N. A., Belikov A. A. Prediction of the integrity of the water-protective stratum at the Verkhnekamskoye potash ore deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 33–46. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_33.

26. Cirone A., Vargas E. A thermodynamic modeling of creep in rock salt. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2023, vol. 162. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2022.105298.

27. Van Sambeek L. L., Ratigan J. L., Hansen F. D. Dilatancy of rock salt in laboratory tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1993, vol. 30, no. 7, pp. 735–738.

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

29. 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 Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2019.6.628.

30. Gunther R., Salzer K., Popp T., Ludeling C. Steady-state creep of rock salt: Improved approaches for lab determination and modeling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2015, vol. 48, pp. 2603–2613. DOI: 10.1007/s00603-015-0839-2.

31. 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-geološko-naftni zbornik*. 2022, vol. 37, no. 1, pp. 151–162. DOI: 10.17794/rgn.2022.1.13.

32. Tashchi V. M. Hydrogeological conditions of Solotva rock salt deposit and some recommendations on the issue of its further exploitation. *Trudy VNIISol'*. 1970, no. 10(18), pp. 21–34. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Протосеня Анатолий Григорьевич¹ — д-р техн. наук, профессор, e-mail: Protosenya_AG@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0001-7829-6743,

Катеров Андрей Максимович¹ — аспирант, e-mail: andrey.katerov292@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8566-4724,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: Катеров А.М., e-mail: andrey.katerov292@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.G. Protosenya¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: Protosenya_AG@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0001-7829-6743,

A.M. Katerov¹, Graduate Student, e-mail: andrey.katerov292@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8566-4724,

¹ Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: A.M. Katerov, e-mail: andrey.katerov292@gmail.com.

Получена редакцией 09.11.2022; получена после рецензии 28.01.2023; принята к печати 10.02.2023.

Received by the editors 09.11.2022; received after the review 28.01.2023; accepted for printing 10.02.2023.