

УДК 622.261: 622.363

**ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ БЕТОННОЙ КРЕПИ
ВЕРТИКАЛЬНОГО СТВОЛА НА СОПРЯЖЕНИИ
С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ ВЫРАБОТКАМИ**

В. В. Тарасов¹, В. Н. Аптуков^{1,2}, В. С. Пестрикова¹

¹АО “ВНИИ Галургии”, E-mail: Vladislav.Tarasov@uralkali.com,
ул. Сибирская, 94, 614000, г. Пермь, Россия

²Пермский государственный национальный исследовательский университет,
E-mail: Aptukov@psu.ru, ул. Букирева, 15, 614000, г. Пермь, Россия

Представлены результаты длительных натурных наблюдений и обследований состояния бетонной крепи воздухоподающего ствола № 3 рудника ПАО “Уралкалий”, в ходе которых выявлены основные причины разрушения крепи в районе сопряжений ствола с горизонтальными выработками, а также в районе залегания слабоустойчивых пород. Проведено численное моделирование процессов ползучести породного массива и развития зон разрушений крепи ствола на сопряжении с различными выработками в осесимметричной и объемной постановках. Показано удовлетворительное соответствие расчетных данных с результатами обследований, что свидетельствует об актуальности применения методов математического моделирования для оценки процессов деформирования и разрушения бетонной крепи ствола при проектировании и эксплуатации. Выполнен прогноз развития зон разрушений в бетонной крепи ствола № 3 на ближайшие 10 лет.

Шахтный ствол, слабоустойчивые породы, натурные наблюдения, бетонная крепь, трещины, ползучесть соляных пород, сопряжение, математическое моделирование

DOI: 10.15372/FTPRPI20200507

В условиях Верхнекамского месторождения калийных солей большинство шахтных стволов, согласно проектам проходки, закреплены в интервале соляной части разреза монолитной бетонной крепью толщиной порядка 500 мм. Известно, что устойчивость крепи шахтного ствола определяется свойствами породного массива, типом крепи, глубиной ствола и рядом других факторов. Выбранная крепь должна соответствовать конкретным горно-геологическим условиям, в которых она будет эксплуатироваться [1].

Практика эксплуатации шахтных стволов показывает, что деформации и разрушения бетонной крепи стволов в условиях соляных и калийных рудников происходят в результате воздействия двух факторов:

- физико-механический фактор, возникающий вследствие действия на крепь ствола горного давления соляных пород, склонных к проявлению длительных деформаций ползучести;
- химический фактор, вызванный коррозионным разрушением структуры бетона из-за влияния на крепь ствола рассолов различного генезиса.

При длительной эксплуатации горных выработок и шахтных стволов в соляных породах (галит, сильвинит, карналлит) под действием значительных нагрузок породный массив переходит в неупругое состояние, проявляя свойства ползучести [2–5]. Вязкоупругое поведение соляного массива под действием горного давления обуславливает появление различных видов нарушений в бетонной крепи эксплуатируемых шахтных стволов в районе сопряжений с горизонтальными выработками [6, 7]. Примером таких разрушений является воздухоподающий ствол № 3 рудника ПАО “Уралкалий”.

Наряду с инженерными оценками прочности стволов и натурными наблюдениями (мониторингом) в настоящее время широко применяются методы математического моделирования для прогнозирования деформирования и потери устойчивости различных горнотехнических сооружений в соляных породах [8–10].

ШАХТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Воздухоподающий ствол № 3 рудника ПАО “Уралкалий” диаметром в свету 7 м пройден на глубину 428 м и его строительство закончено в 1979 г. Шахтный ствол в соляных породах закреплен бетонной крепью толщиной 500 мм.

В интервале бетонной крепи ствол имеет четыре сопряжения. На глубине 337 м одностороннее сопряжение на пласте АБ (на восток), на глубине 346 м также одностороннее сопряжение с вентиляционным горизонтом пласта Кр-II (по южной стенке ствола). На транспортном горизонте (глубина 398 м) пройдено двухстороннее сопряжение в направлении север–юг, предназначенное для спуска–подъема крупногабаритных грузов, высота “окна” сопряжения по южной стенке ствола — 8.5 м. Четвертое сопряжение на глубине 423.8 м предназначено для зумпфowego водоотлива.

Первые проявления горизонтальных трещин и разрушений в виде выкрашивания швов бетонирования в пределах глубин 305–390 м отмечены еще в 1990–1991 гг., что в какой-то мере можно увязать с переводом ствола из режима вентиляционного в режим воздухоподающего. Горизонтальные трещины иногда охватывают полный периметр крепи ствола. В период с 2003 по 2005 г. формирование горизонтальных трещин по всему интервалу бетонной крепи ствола достигло окончательной фазы распространения и остается практически неизменным до настоящего времени. Появились трещины наклонного направления, особенно в интервалах карналлитовых пород и над сопряжением ствола с околоствольными выработками. Обнаружились выкрашивания бетона на глубину 150–250 мм, а в отдельных случаях на полную толщину бетонной крепи (до породной стенки), например над сопряжением с рабочим горизонтом.

Деформации бетонной крепи повлекли за собой смещения горизонтальных балок расстрелов и закрепленных на них направляющих проводников для движения подъемных сосудов. К 2000 г. деформации конструкций жесткой армировки достигли значений, требующих проведения мероприятий, исключающих уменьшение технологического зазора между движущимся подъемным сосудом (клетью) и расстрелами и недопустимое сужение “колеи” между лобовыми плоскостями проводников. Основным видом разрушения бетонной крепи ствола стали горизонтальные трещины, выкрашивания бетона на глубину до 100 мм, распространенные практически равномерно от тюбинговой крепи до сопряжения ствола с соляным горизонтом. Также подверглись разрушению швы бетонирования. В отдельных случаях трещины имеют вертикальную или субвертикальную ориентацию. Значительные разрушения бетонной крепи с вывалами бетона наблюдаются в районе сопряжения ствола с рабочим горизонтом и в зумпфовой части ствола.

В 2018 г. в результате очередного обследования зафиксированы многочисленные нарушения бетонной крепи ствола. Особо следует отметить интервал глубин 378–386 м по южной и северной стенке ствола. Указанный интервал находится над сопряжениями ствола с транспортным горизонтом. Здесь выявлены значительные нарушения бетонной крепи в виде серии вертикальных трещин с раскрытием до 20 мм (по юго-западной стенке ствола), выкрашивание бетона на глубине 384 м по западной стенке ствола.

Ниже этого интервала, в районе сопряжения ствола с выработками транспортного горизонта, наблюдаются многочисленные заколы на бетонной крепи, которые с северной и южной сторон ствола закреплены анкерами. На сопряжении с южной стороны ствола отмечается тенденция к увеличению деформации балок расстрелов и расслоение породного массива совместно с бетонной крепью выше сопряжения. На основании визуального обследования можно сделать вывод об интенсификации процессов деформирования бетонной крепи воздухоподающего ствола № 3 в зоне соляных пород.

Наиболее активное развитие получили процессы деформирования крепи ствола в интервале глубин 305–314 м (в районе залегания карналлита), 340–346 м (район сопряжения ствола с пластом Кр-II) и 378–386 м (район сопряжения ствола с транспортным горизонтом), которые требуют более детального обследования.

ОЦЕНКА НАРУШЕНИЙ СПЛОШНОСТИ КРЕПИ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Приведем результаты математического моделирования по оценке влияния различных негативных факторов на деформирование и возможное разрушение бетонной крепи ствола с течением времени. Материал бетона принимался упругопластическим, с модулем упругости, учитывающим старение [11]. Породный соляной массив описывался моделью вязкоупругого материала с учетом пластического упрочнения. Моделирование влияния действия различных породных пластов на цилиндрическую часть бетонной крепи ствола осуществлялось в осесимметричной постановке. Детальная математическая постановка задачи, решение которой выполнено с использованием пакета ANSYS, приведена в [12]. Верификация расчетной модели проведена на основе натурных измерений временной зависимости конвергенции бетонной крепи ствола № 3 рудника ПАО “Уралкалий” [13].

Поле радиальных перемещений в настоящий момент времени представлено на рис. 1. В расчетах учитывается горное давление и собственный вес пород, реальная геометрия и физико-механические свойства, сопряжения подходящих выработок. Отмечена неравномерная горизонтальная конвергенция бетонной крепи ствола по высоте. В местах контакта со слабыми породными пластами (глина, карналлит), а также в местах сопряжения выработок наблюдаются увеличенные значения конвергенции. Это приводит к неравномерному полю напряжений в бетонной крепи, появлению зон концентрации напряжений и в конечном счете к разрушению [14, 15].

На рис. 2 показаны временные зависимости радиальных перемещений точек внутренней поверхности бетонной крепи (сплошная линия — на контакте с пластом маркирующей глины, $H=377$ м; пунктирная — на контакте с пластом карналлита Е, $H=309$ м; квадратик — на контакте с каменной солью ниже пласта маркирующей глины, $H=380$ м; ромбик — на контакте с КС ниже карналлитового пласта Е, $H=315$ м; кружок — на контакте с пластом Кр-II, $H=345$ м; треугольник — на контакте с пластом АБ, $H=335$ м). Вертикальной пунктирной линией отмечено настоящее время ($T=37$ лет).

Кроме ослабленных пластов, даже в областях контакта цилиндрической части бетонной крепи с каменной солью с течением времени в результате ползучести возникают напряжения, достаточные для ее разрушения. Как показывают расчеты, окружные напряжения в бетонной

крепи ствола достигают 15–17 МПа (на контакте с каменной солью) и 20–21 МПа на контакте с пластами маркирующей глины и карналлита. Время появления трещин вблизи слабых пластов составляет 3–5 лет после установки бетонной крепи.

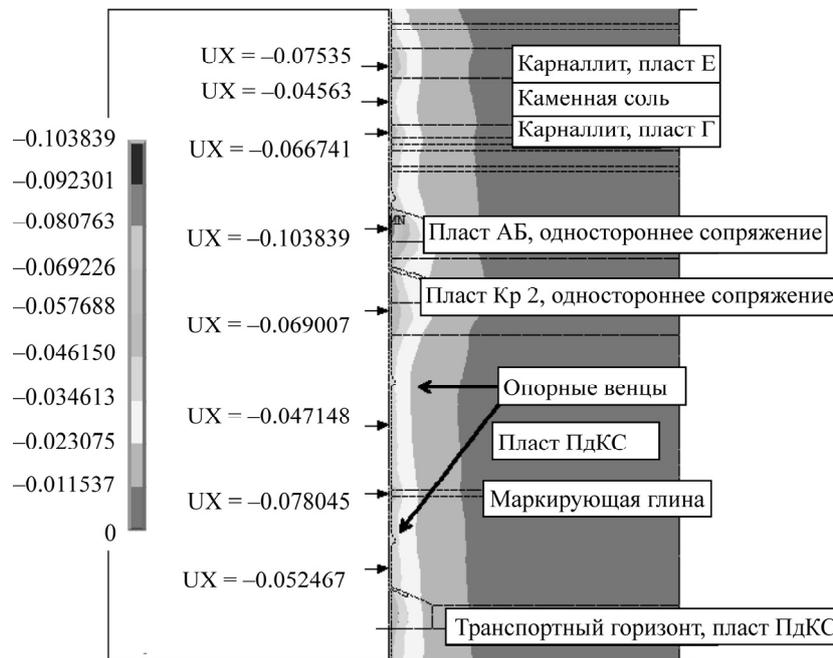


Рис. 1. Поле радиальных перемещений (м), достигнутых к настоящему времени ($T=37$ лет)

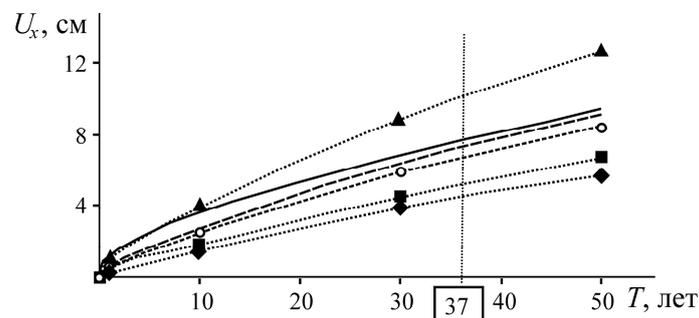


Рис. 2. Временные зависимости радиального перемещения бетонной крепи

Таким образом, становятся понятными причины появления горизонтальных трещин, расположенных по периметру внутренней поверхности ствола вблизи слоя маркирующей глины, пласта карналлита Е и тонких пластов карналлита в зоне пласта Г. Эти трещины, образующиеся от действия максимальных касательных напряжений в плоскости $r\theta$, а именно $\tau_{r\theta}^{\max} = (\sigma_{\theta} - \sigma_r) / 2 = 0.5\sigma_{\theta}$, на внутренней поверхности крепи выглядят как горизонтальные, потому что первоначально формируются в некоторой узкой области по высоте ствола. При образовании трещин в результате скачка перемещений возникает разгрузка напряжений в близлежащих областях бетонной крепи.

Использование более прочных марок бетона (или увеличение толщины бетонной крепи) не спасает от появления подобных трещин. Наиболее эффективным способом борьбы с этим типом разрушения является применение податливого слоя определенной толщины, расположенного между бетонной крепью и породным массивом [1, 13].

Следующие характерные разрушения наблюдаются вблизи сопряжения ствола с горизонтальными выработками. Для оценки и анализа причин появления таких зон необходимо использовать 3D-моделирование.

Рассмотрены три варианта сопряжения в 3D-постановке: два сопряжения транспортной выработки (южное и северное) и одно сопряжение с выработкой по пласту Кр-II. Предполагалось, что сопряжение имеет две вертикальные плоскости симметрии: вдоль и поперек подходящих выработок – это значительно упрощает пространственную модель, позволяя рассмотреть только одну четверть полного объема сопряжения.

Численно получены временные зависимости конвергенции: вертикальной в бетонной крепи выработки вблизи сопряжения; горизонтальной в бетонной крепи ствола в направлении, перпендикулярном направлению выработки. Показано значительное различие конвергенции разных сопряжений, коррелирующее с размерами зон разрушения в окрестности сопряжений. Установлено, что конвергенция будет увеличиваться от 30 мм (пласт Кр-II) до 50 мм (транспортная выработка, пласт КС) в течение ближайших 10 лет.

На рис. 3 поля коэффициента запаса прочности, значение которого менее единицы (темный тон), показывают зоны разрушений в бетоне для южного сопряжения выработки по пласту Кр-II, вычисленные по деформационному критерию прочности [12]. Если в настоящий момент времени разрушения в бетонной крепи практически отсутствуют (это подтверждается мониторингом), то в течение ближайших 10 лет появятся зоны трещин в бетонной крепи (вверх и вниз от сопряжения, до одного диаметра ствола), требующие ремонта.

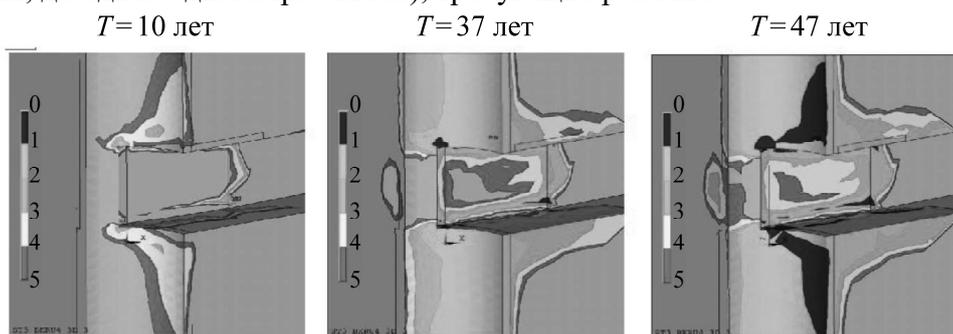


Рис. 3. Поле параметра коэффициента запаса прочности

Для северного сопряжения транспортной выработки зоны разрушения в бетоне, возникшие в результате развития конвергенции пород, будут распространяться выше и ниже сопряжения на 1.0 – 1.5 диаметра ствола.

ВЫВОДЫ

Результаты длительных мониторинговых наблюдений за состоянием крепи вертикального ствола показали, что на глубине свыше 300 м соляной массив переходит в неупругое состояние, проявляя свойства ползучести. Это обуславливает появление различных видов нарушений и смещений стенок бетонной крепи эксплуатируемых шахтных стволов в районе сопряжений с горизонтальными выработками. Смещение стенок бетонной крепи приводит к искривлению ярусов армировки и недопустимому сокращению технологических зазоров между подъемными сосудами и элементами жесткой армировки.

На основе численного моделирования сопряжений ствола в 2D- и 3D-постановке определены временные зависимости вертикальной конвергенции в бетонной крепи выработки вблизи сопряжения и горизонтальной — в бетонной крепи ствола в направлении, перпендикулярном выработке. Выявлено значительное различие конвергенции разных сопряжений, что коррели-

рует с размерами зон разрушения в их окрестности. Прогнозируется, что конвергенция будет увеличиваться от 30 мм (пласт Кр-II) до 50 мм (транспортная выработка, пласт КС) в течение ближайших 10 лет. Использование более прочных марок бетона не предотвращает появление подобных трещин. Наиболее эффективный способ борьбы с этим типом разрушения — применение податливого слоя определенной толщины, расположенного между бетонной крепью и породным массивом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ольховиков Ю. П.** Крепь капитальных выработок калийных и соляных рудников. — М.: Недра, 1984. — 238 с.
2. **Проскуряков Н. М., Пермяков Р. С., Черников А. К.** Физико-механические свойства соляных пород. — Л.: Недра, 1973. — 271 с.
3. **Барях А. А., Константинова С. А., Асанов В. А.** Деформирование соляных пород. — Екатеринбург: УрО РАН, 1996. — 203 с.
4. **Методическое руководство** по ведению горных работ на рудниках ОАО “Сильвинит” / ОАО “Галургия”. — Новосибирск: Наука, 2011. — 487 с.
5. **Пестренин В. М., Пестренина И. В.** Нелинейная наследственная модель соляных пород с начальным напряженным состоянием // ФТПРПИ. — 2010. — № 1. — С. 25–32.
6. **Аптуков В. Н., Тарасов В. В.** Оценка влияния негативных факторов на ослабление бетонной крепи шахтных стволов в соляных породах // Изв. вузов. Горн. журн. — 2015. — № 1. — С. 47–52.
7. **Elnabolsy K.** Shaft construction methods comparison, NASTT, 2015, TM1-T5-05.
8. **Wang L., Berest P., Brouard B.** Mechanical behavior of salt caverns: closed-form solutions vs numerical computations, Rock Mech. and Rock Eng., 2015, Vol. 48, No. 6. — P. 2369–2382.
9. **Протосеня А. Г., Нгуен Н. Б.** Прогноз напряженного состояния массива на участке сопряжения ствола и горизонтальной выработки // Изв. вузов. Горн. журн. — 2015. — № 7. — С. 50–55.
10. **Боликов В. Е., Константинова С. А.** Прогноз и обеспечение устойчивости капитальных горных выработок. — Екатеринбург: УрО РАН, 2003. — 374 с.
11. **СНиП 52-01-2003.** Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция. — М., 2012. — 31 с.
12. **Аптуков В. Н., Волегов С. В.** Моделирование процесса формирования остаточных напряжений и поврежденности в образцах соляных пород, полученных из керна // ФТПРПИ. — 2020. — № 3. — С. 3–11.
13. **Соловьев В. А., Аптуков В. Н., Котляр Е. К.** Геомеханические и технологические аспекты совершенствования конструкции шахтных стволов в соляных породах // Горн. журн. — 2015. — № 11. — С. 24–28.
14. **Du Judeel G., Keyter and Harte.** Shaft sinking and lining design for a deep potash shaft in squeezing ground, Shaft Design and Construction, 2012, № 1 (1). — P. 51–54.
15. **Renani H.R., Martin C.D., Hadson R.** Back analysis of rock mass displacements around a deep shaft using two- and three-dimensional continuum modeling, Rock Mech. and Rock Eng., 2016, Vol. 49, No. 4. — P. 1313–1327.

Поступила в редакцию 15/VII 2020

После доработки 29/VII 2020

Принята к публикации 11/IX 2020