ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(8):142-153
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.062 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_142

РАСЧЕТ КРЕПИ СОПРЯЖЕНИЙ СТВОЛОВ В ПОРОДАХ, СКЛОННЫХ К ПОЛЗУЧЕСТИ

Ю.А. Кириенко

УИТ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: 9267810740@mail.ru

Аннотация: Проведен сравнительный анализ результатов расчета крепи ствола аналитическими и численными методами и обоснование применения расчетного метода для условий проходки ствола в породах, склонных к ползучести. Приведены необходимые исходные данные для корректного выполнения расчета в заданных условиях. Обозначены области применения метода расчета в плоской и пространственной постановках. В рамках выбора расчетной модели выполнена оценка прочности крепи по результатам расчетов конечно-элементной модели и по результатам аналитических решений. Выбрана конечно-элементная модель, которая имеет наилучшую сходимость результатов расчета с аналитическими решениями. Изложены обязательные условия расчета крепи. При расчете необходимо учитывать: вязкоупругие деформации пород, наличие отставания постоянной крепи ствола от забоя в период проходки, начальное поле напряжений массива. Выполнен анализ начального поля напряжений массива, деформационных процессов и нагрузок на крепь в зоне сопряжения с горизонтальными выработками во время проходки и на момент завершения срока службы ствола. Несоответствие жесткости крепи ствола жесткости крепи сопряжения приводит к росту нагрузок на крепь ствола, но положительно сказывается на напряженно-деформированном состоянии крепи сопряжения к концу срока службы выработки.

Ключевые слова: расчет крепи, аналитический метод, численный метод, метод конечных элементов, шахтный ствол, сопряжения, крепь, начальное поле напряжений, деформации ползучести.

Для цитирования: *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.

Support system design for shaft junctions in creeping rocks

Y.A. Kirienko

Information Technology Department, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia, e-mail: 9267810740@mail.ru

Abstract: The article presents the comparison of the shaft support designs obtained analytically and numerically, and offers a justification of the computational method for shaft sinking in creeping rocks. The source data required for the correct calculation for the preset conditions are presented. The application ranges of the computational method are defined in two and three dimensions. Within the design model selection, the shaft support strength estimates are obtained from the finite element modeling and analytical solution. The finite element model which has the highest agreement with the analytical solution data is picked up. The essential conditions

© Ю.А. Кириенко. 2021.

to be included in the support system design are specified, namely, viscoelastic deformation of rocks, lag of the permanent support behind the shaft foot during sinking (if any), initial stress field. The natural stress field, strains and loads on the support at shaft junctions with mine tunnels during sinking and at the end of the shaft service life are analyzed. The nonconformance of stiffnesses of the shaft support and the shaft junction support leads to higher loading of the shaft support but has a beneficial effect on the stress–strain behavior of the shaft junction support at the end of the shaft service life.

Key words: support system design, analytical method, numerical method, finite element method, mine shaft, junctions, support, initial stress field, creep strain.

For citation: 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.

Введение

Выполнение расчетов крепи подземных сооружений неразрывно связано с решением сложных горно-геологических задач. Необходимо устанавливать значения главных напряжений, определяя характер начального поля напряжений в горном массиве. Важным моментом является прогноз смещений массива с целью выбора оптимальных параметров крепи [1, 2]. Нормальные и касательные напряжения лишь условно можно считать нагрузками, т.к. они не могут быть заранее определены и являются результатом взаимодействия конструкции с массивом пород. Нагрузки на крепь зависят от многих факторов, таких как форма сечения выработки, деформационные характеристики материалов крепи и горной породы, технологии проходки выработки и возведения крепи [3]. Отсюда следует, что применяя различные конструкции крепи и технологии их возведения, можно управлять напряженным состоянием крепи [4, 5]. Исходные данные, требуемые для расчета, также играют важную роль. Среди них большое значение имеет информация о естественном поле напряжений в массиве пород, характеристики длительной прочности и ползучести, деформационные характеристики пород.

При расчетах крепи горных выработок в условиях вязкоупругого деформирования пород необходимо учитывать три фактора:

- производить расчет с учетом вязкоупругого деформирования пород (на основе теории линейной наследственной ползучести с использованием метода переменных модулей);
- учитывать наличие отставания крепи ствола от забоя в период проходки и связанную с этим предварительную разгрузку пород (реализацию упругих деформаций);
- учитывать начальное поле напряжений массива.

Выбор и обоснование метода расчета крепи

Рассмотрим решение расчета нагрузок на крепь вертикальных выработок, согласно СП91.13330.2012 основанное на методах строительной механики. В качестве примера рассмотрим область протяженной части ствола со следующими исходными данными:

- Глубина — 320 м. Радиус в свету r_0 = 4 м.
- Крепь сборная тюбинговая. Типоразмер тюбингов 8.0-60.
- Схема проходки — параллельная.
- Параметры вмещающих пород.

Таблица 1

Результаты расчета нагрузок на крепь по СП91.13330.2012
Computation of support system loads as per Construction Regulations SP 91.13330.2012

$H_р$, м	$k_г$	$k_{сб}$	$k_ц$	k_t	$k_а$	C	γ_f	γ_n	γ_d	Δ	$P_н$, МПа	P, МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
320	1	1	1	1	1	5,8	1,17	1,2	0,75	0	0,11	0,25

• Коэффициент бокового распора λ = 0,6.

• Расчетная прочность на сжатие R_c = = 17,45 МПа.

• Длительная прочность на сжатие R_c = 5,44 МПа.

Результаты расчета нагрузок на крепь по приложению Б СП91.13330.2012 приведены в табл. 1.

Полученные значения нормативной и расчетной нагрузок на крепь дают прогнозную картину, существенно отличающуюся от практических условий строительства и эксплуатации, которые обуславливают интенсивное деформирование и разрушение крепи в породах соляного комплекса с течением времени.

Такой результат объясняется отсутствием учета влияния деформаций ползучести на напряженное состояние крепи. Ползучесть соляных пород требует учета фактора времени, что выходит за рамки изложенной в СП91.13330.2012 методики расчета.

Крепь подземных сооружений испытывает действительные нагрузки и воздействия (собственный вес пород, тектонические напряжения, сейсмические воздействия, воздействия проходки параллельной выработки и др.) но воспринимает их вместе с окружающим массивом пород, составляя с ним единую деформируемую систему «крепь-массив». Элементы этой системы в процессе нагружения испытывают контактные взаимодействия друг с другом. Наиболее надежными являются аналитические методы расчета, основанные на строгих аналитических решениях соответствующих контактных задач теории упругости. Аналитические решения ограничиваются плоскими задачами, и многие

Таблица 2

Результаты расчета крепи различными методами
Support system designs by different methods

№ п/п	Контур слоя	Расчетный метод							
		I		II		III		IV	
		Аналитический расчет методом снимаемых напряжений		Аналитический расчет методом эквивалентных напряжений		Приложенная нагрузка. МКЭ (Midas GTS NX)		МКЭ. Учет начального поля напряжений и стадий строительства. (Midas GTS NX)	
		бетон	тюбинг	бетон	тюбинг	бетон	тюбинг	бетон	тюбинг
1		Максимальные тангенциальные напряжения в крепи, МПа.							
2	Внут.	13,6	105,1	11,9	112,7	16,6	149,9	12,3	111,3
3	Внеш.	12,5	102,7	11,0	110,1	15,2	145,4	11,2	107,9
4		Нагрузка на крепь (контактные радиальные напряжения), МПа							
5	Внеш.	3,56	–	3,56	–	4,46	–	3,31	–

требуемые практикой задачи и методы расчета невозможны. Расчет крепи в сложных пространственных моделей (сопряжения горизонтальных выработок с шахтным стволом) возможен только с помощью численного моделирования.

Для того чтобы убедиться в необходимости учета начального поля напряжений в массиве, выполним несколько расчетов. В качестве примера решим в плоской постановке аналитическим методом и МКЭ задачу расчета тюбинговой крепи вертикального ствола. Исходные данные:

- Радиус в свету r_0 = 4 м.
- Типоразмер тюбингов 8.0-60. Приведенная толщина тюбингового кольца 0,1 м.
- Деформационные характеристики чугуна СЧ30: [E = 98 000 МПа; υ = 0,2; γ = 0,078 МН/м^3].
- Расчетная прочность тюбингового кольца: R_c = 183,60 МПа, R_c/γ_m = = 166,9 МПа.
- Деформационные характеристики бетона: В40: [E = 15 000 МПа; υ = 0,2; γ = 0,025 МН/м^3]. Расчетная прочность R_b = 15,4 МПа. В25: [E = 10 714 МПа; υ = 0,2; γ = 0,025 МН/м^3]. Расчетная прочность R_b = 9,8 МПа.
- Параметры вмещающих пород.
- Каменная соль на момент завершения срока эксплуатации выработки (50 лет): γ = 0,022 МН/м^3; E_{50} = 75 МПа; υ_{50} = 0,48.
- Коэффициент бокового распора λ = 0,6.
- Корректирующий коэффициент α^* = 0,86.
- Расчетное поле начальных напряжений массива на глубине 320 м:
- P_z = 6,0 МПа; P_{xy} = 3,6 МПа.

Образование выработки в напряженном массиве может быть представлено как снятие начальных напряжений, существовавших в массиве, с поверхности, которая становится поверхностью выработки. Очевидно, что снимаемые напряжения равны по величине начальным напряжениям в массиве, но противоположны по знаку. Деформации и перемещения в массиве в результате образования выработки полностью обусловливаются действием только снимаемых напряжений. Для получения решения МКЭ необходим программный комплекс, ориентированный на решение геотехнических задач. На сегодняшний день одним из таких комплексов является MIDAS GTS NX. Алгоритм расчета стадий строительства при численном решении следующий: отслеживаются внутренние усилия в удаленных элементах (выемка) и прикладываются на активируемые элементы (крепь).

Изучим аналитические решения данного примера. Алгоритмы решения, позволяющие рассмотреть взаимодействие крепи с массивом как единую совместно деформируемую систему, описаны в монографиях Н.С. Булычева [6, 7].

Рассмотрим две расчетные схемы. В расчетной схеме с эквивалентными напряжениями снимаемые нагрузки на контакте крепи с массивом заменены эквивалентными им и приложенными на бесконечности. Расчетная схема со снимаемыми напряжениями отличается тем, что нагрузки приложены не к линии контакта крепи с массивом, а к внутреннему контуру сечения крепи. Таким образом, эти две схемы аналогичны друг другу. Единственное различие заключается в том, что в схеме со снимаемыми нагрузками не учитывается собственный вес крепи. Расчетная схема с эквивалентными напряжениями получила свое выражение в виде расчетной программы РК-2М, а расчетная схема со снимаемыми напряжениями отражена в [8]. Результаты расчета по обеим схемам представлены в виде графиков I и II, рис. 1.

На рис. 1 приведены графики зависимости напряжений в тюбинговой

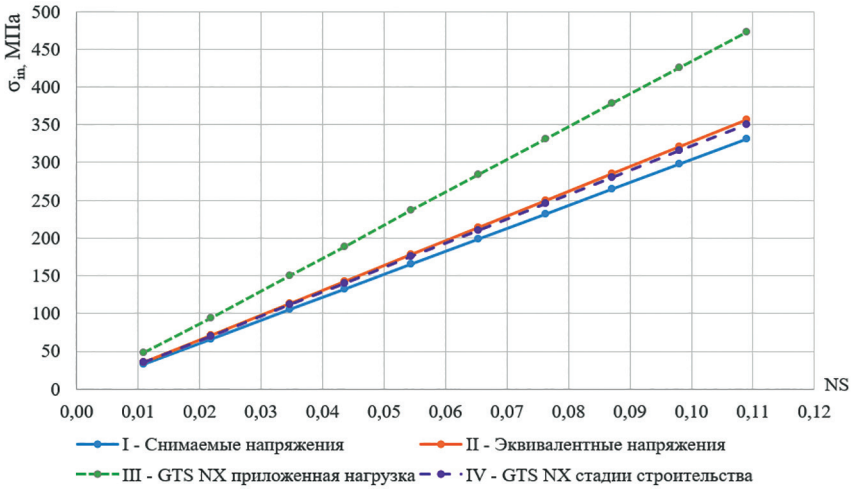

Рис. 1. Графики зависимости напряжений в тюбинговой крепи от начального напряжения в массиве и прочности крепи при различных методах расчета

Fig. 1. Tubing support stresses versus initial rock mass stresses and support strength in computation by different methods

крепи от начального напряжения в массиве и прочности крепи при различных методах расчета: I — метод снимаемых напряжений, II — метод эквивалентных напряжений, III — численный метод с приложенной нагрузкой (прямое нагружение), IV — численный метод с учетом начального поля напряжений и стадий строительства. По горизонтальной оси приведены значения параметра $NS = \lambda\alpha^*\gamma H/R_c$, где в числителе даны расчетные начальные напряжения в массиве, а в знаменателе — расчетное сопротивление тюбинговой крепи. По вертикальной оси приведены значения максимальных тангенциальных напряжения в крепи, МПа.

На графике III рис. 1 представлена данная зависимость при расчете крепи ствола в плоской постановке МКЭ в программном комплексе Midas GTS NX. Расчетная схема приведена на рис. 2, а. Расчет производился без учета начального поля напряжений, то есть нагружение массива произведено с уже пройденной и закрепленной выработкой. По графику видно, что такая расчетная модель дает завышенный результат напряжений в крепи.

На графике IV рис. 1 представлена данная зависимость при расчете крепи ствола в плоской постановке МКЭ в программном комплексе Midas GTS NX, но учтено начальное поля напряжений. Расчетная схема приведена на рис. 2, *б*. В данном случае в расчетной схеме учитывались стадии проходки ствола:

- формирование начального поля напряжений в горном массиве;
- проходка выработки (образование полости в массиве);
- возведение крепи (включение крепи в работу).

По данному графику видно, что такая расчетная модель дает результат, близкий к строгим аналитическим решениям.

Таким образом, можно сделать вывод, что расчетный метод IV при решении задач численным способом наиболее близок к строгим аналитическим решениям.

В отсутствии учета влияния деформаций ползучести на напряженное со-

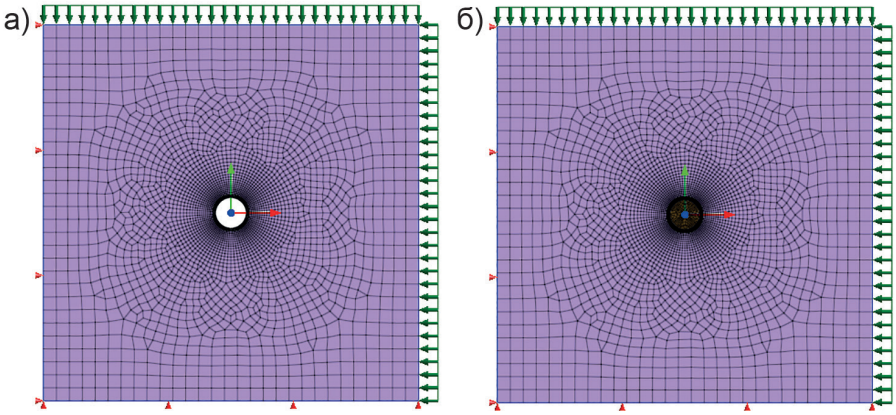

Рис. 2. Расчетная схема: расчетная схема с прямым нагружением (а); расчетная схема с учетом начального поля напряжений (б)

Fig. 2. Analytical models with direct loading (a) and with regard to initial stress field (b)

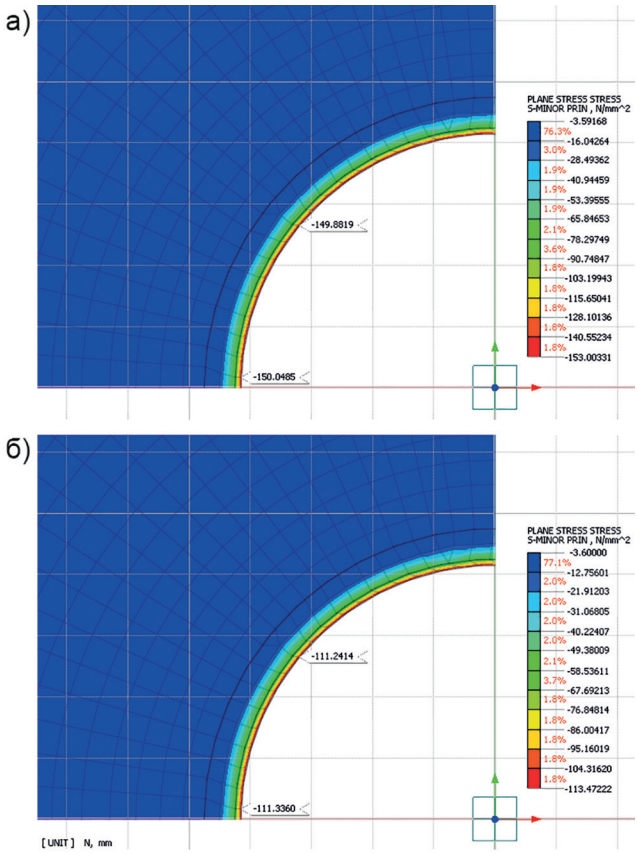

Рис. 3. Главные напряжения в тюбинговой крепи при различном подходе к расчету: расчет прямым нагружением (а); расчет с учетом начального поля напряжений (б)

Fig. 3. Principal stresses in tubing support in computations by different methods: direct loading (a); with regard to initial stress field (b)

стояние крепи в методике расчета по СП91.13330.2012 можно убедиться при сравнении результатов расчета с аналитическим и численным решениями. Значения радиальных напряжений (нагрузок на крепь), столбец 12, табл. 1; строка 5, табл. 2:

- аналитическое решение:
3,56>>0,11 МПа;
- численное решение:
3,31>>0,11 МПа.

Расчет крепи сопряжений в трехмерной постановке

Для решения сложных пространственных задач, к которым относятся сопряжения горизонтальных горных выработок с шахтным стволом, необходимо выполнять расчеты в трехмерной постановке. Рассмотрим трехмерное моделирование процесса проходки и крепления узла сопряжения шахтного ствола с горизонтом. Участок ствола на глубине от 270 до 360 м, закрепленный чугунными тюбингами с бетоном. Вмещающие породы — каменная соль. Нагрузка на крепь непосредственно связанна с характером поведения вмещающих пород и технологией проходки выработки [9]. В данном случае предполагается параллельная схема проходки.

Исходные данные:

- Каменная соль: γ = 0,022 МН/м^3; E_0 = 10 000 МПа; υ_0 = 0,2; E_{50} = 75 МПа; υ_{50} = 0,49;
- Расчетное начальное поле напряжений массива на глубине 270 м: P_z = = 5,1 МПа; P_{xy} = 3,1 МПа.

Для расчетов выполним трехмерную модель объекта путем задания области размещения модели, начальных горно-геологических условий и начального напряженно-деформированного состояния массива. Начальное поле напряжений в массиве до начала проходки выработки обуславливает последующие нагрузки на крепь выработки. На рис. 4 приведены начальные главные вертикальные напряжения в массиве.

Далее моделируем стадии строительства: проходка и возведение крепи, в результате чего представляется возможным провести анализ изменений во времени напряженно-деформированного состояния массива и формирование нагрузок на возведенную крепь [10]. На рис. 5 приведены значения напряжений в тюбинговой крепи в процессе проходки.

Различные месторождения соляных пород обладают общими качественными закономерностями деформирования во времени. Дальнейшее увеличение нагрузок на крепь связано с присущей

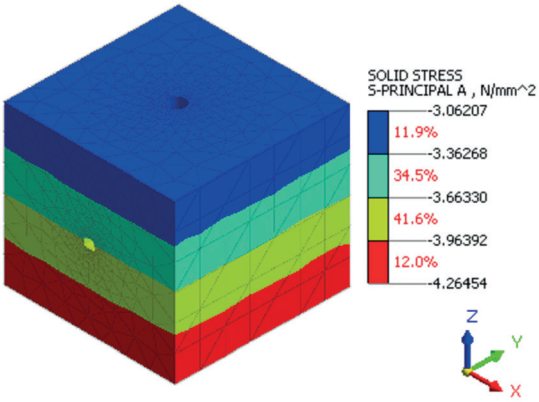

Рис. 4. Начальные главные вертикальные напряжения в массиве
Fig. 4. Initial principal vertical stresses in rock mass

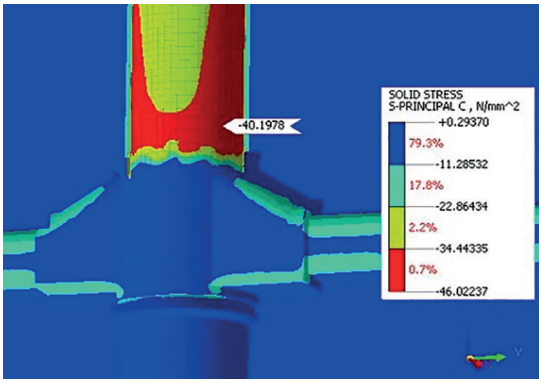

Рис. 5. Главные тангенциальные напряжения в тюбинговой крепи в процессе проходки
Fig. 5. Principal shear stresses in tubing support during sinking

каменной соли конвергенцией стенок выработок в течение продолжительного времени, о чем свидетельствуют экспериментальные исследования [11]. Для учета подобных деформаций пород [12, 13] воспользуемся теорией линейной наследственной ползучести с использованием метода переменных модулей [14]. Суть данного метода заключается в том, что вместо упругих постоянных используются временные функции E_t и υ_t.

Для определения характеристик линейной наследственной ползучести воспользуемся результатами лабораторных испытаний образцов соленосных пород [15, с. 31]. Параметры ползучести составят: α = 0,7; δ = 0,0688$c^{\alpha-1}$. С помощью уравнения ползучести [14] находим временные функции. На момент завершения срока эксплуатации выработки (50 лет) они составят: E_{50} = 75 МПа; υ_{50} = 0,48.

На рис. 6 приведены значения горизонтальных перемещений на стадии завершения срока службы выработки (50 лет). Максимальные перемещения породной стенки составляют до 245 мм. Средняя скорость горизонтальной конвергенции 4,9 мм/год (0,0134 мм/сут).

На рис. 7 приведены значения вертикальных перемещений на стадии завершения срока службы выработки (50 лет). Максимальные перемещения породной стенки составляют до 380 мм.

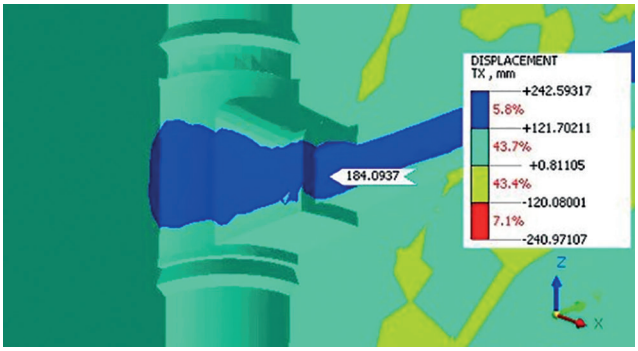

Рис. 6. Поле горизонтальных перемещений (нормальных к плоскости симметрии) в области узла сопряжения капитальных выработок
Fig. 6. Field of horizontal displacements (normally to the plane of symmetry) in the area of juncture of permanent openings

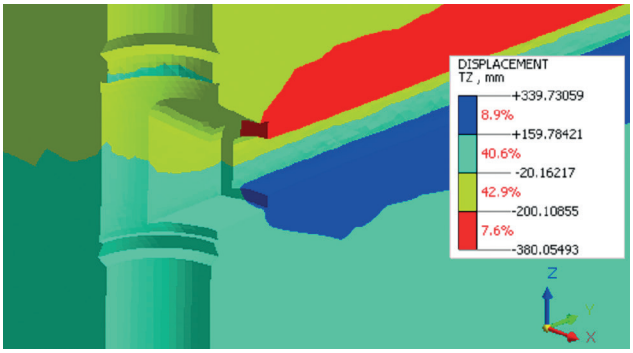

Рис. 7. Поле вертикальных перемещений в области узла сопряжения капитальных выработок
Fig. 7. Field of vertical displacements in the area of juncture of permanent openings

Средняя скорость вертикальной конвергенции 7,6 мм/год (0,0208 мм/сут).

Приведенные значения конвергенций по результатам моделирования хорошо согласуются с мониторинговыми наблюдениями за смещением приконтурных пород в породах соленосной толщи. Скорость установившейся пол-

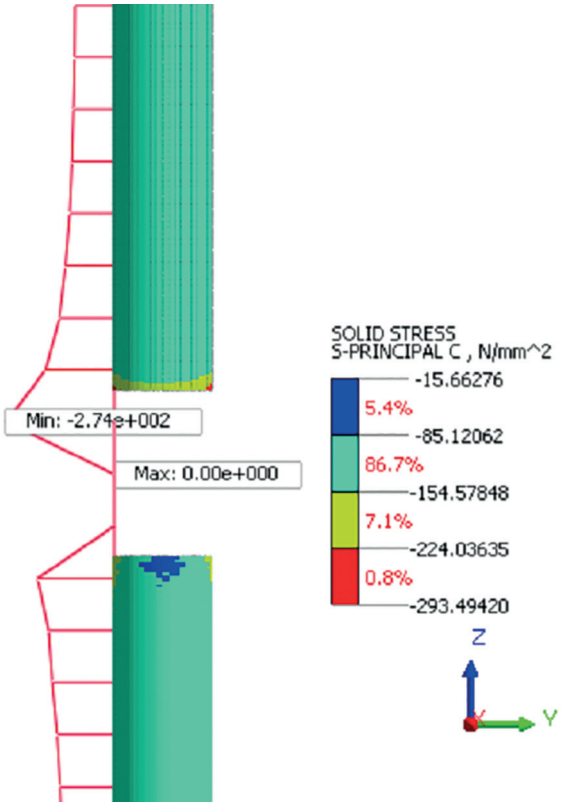

Рис. 8. Главные напряжения в тюбинговой крепи в области узла сопряжения капитальных выработок при T = 50 лет
Fig. 8. Principal stresses in tubing support at juncture of permanent openings at T=50 years

зучести солей для шахтных условий калийных и соляных рудников изменяется от 0,001 до 0,2 мм/сут. [16, с. 75 — 77].

Как видно из полученных значений, максимальные напряжения в тюбинговой крепи несколько превышают значения, полученные при двухмерном анализе. Это объясняется влиянием зоны раскрытия сопряжений (рис. 8). На расстоянии ~25 м вверх от сопряжения напряжения в тюбингах сопоставимы с результатами расчета в плоской постановке (табл. 1, рис. 1), т.е. влияние сопряжения распространяется до ~25 м. Наиболее неблагоприятным участком в стволе является крепь в непосредственной близости от верха сопряжения, что соответствует натурным наблюдениям [17, 18]. Особенность конструкции крепи сопряжения, в отличие от протяженной части ствола, предполагает наличие податливого слоя толщиной 400 мм между породной стенкой и крепью. Это приводит к дополнительному росту нагрузок на крепь ствола, но положительно сказывается на напряженно-деформированном состоянии крепи сопряжения к концу срока службы выработки.

В дальнейшем сооружение выработок околоствольного двора может привести к снижению нагрузок на крепь ствола за счет сдвижения соляных пород от ствола.

Непосредственно в сопряжении между бетоном и массивом предусмотрен податливый слой толщиной 400 мм из низкомодульного материала, обеспечивающий сохранность бетонной крепи сопряжения. Такое решение рекомендуют действующие нормативы. Так, за счет податливого слоя, напряжения в бетоне в зоне сопряжения не превышают расчетной прочности бетона, что говорит об эффективности его применения.

Заключение

В качестве заключения можно сделать следующие выводы.

Для решений задач расчета крепи протяженной части шахтного ствола в породах, склонных к ползучести, в равной мере приемлемы и аналитические, и численные методы. Если речь идет о расчете крепи сопряжений, то для полноценного анализа НДС крепи необходимо использование трехмерного моделирования.

При решении задач в плоской или пространственной постановках МКЭ необходимо учитывать начальное поле напряжений массива.

Решение задач расчета крепи в условиях вязкоупругого деформирования пород следует выполнять с помощью аналитических или численных методов, т.к. метод строительной механики, изложенный в СП91.13330.2012, не учитывает данные условия.

Возможности трехмерного моделирования процесса проходки сопряжений шахтного ствола позволяют устанавливать характер горного давления, соответствующий перераспределению полей напряжений в массиве согласно текущему этапу строительства, осуществлять прогноз смещений контура выработок, принимать решения по защите крепи на весь срок службы, выполнять анализ прочности крепи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Walton G., Kim E., Sinha S., Sturgis G., Berberick D.* Investigation of shaft stability and anisotropicdeformation in a deep shaft in Idaho, United States // International Journal of Rock Mechanics and Minings Sciences. 2018, vol. 105, pp. 160–171.

2. *Xiaoming Sun, Gan Li, Chengwei Zhao, Yangyang Liu, Chengyu Miao* Investigation of deep mine shaft stability in alternating hard and soft rock strata using three-dimensional numerical modeling // Processes. 2018, vol. 7, no 1. DOI: 10.3390/pr7010002.

3. *Cheng Y. M.*, *Wong H.*, *Leo C. J.*, *Lau C. K.* Stability of geotechnical structures. Teoretical and numerical analysis. Bentham Science Publishers, 2016. 395 p.

4. *Казикаев Д. М.*, *Сергеев С. В.* Диагностика и мониторинг напряженного состояния крепи вертикальных стволов. — М.: Изд-во «Горная книга», 2011. — 244 с.

5. *Казикаев Д. М.*, *Сергеев С. В.* Особенности деформирования крепи стволов и сопряжений в сложных горно-геологических условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — № 3. — С. 26–32.

6. *Булычев Н. С. Фотиева Н. Н. Стрельцов Е. В.* Проектирование и расчет крепи капитальных выработок. — М.: Недра, 1986. — 288 с.

7. *Булычев Н. С.* Механика подземных сооружений. — М.: Недра, 1994. — 278 с.

8. *Руководство* по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи. ВНИМИ, ВНИИОМШС Минуглепрома СССР. — М.: Стройиздат, 1983. — 272 с.

9. *Dias T. G. S., Farias M. M., Assis A. P.* Large diameter shafts for underground infrastructure // Tunnelling and Underground Space Technology. 2015, vol. 45, pp. 181–189.

10. *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. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-0-96-107.

11. *Токсаров В. Н.*, *Морозов И. А.*, *Бельтюков Н. Л.*, *Ударцев А. А.* Исследование деформирования подземных горных выработок в условиях Гремячинского месторождения калийных солей // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 7. — С. 113–124. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-113-124.

12. *Агеенко В. А.*, *Скворцов А. А.* Изучение реологических свойств каменной соли в условиях сверхдлительного одноосного нагружения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 11. — С. 27–34. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-27-34.

13. *Агеенко В. А.* Исследование реологических свойств каменной соли // Известия Уральского государственного горного университета. — 2019. — № 1(53). — С. 115—120.

14. *Амусин Б. З.*, *Линьков А. М.* Об использовании переменных модулей для решения одного класса задач линейной наследственной ползучести // Известия АН СССР. Механика твердого тела. — 1974. — № 6. — С. 162—166.

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

16. *Соловьев В. А., Аптуков В. Н., Ваулина И. Б.* Поддержание горных выработок в породах соленосной толщи: Теория и практика. — Новосибирск: Наука, 2017. — 264 с.

17. *Сергеев С. В.*, *Мишедченко А. Д.* Причины разрушения крепи стволов в соляных породах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2004. — № 11. — С. 215–217.

18. *Сергеев С. В.* Влияние проходки выработок сопряжения на напряженное состояние крепи ствола в раздробленном массиве околоствольных пород. — Тула, 1995. — С. 64—68. ГИАБ

REFERENCES

1. Walton G., Kim E., Sinha S., Sturgis G., Berberick D. Investigation of shaft stability and anisotropicdeformation in a deep shaft in Idaho, United States. *International Journal of Rock Mechanics and Minings Sciences*. 2018, vol. 105, pp. 160–171.

2. Xiaoming Sun, Gan Li, Chengwei Zhao, Yangyang Liu, Chengyu Miao Investigation of deep mine shaft stability in alternating hard and soft rock strata using three-dimensional numerical modeling. *Processes*. 2018, vol. 7, no 1. DOI: 10.3390/pr7010002.

3. Cheng Y. M., Wong H., Leo C. J., Lau C. K. *Stability of geotechnical structures. Teoretical and numerical analysis*. Bentham Science Publishers, 2016. 395 p.

4. Kazikaev D. M., Sergeev S. V. *Diagnostika i monitoring napryazhennogo sostoyaniya krepi vertikal'nykh stvolov* [Diagnostics and monitoring of the stress state of vertical shaft support], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2011, 244 p.

5. Kazikaev D. M., Sergeev S. V. Features of the deformation of the lining of shafts and junctions in difficult mining and geological conditions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2013, no. 3, pp. 26–32. [In Russ].

6. Bulychev N. S. Fotieva N. N. Strel'tsov E. V. *Proektirovanie i raschet krepi kapital'nykh vyrabotok* [Design and calculation of support for permanent workings], Moscow, Nedra, 1986, 288 p.

7. Bulychev N. S. *Mekhanika podzemnykh sooruzheniy* [Mechanics of underground constructions], Moscow, Nedra, 1994, 278 p.

8. *Rukovodstvo po proektirovaniyu podzemnykh gornykh vyrabotok i raschetu krepi.*VNIMI, VNIIOMSHS Minuglepromа SSSR [Guidelines for the design of underground mine workings and calculation of the support. VNIMI, VNIIOMShS of the USSR Ministry of Coal Industry], Moscow, Stroyizdat, 1983, 272 p.

9. Dias T. G. S., Farias M. M., Assis A. P. Large diameter shafts for underground infrastructure. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015, vol. 45, pp. 181–189.

10. Silchenko Yu. A., Pleshko M. S. Shaft lining design with regard to sinking technology. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 11, pp. 96–107. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-0-96-107.

11. Toksarov V. N., Morozov I. A., Beltyukov N. L., Udartsev A. A. Deformation of underground excavations under conditions of the Gremyachinsk potassium salt deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 7, pp. 113–124. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-113-124.

12. Ageenko V. A., Skvortsov A. A. Rheological properties of rock salt under super long-term sustained uniaxial loading. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 11, pp. 27–34. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-27-34.

13. Ageenko V. A. Investigation of rheological properties of rock salt. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2019, no. 1(53), pp. 115 — 120. [In Russ].

14. Amusin B. Z., Lin'kov A. M. On the use of variable modules for solving one class of problems of linear hereditary creep. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela*. 1974, no. 6, pp. 162 — 166. [In Russ].

15. Konstantinova S. A., Aptukov V. N. *Nekotorye zadachi mekhaniki deformirovaniya i razrusheniya solyanykh porod* [Some tasks of the mechanics of deformation and destruction of salt rocks], Novosibirsk, Nauka, 2013.

16. Solov'ev V. A., Aptukov V. N., Vaulina I. B. *Podderzhanie gornykh vyrabotok v porodakh solenosnoy tolshchi: Teoriya i praktika* [Maintenance of mine workings in the rocks of the salt-bearing strata: Theory and practice], Novosibirsk, Nauka, 2017, 264 p.

17. Sergeev S. V., Mishedchenko A. D. The reasons for the destruction of the lining of the shafts in salt rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2004, no. 11, pp. 215–217. [In Russ].

18. Sergeev S. V. *Vliyanie prokhodki vyrabotok sopryazheniya na napryazhennoe sostoyanie krepi stvola v razdroblennom massive okolostvol'nykh porod* [Influence of sink working of the conjugation workings on the stress state of the shaft lining in the crushed rock mass],Tula, 1995, pp. 64 — 68.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кириенко Юрий Анатольевич — аспирант, УИТ НИТУ «МИСиС»,
e-mail: 9267810740@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Y.A. Kirienko, Graduate Student, Information Technology Department, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia, e-mail: 9267810740@mail.ru

Получена редакцией 14.09.2020; получена после рецензии 30.11.2020; принята к печати 10.07.2021.
Received by the editors 14.09.2020; received after the review 30.11.2020; accepted for printing 10.07.2021.