

НЕКОТОРЫЕ МОДЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ПРОХОДКУ ШАХТНОГО СТВОЛА В МНОГОСЛОЙНОМ СОЛЯНОМ МАССИВЕ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ

Лопатин С. Н., Журавков М. А.

Белорусский государственный университет, Минск

Введение. Научно-техническое сопровождение процесса проходки шахтных стволов является актуальной и сложной задачей, т. к. Республика Беларусь на сегодняшний день занимает одно из лидирующих мест в мире по добыче калийных солей и экспорту калийных удобрений [1]. Масштабы освоения новых участков месторождений калийных солей увеличиваются с каждым годом, а горные работы ведутся во все более сложных условиях [1].

При проходке ствола необходимо рассматривать комплекс научно-исследовательских задач, связанных с изучением напряженно-деформированного состояния (НДС) горнотехнической системы «крепь ствола – вмещающий массив горных пород – околоствольные выработки». При моделировании проходки стволов следует учитывать множество факторов, таких как строение и структура вмещающего массива, тип околоствольных пород, наличие подземных водных источников в интервале проходки ствола, шаг (интервалы) проходки ствола и т. д. Одним из ключевых факторов при оценке прочности инженерной конструкции шахтного ствола является глубина, на которой находится рассматриваемый интервал породного массива. Вследствие этого, существует большая разница при построении модельных задач при проходке стволов на малых и больших глубинах.

Отдельные аспекты общей проблемы построения модельных задач для изучения НДС горнотехнической системы «крепь ствола – вмещающий массив горных пород – околоствольные выработки» применительно к условиям массивов соляных пород рассматривались в работах [2, 3]. Отметим, что весьма актуальной представляется проблема поиска и построения достоверных и адекватных относительно рассматриваемых условий критериев прочности массивов горных пород, что подчеркивается в работах многих исследователей (см., например, [4–9]). Дополнительно отметим, что математическое и компьютерное моделирование геотехнических систем является важной задачей современной геомеханики (см., например, [3, 10]).

Постановка задачи. В данной работе рассматривается моделирование процесса проходки шахтного ствола в многослойном массиве соляных пород на глубинах 1109–1135 м, а также исследуется состояние отдельных элементов геотехнической системы «крепь ствола – вмещающий массив горных пород». Диаметр ствола составляет 9 м. В работе представлены результаты исследований, связанные с оценкой нормальных смещений стенок шахтного ствола в направлении оси ствола. Максимально допустимое мгновенное нормальное смещение к оси ствола, согласно условию задачи, не должно превышать 5 мм. Кроме того, задачей моделирования является определение кратковременной прочности околоствольного массива горных пород. В качестве мер крепления массива предусмотрено использование анкерной крепи. Длина анкеров составляет 2 м. Проходка ствола выполняется поэтапно с шагом проходки, составляющим 5 м. Модельная схема решаемой задачи представлена на (рисунке 1). Физико-механические свойства горных пород, которые используются при выполнении модельных исследований, представлены в таблицах 1 и 2.

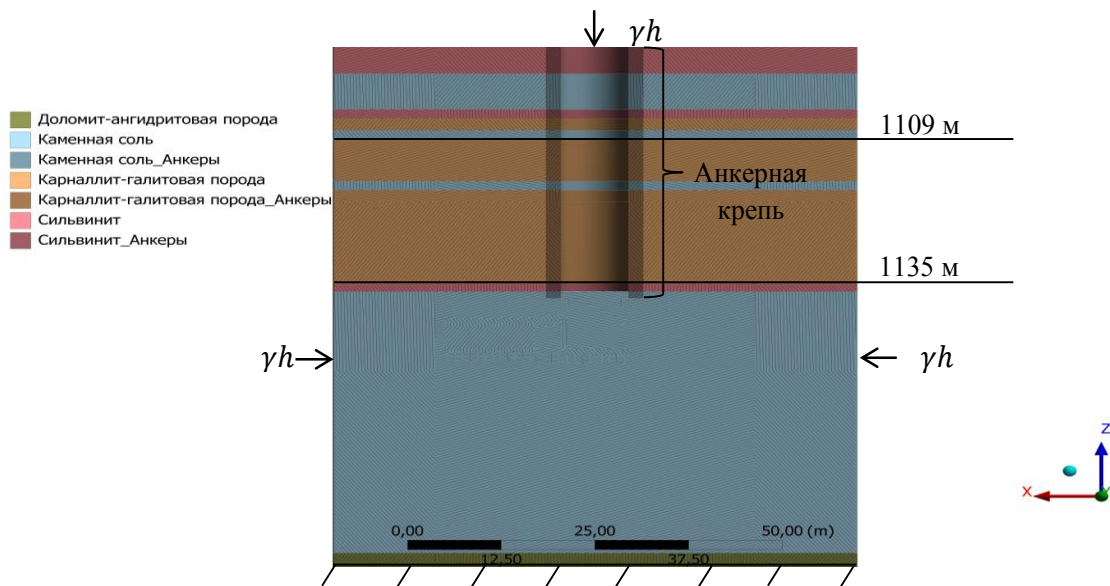


Рис. 1. Модельная схема решаемой задачи

Таблица 1 – Упругие свойства горных пород

| Название породы | Плотность, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ | Модуль упругости, МПа | Коэф. Пассона | Предел прочности на растяжение, МПа | Предел прочности на сжатие, МПа | Предел прочности на сжатие, МПа |
|----------------------------|---|-----------------------|---------------|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Сильвинит | 2052 | 19085 | 0,21 | 2 | 37,2 | 2,8 |
| Карналлит-галитовая порода | 2280 | 24976 | 0,24 | 1,3 | 20,2 | 1,7 |
| Каменная соль | 2179 | 22797 | 0,19 | 1,8 | 22,8 | 2,9 |

Таблица 2 – Другие физико-механические свойства горных пород

| Название породы | Угол внутреннего трения, град. | Структурное сцепление, КПа |
|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| Сильвинит | 70 | 6,1 |
| Карналлит-галитовая порода | 61 | 3,1 |
| Каменная соль | 60 | 3,8 |

Основные гипотезы. Перед тем, как переходить к описанию модельной задачи, рассмотрим основные гипотезы и допущения, используемые при решении задачи. Для начала дадим определение понятию «большая глубина». В данной работе под большой глубиной мы понимаем глубину, на которой отношение структурного сцепления к соб-

ственному весу горного массива меньше или равно единице ($\frac{c}{\gamma h} \leq 1$). Глубины, на которых $\frac{c}{\gamma h} > 1$, считаются, соответственно, малыми [10].

Горизонтальное давление в массивах горных пород на малых глубинах считается по следующей формуле [10]:

$$P = \lambda \rho g h, \quad (1)$$

где $\lambda = \nu/(1 - \nu)$ – коэффициент бокового распора, ρ – плотность массива, g – ускорение свободного падения, h – рассматриваемая глубина.

При моделировании проходки на больших глубинах существенная разница заключается в том, что принимается $\lambda = 1$. Таким образом, на больших глубинах величина бокового давления значительно выше, чем на малых, и равна собственному весу породы на рассматриваемой глубине (массив находится в состоянии равномерного трехосного сжатия).

В рассматриваемом случае принимается, что слои породного массива считаются линейными изотропными средами.

По условию задачи в качестве мер крепления предусмотрено использование анкерной крепи по периметру ствола. Согласно проведенным ранее исследованиям [10], анкерная крепь может моделироваться путем увеличения модуля упругости и предела прочности околоствольного массива на сжатие в зоне действия анкеров (2 м).

Модельная задача. В качестве метода решения модельной задачи выбран численный метод конечных элементов (МКЭ). Следует отметить, что, хотя данная задача допускает построение аналитического решения [10], получение такого решения является весьма трудоемким процессом, особенно в упругопластической постановке с учетом образования поверхностей текучести в массиве. Применение численных методов позволяет значительно сократить время на решение задачи и получить результат с достаточной степенью точности.

Задача решается в упругопластической постановке с использованием закона Гука для изотропного тела (2) и модели Кулона-Мора (3):

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})}{E}, & \varepsilon_{yy} &= \frac{\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})}{E}, \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})}{E}, \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{\sigma_{xy}}{G}, & \varepsilon_{xz} &= \frac{\sigma_{xz}}{G}, & \varepsilon_{yz} &= \frac{\sigma_{yz}}{G}, \end{aligned} \quad (2)$$

где ε_{ij} – компоненты тензора деформаций, σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, E – модуль упругости, ν – коэффициент Пуассона, G – модуль сдвига.

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}. \quad (3)$$

Здесь σ_1 и σ_3 – максимальное и минимальное главные напряжения соответственно, φ – угол внутреннего трения, C – структурное сцепление.

В качестве граничных условий задается нормальное внешнее давление величиной, соответствующей собственному весу вышележащих пород. Помимо этого к боковой границе модели прикладывается нормальное давление, рассчитываемое по формуле (1), с учетом того, что коэффициент бокового распора равен единице, поскольку на рас-

считываемом интервале $C \ll \gamma h$. Между слоями задается условие жесткого сцепления, поскольку взаимное скольжение слоев друг относительно друга не рассматривается. Кроме того, задача решается с учетом силы тяжести, что позволяет корректно учесть собственный вес массива (рисунок 1).

Несмотря на то, что по условию задачи требуется рассчитать прочность и оценить нормальные перемещения лишь в интервале 1109–1135 м, при моделировании рассматривался интервал 1095–1180 м. Таким образом, размеры модели составляют 85 м в высоту и 60 м в диаметре. Такой выбор размеров модели обусловлен тем, что это позволяет получить корректные поля распределений компонент НДС в массиве на всем интересующем нас интервале. В противном случае, если бы моделировался лишь интервал, обозначенный по условию задачи, граничные условия бы оказывали сильное влияние на компоненты НДС в массиве на границах модели, что, в свою очередь, негативно бы сказалось на точности решения поставленной задачи.

Задача решается последовательно с перестроением схем моделирования. На первом шаге рассчитывается начальное НДС нетронутого массива (до начала проходки). На данном шаге задача решается в полных напряжениях и полных перемещениях. Далее, НДС массива рассчитывается «пошагово» с учетом этапов проходки ствола. Под «этапом проходки» понимается пятиметровая проходка породной толщи с последующей установкой на пройденном интервале анкерной крепи. При этом задача решается в полных напряжениях и дополнительных перемещениях.

Результаты решения модельной задачи. На (рисунках 2–4) представлены некоторые результаты решения модельных задач.

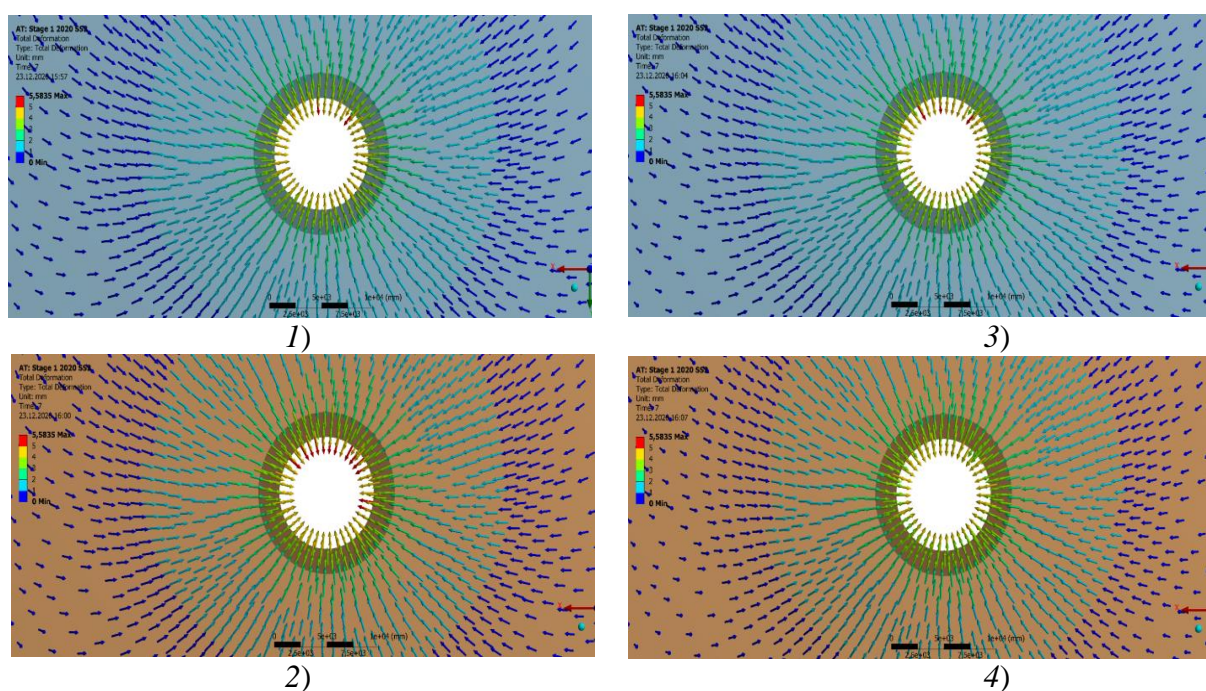


Рис. 2. Нормальные перемещения стенок ствола на различных глубинах: 1 – на глубине 1111,5 м в интервале залегания каменной соли, 2 – на глубине 1116 м в интервале залегания карналлит-галитовой породы, 3 – на глубине 1120 м в интервале залегания каменной соли, 4 – на глубине 1130 м в интервале залегания карналлит-галитовой породы

На (рисунке 2) приведены картины распределения нормальных перемещений некоторых слоев после проходки массива. На (рисунке 3) представлен график зависимо-

сти нормальных перемещений от глубины. (Рисунок 3) характеризует прочность массива по критерию максимально допустимых нормальных перемещений [10]:

$$u_n \leq u_{lim}. \quad (4)$$

На (рисунке 4) представлены оценки прочности околоствольного массива согласно трем классическим теориям прочности.



Рис. 3. График зависимости нормальных напряжений от глубины

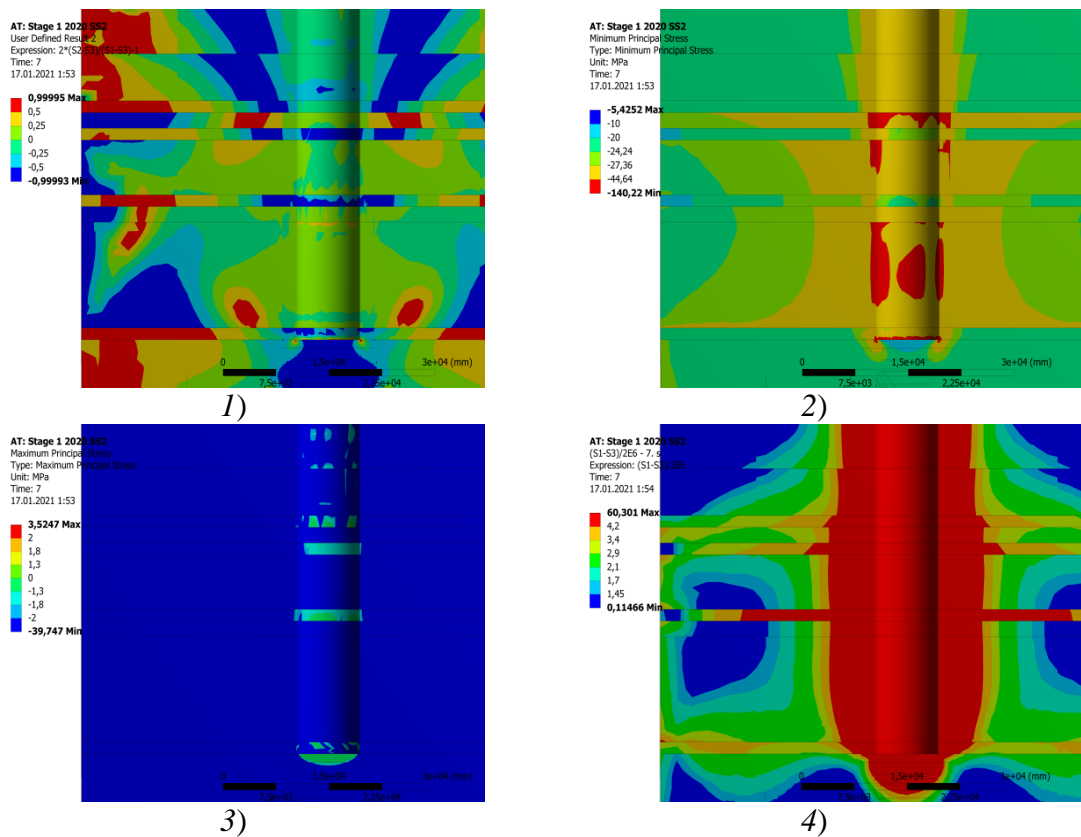


Рис. 4. Характеристики прочности массива по завершению всех этапов проходки: 1 – коэффициент Надаи-Лоде, 2 – по критерию сжимающих напряжений, 3 – по критерию растягивающих напряжений, 4 – по критерию сдвиговых напряжений

На (рисунке 4.1) представлено распределение коэффициента Надаи-Лоде в массиве, который позволяет определить тип НДС. Коэффициент Надаи-Лоде определяется следующей формулой:

$$\mu = \frac{2(\sigma_2 - \sigma_3)}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1. \quad (5)$$

Если значение коэффициента Надаи-Лоде $\mu \in [-1, -0.5]$, то имеет место состояние обобщенного растяжения (синие зоны на рисунке 4.1); если $\mu \in [0.5, 1]$, то имеет место обобщенное сжатие (красные зоны на рисунке 4.1); и, наконец, если $\mu \in [-0.5, 0.5]$, то имеет место обобщенный сдвиг (все остальные зоны на рисунке 4.1). После определение типа НДС производится оценка прочности массива по одному из следующих классических критериев, в зависимости от типа НДС в той или иной области околоствольного массива:

1. Критерий наибольших сжимающих напряжений [6]:

$$\begin{cases} |\sigma_3| \leq \sigma_c \\ \sigma_3 < 0 \end{cases}. \quad (6)$$

2. Критерий наибольших растягивающих напряжений [6]:

$$\begin{cases} |\sigma_1| \leq \sigma_t \\ \sigma_1 > 0 \end{cases}. \quad (7)$$

3. Критерий наибольших касательных напряжений [6]:

$$\begin{aligned} \tau_{max} &\leq \sigma_{shear}, \\ \tau_{max} &= \left| \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right|. \end{aligned} \quad (8)$$

Заключение.

Построены модельные задачи и выполнены исследования НДС горнотехнической системы «крепь ствола – вмещающий массив горных пород», связанные с процессом проходки шахтного ствола в многослойном массиве соляных пород на глубинах 1109–1135 м. По результатам моделирования можно сделать вывод о том, что, согласно критерию максимально допустимых нормальных перемещений, разрушение околоствольного массива не происходит (рисунок 3). Анализ картины распределения коэффициента Надаи-Лоде показывает, что в массиве имеет место состояние обобщенного растяжения в интервалах залегания каменной соли и обобщенного сдвига на других интервалах в пределах рассматриваемых глубин (рисунок 4.1). Оценка состояния массива по соответствующим критериям в напряжениях показывает наличие значительных зон разрушения на всех слоях рассматриваемого интервала глубин (рисунок 4.2–4.4). Данный факт дополнительно подтверждает необходимость оценки прочности по различным критериям.

Кроме того, можно сделать вывод о том, что классические теории прочности не всегда точно оценивают прочность массивов горных пород, особенно на больших глубинах. Для оценки прочности горных пород следует пользоваться специальными геомеханическими критериями в напряжениях, описанными, например, в работах [5, 9 и др.], либо критериями в перемещениях, если известна величина максимально до-

пустимых смещений или деформаций массива в конкретном случае. Стоит отметить, что данная величина существенным образом зависит от решаемой задачи и типа подземного сооружения [10]. Величина максимально допустимых нормальных перемещений зачастую определяется на основе инженерных методик.

***Благодарность.** Работа выполнена в рамках НИР кафедры теоретической и прикладной механики БГУ №756/21 «Разработать математические модели и методы решения новых классов краевых задач механики сплошных сред применительно к актуальным современным проблемам науки и техники», ГПНИ «Конвергенция», задание 1.8.01.1.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Промышленность Республики Беларусь, 2020. Статистический сборник. / Нац. стат. комитет Респ. Беларусь; редкол.: И. В. Медведева [и др.]. – Минск: Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2020. – 52 с.
2. Журавков М. А., Оценка зон нарушения сплошности и разрушения в окрестности выработанного пространства М. А. Журавков, С. С. Хвесеня, С. Н. Лопатин // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2019. – Т. 6, № 2. – С. 103–107.
3. Zhuravkov M. A., Durability analysis of underground structures based on various creep models of the enclosing salt rock massif / M. A. Zhuravkov, S. S. Hvesenya, S. N. Lapatsin // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 201. – 01007.
4. Konieczky H.. Failure criteria for rocks – an Introduction / H. Konieczky, M. A. Ismael. – Freiberg: Geotechnical Institute TU Bergakademie Freiberg, 2017. – 20 p.
5. Mehranpour, M. H Comparison of six major intact rock failure criteria using a particle flow approach under true-triaxial stress condition / M. H. Mehranpour, P.H.S. W.Kulatilake // Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources. – 2016. – № 2. – P. 203–229.
6. Gao, H. Discussion on strength criteria / H. Gao, Y. R. Zheng // Materials Research Innovations. – 2013. – Vol. 15. – P. 504-507.
7. Механика образования форм разрушения образцов горных пород при их сжати / Л. М. Васильев [и др.]; под ред. Л. М. Васильева. – Днепро: ИМА-пресс, 2018. – 176 с.
8. Норель, Б. К. Энергитические и временные критерии характеристики предельного состояния горных пород / Б. К. Норель, Ю. В. Петров, Н. С. Селютина. – Санкт-Петербург: СпБГУ, 2018. – 150 с.
9. Revuzhenko, A. F. Rock Failure Criteria Based on New Stress Tensor Invariants / A. F. Revuzhenko // Journal of Mining Science. – 2014. – Vol. 50, №3. – P. 437–442.
10. Компьютерное моделирование в геомеханике / М. А. Журавков [и др.]; под ред. М. А. Журавкова. – Мн.: БГУ, 2008. – 200 с.

Поступила: 26.02.2022