

## Математическое моделирование призабойной зоны ствола при совмещенной схеме проходки

Насонов А.А.<sup>1</sup>, Давыденко А.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Шахтинский автодорожный институт (филиал) ЮРГПУ (НПИ) им.  
М.И. Платова, г. Шахты

<sup>2</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
г. Москва

**Аннотация.** В статье приведены результаты моделирования крепи ствола в призабойной зоне при реализации совмещенной технологической схемы проходки. Сделан вывод о влиянии скорости набора прочности бетона и скорости проходки на несущую способность крепи.

**Ключевые слова:** ствол, проходка, крепь, бетон, напряжения, деформации, прочность, несущая способность

### 1. Постановка задачи

Принятая технологическая схема строительства вертикальной горной выработки влияет не только на экономические показатели горнопроходческих работ, но и на закономерности изменения напряжений в околоствольном массиве и крепи ствола, а также величины окончательного запаса несущей способности последней в эксплуатационный период [1-2].

Выполним анализ такого влияния на примере совмещенной технологической схемы строительства ствола с использованием крепи из монолитного бетона. Циклическая организация работ предполагает выполнение работ по возведению крепи отдельными кольцами высотой 4 м. непосредственно в забое ствола после уборки породы первой фазы. Для бетонирования применяется передвижная секционная опалубка и гибкие бетонопроводы. Прочность бетона возведённой заходки определяется составом бетона, а также временем его твердения в призабойной зоне:

$$T_n = t_1 + (n - 1) \cdot t_u, \quad (1)$$

где  $t_1$  – время набора прочности бетона заходки крепи до момента распалубки;

$n$  – количество заходов крепи в призабойной зоне ствола, включая рассматриваемую;

$t_{ц}$  – общая продолжительность работ проходческого цикла для совмещённой технологической схемы [3,4].

По мере набора прочности бетона изменяются его прочностные и деформационные характеристики. Наиболее точные значения прочности бетона в ранние сроки можно определить путем испытания образцов в возрасте 1 сут и 28 сут. В остальные временные периоды значения прочности бетона определяются по аналитической зависимости вида:

$$R_n = R_k + (R_{28} - R_k) \frac{\lg n - \lg k}{\lg 28 - \lg k}, \quad (2)$$

$R_k, R_{28}$  – прочность бетона на одноосное сжатие соответственно в возрасте 1 и 28 сут.

Для проведения полного анализа крепи в призабойной зоне, необходимо ее исследование в различных условиях. При проведении вычислительного эксперимента был определен перечень основных влияющих параметров: глубина и диаметр ствола, физико-механические характеристики горных пород, толщина и класс бетона крепи и уточнены интервалы их варьирования.

В качестве основного рассмотрен расчетный случай проходки ствола по совмещенной технологической схеме в массиве однородных скальных грунтов, не склонных к ползучести.

Для проведения исследований применен метод конечных элементов в пространственной постановке. Разработанная модель имела форму цилиндра, граничные условия задавались в виде ограничений перемещений граней в перпендикулярном к их плоскости направлениям, что является общепринятым подходом при решении подобных задач. Размер модели принят во всех направлениях более 10 диаметров ствола, что полностью

---

исключило влияние граничных условий на интересующую нас расчётную область призабойной зоны ствола [5-7].

Оценку запаса несущей способности колец монолитной бетонной крепи в призабойной зоне ствола на ранних сроках набора прочности бетона удобно выполнять, согласно условию:

$$\sigma_1 < R_n, \quad (3)$$

где  $\sigma_1$  – величина максимальных главных напряжений в конечных элементах соответствующего кольца бетонной крепи;

$R_n$  – прочность бетона кольца крепи в рассматриваемом возрасте  $n$  [8, 9].

Выражение (3) характеризует запас несущей способности крепи в конкретный момент реализации технологической схемы проходки, который существенно зависит от деформационных характеристик колец твердеющей бетонной крепи, обеспечивающих предварительную разгрузку околоствольного массива в период строительства. С целью изучения этого процесса в настоящем исследовании использован коэффициент податливости колец крепи в призабойной зоне ствола следующего вида:

$$\Delta\delta = \frac{u_L(p)_{мв.б}}{u_L(p)_{пр.б}}, \quad (4)$$

где  $u_L(p)_{мв.б}$  – суммарные радиальные перемещения внутреннего контура крепи из твердеющего бетона, реализованные в призабойной зоне ствола;

$u_L(p)_{пр.б}$  – аналогичные величины при моделировании крепи из бетона проектной прочности [10,11].

## 2. Анализ результатов математического моделирования

В результате расчета конечно-элементной модели призабойного участка ствола, пройденного по совмещенной технологической схеме, определены величины главных напряжений в конечных элементах колец крепи и

околоствольного массива, а также величины перемещений узлов модели. Расчеты выполнены для глубины расположения забоя ствола 500 м. и пород с модулем деформации  $E_0=10$  ГПа, коэффициентом Пуассона  $\nu_0=0,3$ .

На рисунке 1 приведен пример полученной в результате расчета зависимости коэффициента  $\Delta\delta$  от отношения  $E_7 / E_{28}$  (модули деформации бетона в возрасте 7 и 28 суток соответственно).

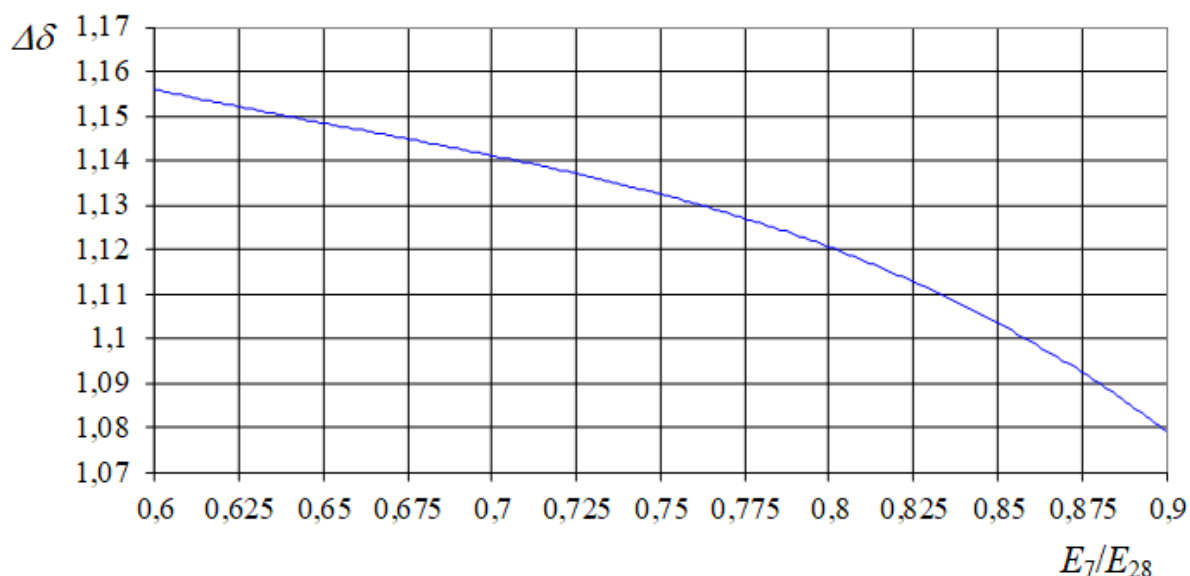


Рис. 1. График зависимости коэффициента податливости колец крепи от отношения  $E_7/E_{28}$

По результатам обработки данных установлено, что увеличение податливости колец крепи в призабойной зоне ствола оказывает положительное влияние на ее несущую способность, при этом наименьший запас прочности имеет кольцо бетонной крепи, возведенное в забое ствола в момент отрыва опалубки [12]. Далее прочность бетона и его несущая способность возрастают.

На рис. 2 приведена полученная по результатам математического моделирования зависимость  $\sigma_1(u_L)$  для колец бетонной крепи с различными деформационными характеристиками.

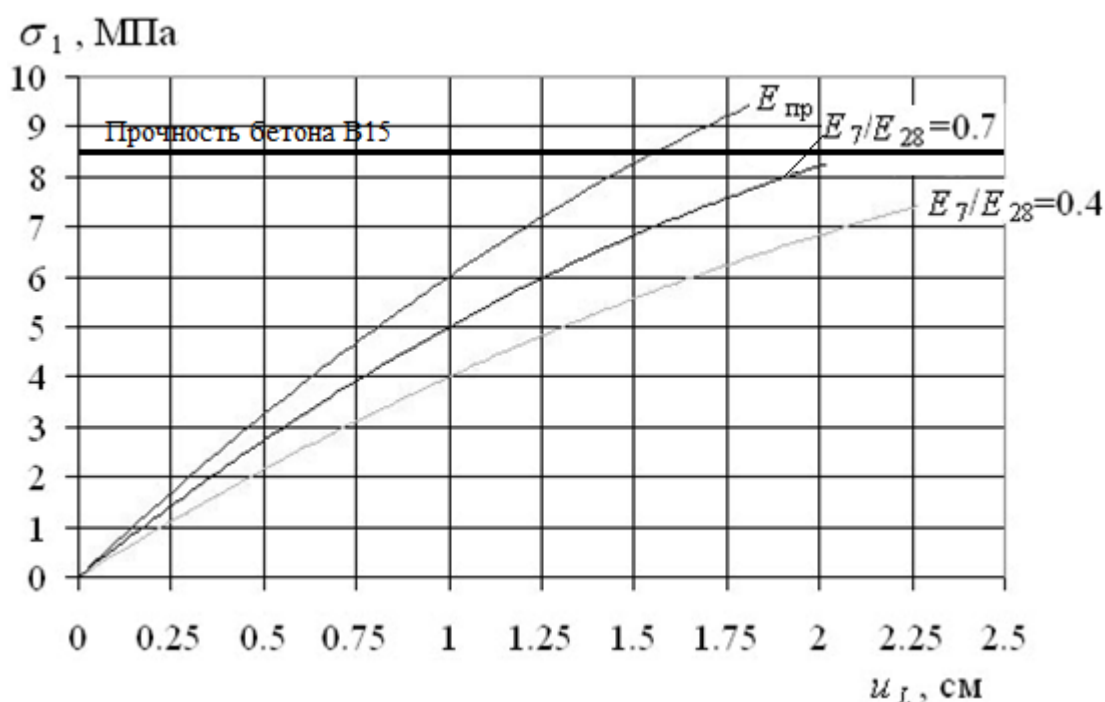


Рис. 2. График изменения НДС монолитной бетонной крепи в призабойной зоне ствола при различном сопротивлении бетона

Анализ графиков показывает, что при изготовлении колец крепи из бетона класса В15 жёсткая крепь проектной прочности не может быть применена. При применении монолитного бетона, постепенно набирающего прочность, запас несущей способности колец крепи изменяется в интервале 0,16 - 1,1 МПа в зависимости от деформационных характеристик материала крепи.

Таким образом, можно сделать важный вывод о том, что применение для возведения колец крепи ствола монолитного податливого бетона, обеспечивающего предварительную разгрузку околоствольного породного массива, позволяет увеличить запас несущей способности крепи при реализации совмещенной технологической схемы проходки.

Управлять процессом вступления монолитной бетонной крепи в работу в призабойной зоне ствола можно как с помощью специальных добавок – ускорителей схватывания, так и с помощью изменения скорости выполнения

проходческих процессов, т.е. путем изменения продолжительности проходческого цикла.

Так, на рис. 3 приведены эпюры изменения главных напряжений и набора прочности в семи кольцах бетонной крепи в призабойной зоне ствола при продолжительности проходческого цикла 18 и 30 часов для совмещенной технологической схемы проходки.

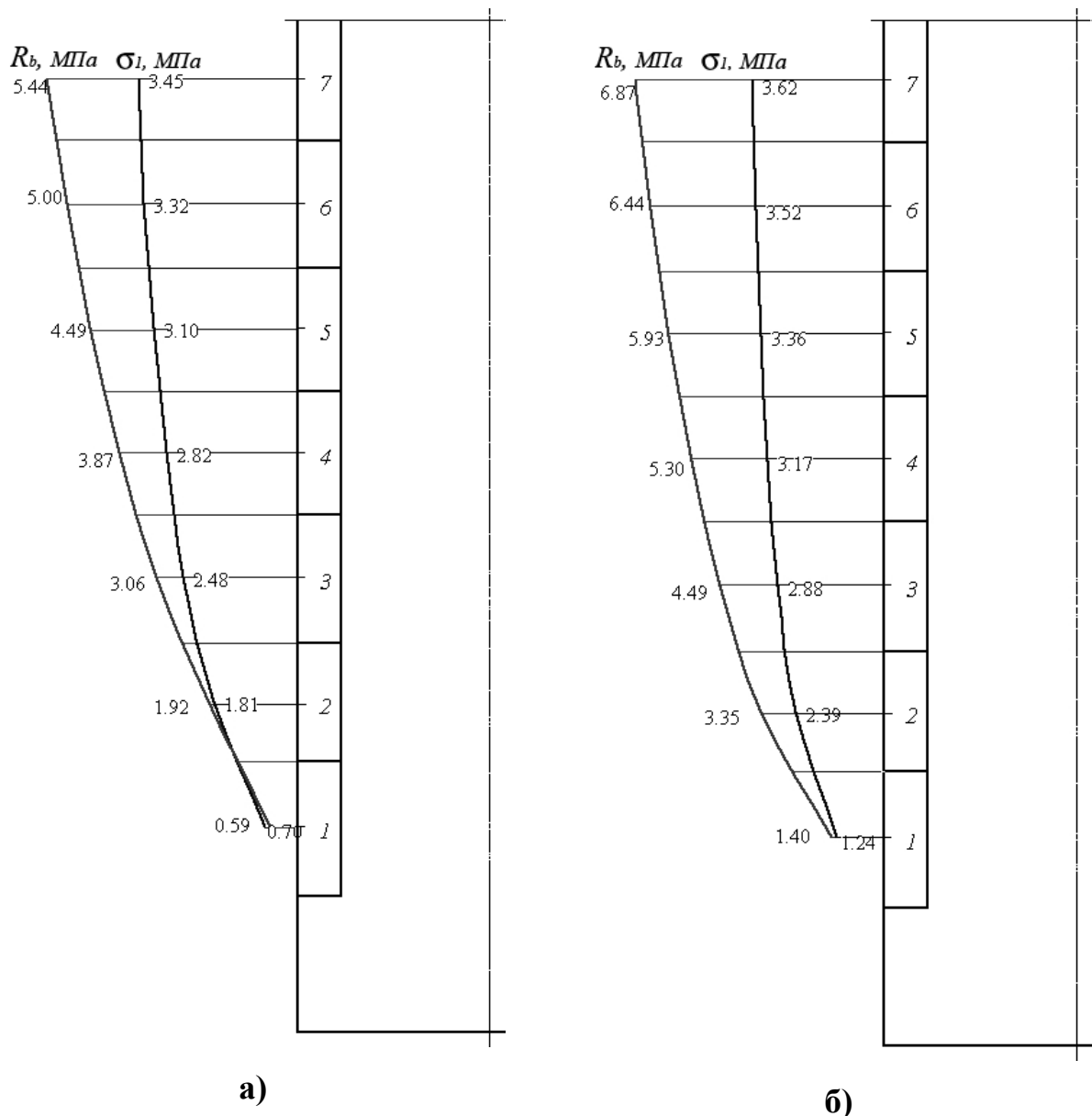


Рис. 3. Эпюры изменения главных напряжений и набора прочности в кольцах бетонной крепи при продолжительности проходческого цикла:

а) 18 ч; б) 30 ч

Из рис. 3 можно сделать вывод, что уменьшение продолжительности проходческого цикла приводит к увеличению податливости колец крепи и снижению уровня напряжений в них к моменту достижения статического равновесия в системе «крепь – массив». Вместе с тем, запас несущей способности колец крепи на стадии твердения бетона несколько ниже, чем при стандартной продолжительности цикла 30 часов, что нужно учитывать при обосновании окончательных параметров совмещенной технологической схемы производства работ.

### **3. Выводы**

На основании результатов математического моделирования можно сформулировать следующие подходы к повышению эффективности проходки стволов по совмещенной технологической схеме:

1. Для возведения монолитной бетонной крепи целесообразно применять податливые бетонные смеси с ускоренным набором прочности в первые 1 - 2 суток.

2. Целесообразно переходить на скоростную проходку ствола, характеризующуюся продолжительностью проходческого цикла 18 часов и менее, что позволит обеспечить как повышение экономических показателей строительства, так и более благоприятный режим работы колец крепи.

### **Литература**

1. Плешко М.С., Курнаков В.А. Анализ нормативной базы и научных исследований в области крепления вертикальных стволов. Направления их дальнейшего развития // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 4. С. 49-53.



2. Страданченко С.Г., Плешко М.С., Армейсков В.Н. О необходимости проведения комплексного мониторинга подземных объектов на различных стадиях жизненного цикла // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1994](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1994).

3. Вознесенский А.С., Кидима Мбомби Л.К. Формирование синтетических структур и текстур горных пород при их моделировании в среде Comsol Multiphysics // Горные науки и технологии. 2021. Т. 6. № 2. С. 65 - 72.

4. Shuxue, D., Hongwen, J., Kunfu, C., Guo'an, X., Bo, M. Stress evolution and support mechanism of a bolt anchored in a rock mass with a weak interlayer. International Journal of Mining Science and Technology. 2017, № 27. Pp 573-580.

5. Walton, G., Kim, E., Sinha, S., Sturgis, G., Berberick, D. Rock mechanics challenges for the excavation of a deep shaft in anisotropic ground. 2018. 52nd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 2-s2.0-85053456394.

6. Wichur, A., Frydrych, K., Kamiński, P. Static calculations of mine shaft linings in Poland (Selected problems). 2015 Vertical and Decline Shaft Sinking - Proceedings of the International Mining Forum 2015, pp. 105-114.

7. Wowra, D., Sanocki, T., Wojtaczka, M. Sinking of 1 bzie shaft in difficult hydrogeological conditions with the application of combined lining and high-performance concretes. 2015. Vertical and Decline Shaft Sinking - Proceedings of the International Mining Forum 2015, pp. 167-176.

8. Yu, Q., Yin, K., Ma, J., Shimada, H. Vertical Shaft Support Improvement Studies by Strata Grouting at Aquifer Zone. 2018. Advances in Civil Engineering, 2018, № 5365987.

9. Плешко М.С., Плешко М.В., Войнов И.В. Оценка технического состояния железнодорожных тоннелей с большим сроком эксплуатации //

---



Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 1. С. 34-40.

10. Jiang, H. Introduction of vertical mine shaft sinking by full section boring method in China. 2012. *Advanced Materials Research*, 446-449, pp. 3706-3709.

11. Judeel, Du, Keyter, G.T., Harte, G.J. Shaft sinking and lining design for a deep potash shaft in squeezing ground. 2012. *Harmonising Rock Engineering and the Environment - Proceedings of the 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics*, pp. 1697-1704.

12. Исаев А.С. Обоснование параметров технологических схем строительства шахтных стволов механизированными проходческими комплексами // Инженерный вестник Дона, 2021, №10. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7257](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7257).

### References

1. Pleshko M.S., Kurnakov V.A. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'* (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). 2011. № 4. Pp. 49-53.

2. Stradanchenko S.G., Pleshko M.S., Armejskov V.N. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2013. № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1994](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1994).

3. Voznesenskij A.S., Kidima Mbombi L.K. *Gornye nauki i tekhnologii*. 2021. T. 6. № 2. Pp. 65 - 72.

4. Shuxue, D., Hongwen, J., Kunfu, C., Guo'an, X., Bo, M. *International Journal of Mining Science and Technology*. № 27 (2017). Pp 573-580.

5. Walton, G., Kim, E., Sinha, S., Sturgis, G., Berberick, D. *Rock mechanics challenges for the excavation of a deep shaft in anisotropic ground*. 2018. 52nd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 2-s2.0-85053456394.

6. Wichur, A., Frydrych, K., Kamiński, P. Static calculations of mine shaft linings in Poland (Selected problems). 2015 Vertical and Decline Shaft Sinking. Proceedings of the International Mining Forum 2015, pp. 105-114.
7. Wowra, D., Sanocki, T., Wojtaczka, M. Sinking of 1 bzie shaft in difficult hydrogeological conditions with the application of combined lining and high-performance concretes. 2015 Vertical and Decline Shaft Sinking Proceedings of the International Mining Forum 2015, pp. 167-176.
8. Yu, Q., Yin, K., Ma, J., Shimada, H. Vertical Shaft Support Improvement Studies by Strata Grouting at Aquifer Zone. 2018. Advances in Civil Engineering, 2018, №5365987.
9. Pleshko M.S., Pleshko M.V., Vojnov I.V. Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya zheleznodorozhnyh tonnelej s bol'shim srokom ekspluatacii. 2018. № 1. Pp. 34-40.
10. Jiang, H. Introduction of vertical mine shaft sinking by full section boring method in China. 2012 Advanced Materials Research, 446-449, pp. 3706-3709.
11. Judeel, Du, Keyter, G.T., Harte, G.J. Shaft sinking and lining design for a deep potash shaft in squeezing ground. 2012. Harmonising Rock Engineering and the Environment - Proceedings of the 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics, pp. 1697-1704.
12. Isaev A.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. № 10. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7257](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7257).