

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ПРОГНОЗУ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРЕПИ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТВОЛА, ПРОЙДЕННОГО В СОЛЯНОМ МАССИВЕ

*Протосеня А.Г., Карасев М.А., Катеров А.М., Петрушин В.В.
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург*

Ключевые слова: крепь вертикального ствола, соляной массив, комбинированная крепь, моделирование длительных деформаций соляного массива, реология, численное моделирование.

Аннотация. В работе выполнен прогноз напряженно-деформированного состояния комбинированной крепи вертикального ствола, расположенного в соляном массиве на глубине до 1000 м. В рамках исследования проведен прогноз геомеханических процессов, в окрестности протяженного участка вертикального ствола с учетом периода эксплуатации вертикального ствола равным 50 лет. Выполнено сравнение напряженно-деформированного состояния комбинированной крепи, представленной в виде четырехслойной среды, где внешний слой – бетон, а три внутренних слоя, применяются для учета неоднородности чугунного тюбинга, с результатами, полученными при учете конструкции тюбинга в явной постановке. Результаты прогноза для четырехслойной среды выполнялось в плоской и объемной постановке, при учете конструкции прогноз выполнялся только в объемной постановке. Последний метод определения НДС тюбинговой крепи с учетом фактической ее геометрии позволит повысить достоверность прогноза напряженного состояния крепи, что в свою очередь благоприятно скажется на обосновании ее параметров. На основании полученных результатов и их сравнении в рамках работы выведены коэффициенты для перехода от прогноза напряженно-деформированного состояния крепи при плоском решении задачи, к результатам при решении объемной задачи. Полученные коэффициенты позволят сократить время расчета ожидаемого напряженно-деформированного состояния крепи, за счет решения плоской задачи и перехода к уточненным величинам.

ANALYSIS OF APPROACHES TO THE PREDICTION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE VERTICAL SHAFT LINING CONSTRUCTED IN A SALT MASSIF

*Protosenya A.G., Karasev M.A., Katerov A.M., Petrushin V.V.
Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg*

Keywords: vertical shaft lining, salt massif, combined lining, modeling of long-term deformations of salt massif, rheology, numerical modeling.

Abstract. In the paper, we predict the stress-strain state of the combined vertical shaft lining located in the salt massif at a depth of up to 1000 m. As part of the study, a prediction of geomechanical processes in the area of the extended section of the vertical shaft, taking into account the period of operation of the vertical shaft equal to 50 years has been carried out. The stress-strain state of the combined support presented as a four-layer medium, where the outer layer is concrete and three inner layers are used to account for the heterogeneity of the cast-iron tubing, is compared with the results obtained when accounting for the tubing structure in the explicit formulation. The prediction results for the four-layer medium were performed in the flat and volumetric formulation; when considering the structure, the prediction was performed only in the volumetric formulation. The last method of defining deflection of tubing lining taking into account its actual geometry enables to increase reliability of forecasting stressed state of a support, which in its turn will have a positive effect on justification of its parameters. On the basis of the obtained results and their comparison in the framework of the work there were deduced factors for the transition from prediction of the stress-strain state of the lining in a flat solution of the problem, to the results in solving the volume problem. The obtained coefficients will reduce the time for calculating the expected stress-strain state of the lining, due to the solution of a flat problem and the transition to refined values.

Введение

Строительство вертикальных стволов при разработке соляных месторождений на больших глубинах сопряжено с интенсивным развитием геомеханических процессов, которые вносят неопределенность в выбор типа крепи и обоснование ее параметров, а также оказывают значительное влияние на долговременную устойчивость стволов и техническое состояние крепи. Значительное внимание исследователи уделяют вопросам прогноза

нагрузки на крепь вертикальных стволов и прогноза напряженного состояния крепи вертикальных стволов в соляных массивах. В результате развития реологических процессов в соляном породном массиве возникают значительные смещения контура массива [1] как в процессе строительства, так и в период эксплуатации, что проявляется в виде постоянно растущей нагрузки на крепь ствола. Как отмечают исследователи, даже на глубинах 350-400 м от поверхности земли, напряженное состояние крепи стволов, расположенных в соляных породах, может достичь предела прочности материала крепи, а сама крепь получить повреждение [2-6]. Хотя такие повреждения в большинстве случаев приурочены к сопряжениям вертикального ствола с горизонтальными горными выработками, в отдельных случаях такие повреждения отмечаются и на протяженном участке ствола. Таким образом, повышаются требования к достоверности методов прогноза напряженного состояния крепи и прогнозу развития геомеханических процессов в породном массиве.

На настоящий момент разработаны методы расчета нагрузок на крепь и напряженного состояния крепи горных выработок, основанных на различных гипотезах формирования горного давления, реализация которых выполнена в рамках теорий строительной механики, механики сплошной среды, а также разработан ряд экспериментально – аналитических методов [2, 3, 6, 7]. Среди методов расчета напряженного состояния крепей и обделок можно выделить методику предложенную Н.С. Булычевым [3, 7, 8], который в рамках схемы совместного взаимодействия получил аналитическое решение о формировании нагрузок на крепь горной выработки кругового очертания, расположенной в изотропной линейно-деформируемой среде. Однако технологический прогресс позволил упростить трудоемкие аналитические решения и позволил их автоматизировать.

Применение численных методов анализа позволяет уйти от ряда допущений и упрощений, представленных в аналитических решениях и повысить достоверность решения задачи прогноза напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола. Данным вопросам посвящено множество исследований. Так, в работах [9, 10] рассматривается методика расчета крепи вертикального ствола методом численного моделирования. 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] проведено исследование 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 ледопороном массиве. Тюбинговая крепь представлена как однослойная упругая среда. В диссертационной работе [8] решена пространственная задача по определению напряженно-деформируемого состояния окружающего вертикальный ствол массива угольной шахты, на основе которой даны рекомендации по выбору параметров крепи. В работе [14] проведен прогноз напряжений в бетонной крепи вертикального ствола с учетом временного фактора. В работе [15] рассматривается развитие напряжений в крепи вертикального ствола с учетом технологии проходки. В работе [16] проведено сравнение результатов, полученных при аналитическом расчете с результатами, полученными при моделировании напряжений, возникающих в бетонной крепи ствола. В статьях авторов [17, 18] рассматривается прогноз напряженного состояния участка комбинированной крепи вертикальных стволов диаметром 6,0 и 7,0 м, расположенных в соляных породах. Комбинированная крепь состоит из бетонного слоя и чугунной тюбинговой крепи. Чугунная тюбинговая крепь рассматривается в виде двухслойной системы, каждый слой из которых обладает различной жесткостью. Данный подход был предложен Н.С. Булычевым при расчете многослойной крепи. Как отмечает автор методики, результаты расчета нагрузки на крепь хорошо сопоставляются с результатами натурных наблюдений. В работе [5] представлена методика прогноза напряженного состояния крепи вертикального ствола с учетом реологических свойств

каменной соли на примере Верхнекамского месторождения. В исследовании [19] проведен прогноз напряженного состояния бетонной крепи вертикального ствола, расположенного в соляных породах с учетом временного фактора. В исследовании, проведенном в работе [20] дан прогноз напряженно-деформированного состояния тубинговой крепи вертикального ствола, расположенного в соляном массиве с учетом реологии, на основании численного моделирования. В работе [21] представлен подход к прогнозу нагрузок на тубинговую крепь вертикального ствола в плоской постановке, в котором тубинговая крепь рассматривается в продольном сечении с отражением геометрии ребер жесткости тубинговой крепи.

Данный подход, позволил определить зоны концентрации максимальных напряжений, на основе данного прогноза были выполнены рекомендации по подбору параметров тубинговой крепи, расположенной в различных слоях пород по трассе ствола. Авторами [18] рассматривается крепь глубокого вертикального ствола на контакте двух породных слоев. Можно сделать вывод, что среди исследователей нет единой методики к прогнозу НДС крепи вертикальных стволов, в связи с этим возникает необходимость сравнить результаты прогноза НДС крепи при различной степени уточнения.

Наибольшее распространение на территории стран СНГ и России получили конструкции с применением чугунных или стальных тубингов и монолитного бетона. В качестве примера на рисунке 1 приведены наиболее распространенные конструкции крепи вертикальных стволов.

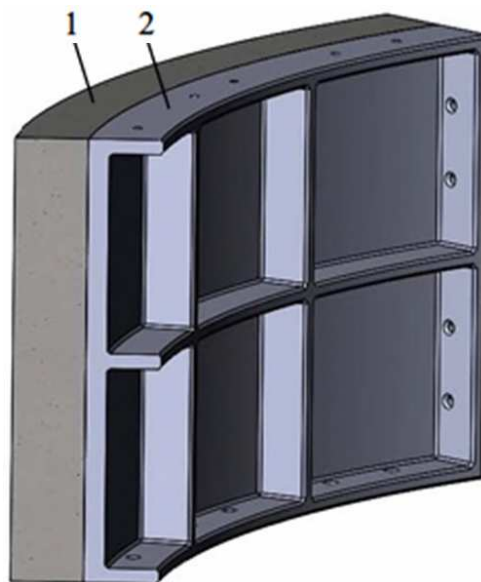


Рис. 1. Схема комбинированной двухслойной крепи из монолитного бетона и чугунной колонны: 1 – бетон; 2 – чугунные тубинги

Общие сведения об объекте исследования

Соляные породы относятся к геоматериалам, которые активно деформируются во времени, особенно при напряжениях породного массива сопоставимых с пределом прочности солей в условиях одноосного сжатия. Прочность пород на одноосное сжатие варьируется в диапазоне от 20 до 30 МПа, хотя отдельные образцы могут иметь как меньшую, так и большую по значениям величину прочности, при этом величины начальных напряжений соляного породного массива достигают 25 МПа. Породный массив, сложенный соляными породами, представляется собой вязкопластическую среду, развитие длительных деформаций которой определяется формируемом в результате строительства и последующей эксплуатации напряженным состоянием солей.

С точки зрения горнотехнических условий рассматривается вертикальный ствол с внутренним диаметром 7,0 м, внешним диаметром 8,3 м сооружаемый с применением стволотехнического механизированного комплекса. В работе рассматривается вариант, когда крепление пород осуществляется чугунной тубинговой крепью. Несущая способность тубинговой крепи характеризуется двумя показателями, геометрические размеры тубинга и механические характеристики чугуна. Поведение чугуна и бетона рассматривалось в рамках теории упругости. Принято, что модуль деформации бетона составляет 30 ГПа, при коэффициенте Пуассона равного 0,2. При выполнении расчетов учитывалось снижение деформационных характеристик бетона, связанных с особенностью его длительного деформирования. Чугунная тубинговая крепь выполнена из чугуна марки ВЧ-70. Модуль упругости данной марки чугуна равен 180 ГПа, коэффициент Пуассона 0,2.

Для описания механического поведения соляной толщи, принята вязкопластическая модель, основанная на степенном законе ползучести [22, 23]. Модель Double Power Law

позволяет прогнозировать развитие деформаций соляного массива, характерны для второй стадии ползучести (стадия установившейся ползучести), при этом учитывается 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 в формуле:

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

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

Механические характеристики соляных пород, слагающих массив горных пород представлены в таблице 1.

Для определения реологических параметров решалась обратная геомеханическая задача, в рамках которой параметры подбирались на основе натуральных наблюдений за смещением незакрепленной горной выработки, пройденной на глубине 850 м [17]. В результате чего были подобраны следующие реологические постоянные для реологической модели, представленные в таблице 2.

Табл. 1. Усреднённые механические характеристики соляных пород

№ п/п	Параметр	Единица измерений	Усредненные значения механических характеристик пород
			Соляные породы
1	Модуль упругости	МПа	20 000
2	Коэффициент поперечной деформации	-	0,3
3	Прочность породы в условиях одноосного сжатия	МПа	25

Табл. 2. Реологические постоянные для модели Double Power Law

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

Методика прогноза напряженного состояния тубинговой чугунной крепи

В работе рассмотрен прогноз напряженного состояния вертикального ствола на участке 1000 м. Тубинговая крепь вертикального ствола представляет собой трехслойную конструкцию, которая включает внутренние ребра, спинку и внешние ребра. Для расчета напряженного состояния такой крепи традиционно используется методика, предложенная Н.С. Булычева [24], согласно которой реальная конструкция тубинговой крепи заменяется многослойным кольцом, где каждый слой отвечает за работу спинки или ребер. За счет того, что каждый слой имеет различные механические характеристики, удается добиться аналогичной жесткости, как и у тубинговой крепи. Так, деформационные характеристики спинки принимаются равными механическим характеристикам чугуна, в то время как для определения деформационных характеристик ребер необходимо понижать модуль деформации материала ребер с учетом их фактической площади по высоте тубинга (коэффициент армирования) и численно равного отношению суммы толщины ребер жесткости к высоте тубинга (рис. 2а). Однако, такой подход не лишен недостатков и требуется подтверждение правомерности его использования для конкретных условий нагружения крепи.

При прогнозе напряженного-деформированного состояния крепи ствола, расположенного в изотропной однородной среде, применялось 3 подхода: 1) плоская постановка, крепь вертикального ствола представлена в виде четырехслойной среды, где

внешний слой – бетон, а три внутренних слоя, применяются для учета неоднородности чугунного тюбинга (рис. 2,а); 2) объемная постановка, крепь вертикального ствола представлена также четырехслойной средой (рис. 2,б); 3) объемная постановка, крепь вертикального ствола с учетом конструкции тюбинга в явной постановке. Таким образом, при выполнении численного моделирования тюбинговая обделка представлена в виде пространственной конструкции (рис. 2,в).

Основные механические характеристики тюбинговой крепи при ее рассмотрении в виде многослойной конструкции сведены в таблицу 3.

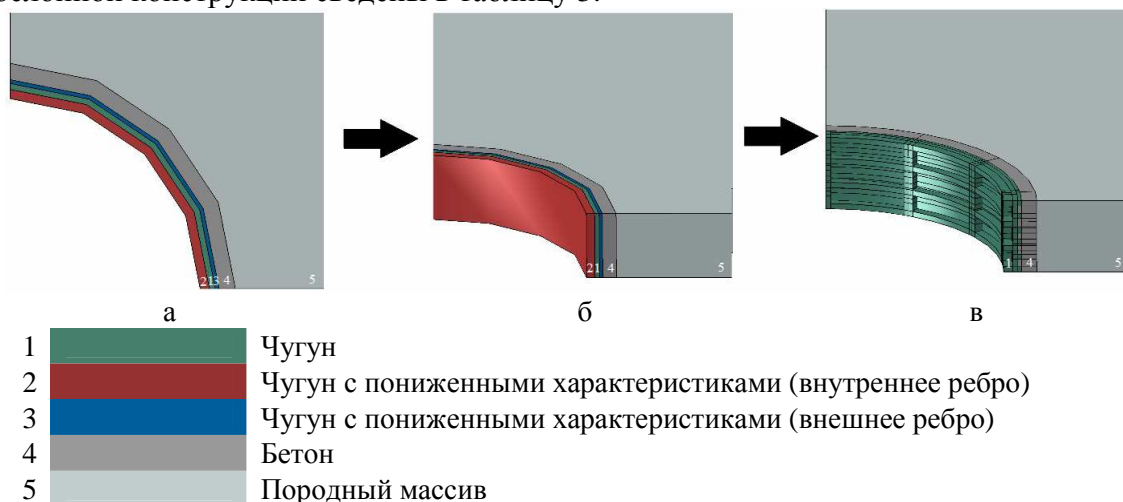


Рис. 2. Подходы к моделированию тюбинговой крепи: а) расчетное представление тюбинговой крепи как многослойной конструкции в плоской постановке б) расчетное представление тюбинговой крепи как многослойной конструкции в объемной постановке; в) расчетное представление тюбинговой крепи в условиях осесимметричной постановки

Табл. 3. Механические характеристики тюбинговой крепи представленной в виде многослойной конструкции

Типоразмер тюбинга	r_1 , м	r_2 , м	r_3 , м	Модуль упругости материала спинки E , МПа	Приведенный модуль упругости внутренних ребер E_2 , МПа	Приведенный модуль упругости наружных ребер E_1 , МПа	Расчетное сопротивление, МПа
7,0-100	3,68	3,78	3,85	180000	52200	85292,31	456,65

Конечно-элементные модели прогноза напряженного состояния тюбинговой крепи для представлены на рисунке 3 для многослойной крепи и для пространственного представления тюбинговой крепи. Задачи решались в следующих граничных условиях. Смещения по нижней и боковым границам модели запрещены в направлении ортогональным к данным поверхностям. К верхней границе модели приложено напряжение в соответствии с градиентом развития горного давления 0,0226 МПа/м для каждого рассматриваемого участка. Распределение напряжений в соляной толще принято гидростатическим. Для уменьшения размерности численных моделей рассматривался только одна четверть модели. Температура породного массива принята равной 303 К.

Результаты прогноза напряженно-деформированного состояния крепи

На основании выполненных расчетов установлено напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола и представлено для максимальных главных напряжений. В рамках прогноза стоит обратить внимание на развитие напряжений в каждом конструктивном элементе, для чугунной крепи это внешние и внутренние ребра жесткости, а также спинка тюбинга. Для каждого метода прогноза были построены графики развития НДС крепи для отметки 1000 м и каждого конструктивного элемента за период 50 лет рисунок 3.

Представлен график развития НДС для участка крепи, расположенного на глубине 1000 м для каждого конструктивного элемента за период наблюдений в 50 лет. Из полученных результатов можно сделать вывод, что прогноз НДС с применением плоской модели значительно превышает результаты прогноза с результатами, полученными в рамках решения объемных задач. Для наглядного сравнения результатов прогноза представлено развитие НДС в сечении тубинговой крепи рисунок 4.

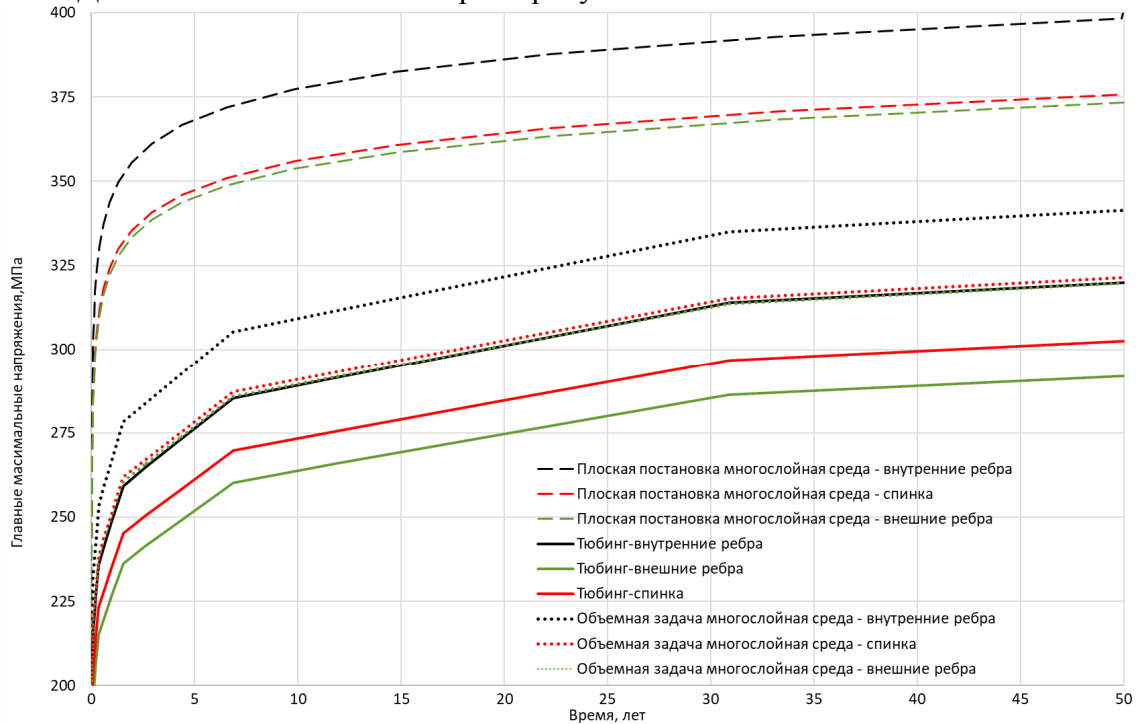


Рис. 3. Развитие НДС в конструктивных элементах тубинга

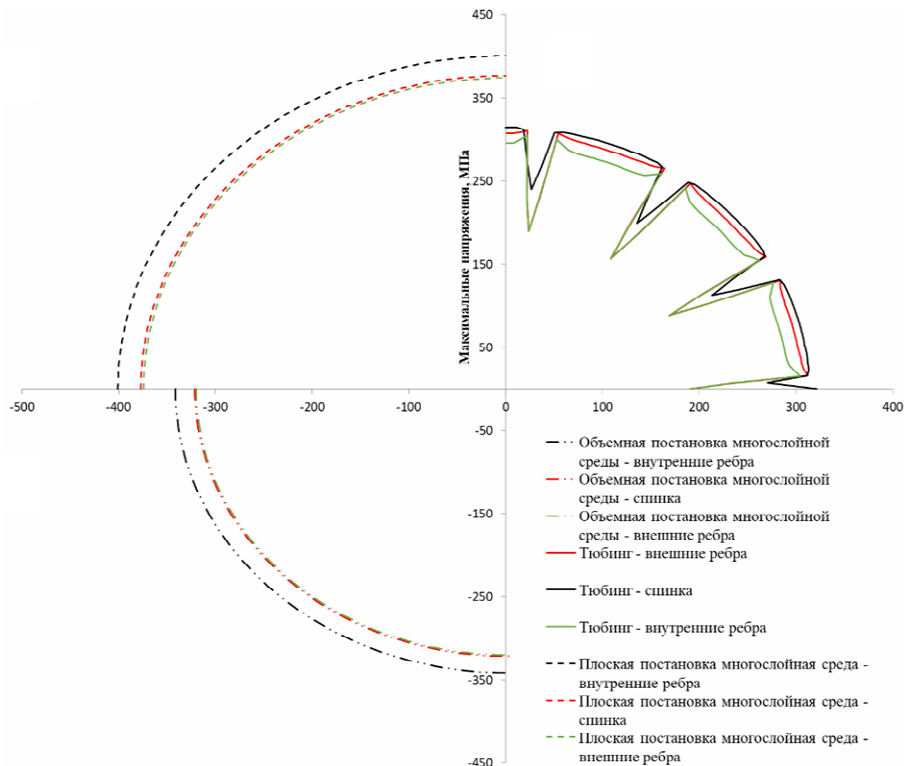


Рис. 4. Развитие НДС в конструктивных элементах тубинга для сечения на глубине 1000 м. а) Плоская постановка, крепь представлена как многослойная среда; б) пространственная постановка, крепь с учетом геометрической конфигурации тубинговой крепи; в) пространственная постановка, крепь представлена как многослойная среда

Из полученных результатов прогноза (рис. 4) стоит обратить внимание на то, что результаты, полученные при решении плоской задачи, превышают результаты объемной постановки для многослойной среды на 17% и 28% для объемной постановки с представлением геометрической конфигурации тубингового кольца.

Выводы

В рамках проведенного исследования был выполнен анализ существующих подходов к прогнозу напряженно-деформированного состоянию крепи вертикального ствола, пройденного в соляном массиве. Согласно, полученным результатам можно сделать вывод, что прогноз НДС крепи при решении пространственной задачи меньше, чем при прогнозе с применением плоской постановки. Однако решение пространственной задачи является трудозатратным и требует большего времени расчета, в связи с этим сравнив полученные результаты можно вывести поправочный коэффициент, позволяющий перейти от результатов прогноза в плоской постановке прогнозируемым величинам, полученным при решении объемной задачи.

Для перехода из плоской постановки, с представлением крепи ствола как многослойную среду, в объемную для внутренних ребер жесткости, спинки и внешних ребер жесткости можно применять переводной коэффициент равный 0,85.

Для перехода из плоской постановки, с представлением крепи ствола как многослойную среду, в объемную постановку с представлением геометрической конфигурации тубингового кольца, для внутренних ребер жесткости следует применять коэффициент 0,78, для спинки тубинга 0,82 и для внешних ребер жесткости 0,84. Различие в величине коэффициентов связана с тем, что при рассмотрении геометрической конфигурации тубинга меняется пространственная жесткость конструкции и сечение конструктивных элементов тубинговой крепи, что приводит к различным величинам напряжений, возникающих в них.

Список литературы

1. Качурин Н.М., Афанасьев И.А., Тарасов В.В., Стась П.П. Мониторинг устойчивости вертикальных стволов калийных рудников // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2020. – №3. – С. 304-317.
2. Ольховиков Ю.П. Крепь капитальных выработок калийных и соляных рудников. – М.: Недра, 1984. – 238 с.
3. Казикаев Д.М., Сергеев С.В. Диагностика и мониторинг напряженного состояния вертикальных стволов. – М.: Изд-во “Горная книга”, 2011. – 244 с.
4. Константинова С.А., Крамсков Н.П., Филатов А.П., Сороченко М.К. Некоторые проблемы строительства и эксплуатации подземных сооружений в соленосных породах Чарской свиты на подземных рудниках АК «АЛРОСА» и пути их решения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2004. – №11. – С. 221-226.
5. Соловьев В.А., Аптуков В.Н., Ваулина И.Б. Поддержание горных выработок в породах соленосной толщи: Теория и практика. – Новосибирск: Наука, 2017. – 264 с.
6. Обручев Ю.С., Абашин С.И., Мишедченко А.Д. Охрана вертикальных стволов, сооружаемых в породах, обладающих ползучестью // Шахтное строительство. – 1983. – Т. 9. – С. 18-19.
7. Булычев Н.С., Абрамсон Х.И. Крепь вертикальных стволов шахт. – М.: Недра, 1978. – 300 с.
8. Бай Нгуен Ны. Оценка устойчивости крепи вертикальных стволов и сопряжений при строительстве угольных шахт вьетнама: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург: Национальный минерально-сырьевой университет Горный, 2016. – 20 с.
9. Jia Y.D., Stace R., Williams A., Numerical modelling of shaft lining stability at deep mine // Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology. 2013, vol. 122, pp. 8-19.
10. Jia Yudan Numerical modelling of shaft lining stability: PhD thesis. – University of Nottingham, 2011. – 312 p.
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.
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. Аптуков В.Н., Тарасов В.В. Оценка влияния негативных факторов на ослабление бетонной крепи шахтных стволов в соляных породах // Известия вузов. Горный журнал. – 2015. – №1. – С. 47-52.
15. Сильченко Ю.А., Плешко М.С. О проблеме учета технологии работ при определении параметров крепи вертикальных стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – №11. – С. 96-107.

16. Качурин Н. М., Афанасьев И. А. Определение влияния податливого слоя на величину напряжений в бетонной крепи ствола скважины 784/1 ОАО "Уралкалий" // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2019. – №2. – С. 253-259.
17. 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.
18. 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. – №12. – P. 151-162. – DOI: 10.17794/rgn.2022.1.13.
19. Соловьев В.А., Аптуков В.Н., Котляр Е.К. Геомеханические и технологические аспекты совершенствования конструкции шахтных стволов в соляных породах // Горный журнал. – 2015. – № 11. – С. 24-28.
20. Sun Xiaoming, Li Gan, Zhao Chengwei, Liu Yangyang, Miao Chengyu. Investigation of Deep Mine Shaft Stability in Alternating Hard and Soft Rock Strata Using Three-Dimensional Numerical Modeling // Processes. 2018, vol. 7(1):2. DOI: 10.3390/PR7010002.
21. Du Judeel G.T., Keyter G.J., Harte N.D. Harmonising Rock Engineering and the Environment // Proceedings of the 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics. 2012, pp. 1697-1704.
22. Bérest P., Ghoreychi M., Hadj-Hassen F., Tijani M. Mechanical Behaviour of Salt VII. – Paris: Taylor & Francis, 2012. – 506 p.
23. Gunther R., Salzer K., Popp T., Ludeling C. Steady-state creep of rock salt: Improved approaches for lab determination and modeling // Rock Mech Rock Eng. 2015, vol. 48, pp. 2603-2613. doi.org/10.1007/s00603-015-0839-2.
24. Протосеня А.Г., Огородников Ю.Н., Деменков П.А., Карасев М.А., Лебедев М.О., Потемкин Д.А., Козин Е.Г. Механика подземных сооружений метрополитенов. Пространственные модели и мониторинг. – СПб: СПГТУ-МАНЭБ, 2011. – 355 с.

References

1. Kachurin N.M., Afanasiev I.A., Tarasov V.V., Stass P.P. Monitoring of stability of vertical shafts of potash mines // Proceedings of Tula State University. Earth Sciences. 2020, no. 3, pp. 304 -317.
2. Olkhovikov Yu.P. Strengthening of capital workings of potash and salt mines. – М.: Nedra, 1984. – 238 p.
3. Kazikaev D.M., Sergeev S.V. Diagnosis and Monitoring of Stress State of Vertical Shafts. – М.: Publ. house "Mining book", 2011. – 244 p.
4. Konstantinova S.A., Kramskov N.P., Filatov A.P., Sorochenko M.K. Some problems of construction and operation of underground structures in the saline rocks of the Charskaya suite in ALROSA's underground mines and ways to solve them // Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). 2004, no. 11. pp. 220-226.
5. Solovyov V.A., Aptukov V.N., Vaulina I.B. Maintaining mine workings in rocks of the salt strata: Theory and practice. – Novosibirsk: Science, 2017. – 264 p.
6. Obruchev Yu.S., Abashin S.I., Mishedchenko A.D. Protection of vertical shafts constructed in rocks with creep // Mine Construction. 1983, vol. 9, pp. 18-19.
7. Bulychev N.S., Abramson H.I. Fastening of vertical shafts of mines. – М.: Nedra, 1978. – 300 p.
8. Bai Nguyen Ny. Evaluation of Stability of Vertical Shafts and Links during Construction of Coal Mines in Vietnam: Abstract of diss. ... cand. of tech. sc. – Saint-Petersburg: National Mineral Resources University of Mining, 2016. – 20 p.
9. Jia Y.D., Stace R., Williams A., Numerical modelling of shaft lining stability at deep mine // Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology. 2013, vol. 122, pp. 8-19.
10. Jia Yudan Numerical modelling of shaft lining stability: PhD thesis. – University of Nottingham, 2011. – 312 p.
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.
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. Aptukov V.N., Tarasov V.V. Assessment of the effect of negative factors on the weakening of concrete lining of shafts in salt formations // News of universities. Mining Journal. 2015, no. 1, pp. 47-52.
15. Silchenko Y.A., Pleshko M.S. On the problem of taking into account the technology of works in determining the parameters of vertical shaft support // Mining Information and Analytical Bulletin. 2020, no. 11, pp. 96-107.
16. Kachurin N. M., Afanasyev I. A. Determination of the effect of a compliant layer on the value of stresses in the concrete lining of the well shaft 784/1 of JSC "Uralkali" // Proceedings of TulSU. Earth Sciences. 2019, no. 2, pp. 253-259.
17. Karasev M.A., Bouslova M.A., Vilner M.A., Nguyen T.T. Method for predicting the stress-strain state of the vertical shaft lining at the drift landing section in saliferous rocks // Journal of Mining Institute. 2019, vol. 240, pp. 628-637. doi.org/10.31897/pmi.2019.6.628.

18. 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. –№12. – P. 151-162. – DOI: 10.17794/rgn.2022.1.13.
19. Soloviev V.A., Aptukov V.N., Kotlyar E.K. Geomechanical and technological aspects of mine shaft design improvement in salt formations // Mining Journal. 2015, no. 11, pp. 24-28. doi.org/10.17580/gzh.2015.11.05.
20. Sun Xiaoming, Li Gan, Zhao Chengwei, Liu Yangyang, Miao Chengyu. Investigation of Deep Mine Shaft Stability in Alternating Hard and Soft Rock Strata Using Three-Dimensional Numerical Modeling // Processes. 2018, vol. 7(1):2. DOI: 10.3390/PR7010002.
21. Du Judeel G.T., Keyter G.J., Harte N.D. Harmonising Rock Engineering and the Environment // Proceedings of the 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics. 2012, pp. 1697-1704.
22. Bérest P., Ghoreychi M., Hadj-Hassen F., Tijani M. Mechanical Behaviour of Salt VII. – Paris: Taylor & Francis, 2012. – 506 p.
23. Gunther R., Salzer K., Popp T., Ludeling C. Steady-state creep of rock salt: Improved approaches for lab determination and modeling // Rock Mech Rock Eng. 2015, vol. 48, pp. 2603-2613. doi.org/10.1007/s00603-015-0839-2.
24. Protosenya A.G., Ogorodnikov Y.N., Demenkov P.A., Karasev M.A., Lebedev M.O., Potemkin D.A., Kozin E.G. Mechanics of underground structures of subways. Spatial Models and Monitoring. – SPb: SPbSMU- IAELPS, 2011. – 355 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Протосеня Анатолий Григорьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры Строительство горных предприятий и подземных сооружений	Protosenya Anatoly Grigoryevich – doctor of technical sciences, professor, head of the department of construction of mining enterprises and underground structures
Карасев Максим Анатольевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Строительства горных предприятий и подземных сооружений	Karasev Maxim Anatolievich – doctor of technical sciences, professor, professor of the chair of construction of mining enterprises and underground structures
Катеров Андрей Максимович – аспирант	Katerov Andrey Maksimovich – postgraduate student
Петрушин Владислав Владимирович – аспирант	Petrushin Vladislav Vladimirovich – postgraduate student
andrey.katerov292@gmail.com	

Получена 30.03.2023