

УДК 622.0223:539.374

**О ВИДАХ КРЕПИ СОПРЯЖЕНИЙ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ  
И ПРИСТВОЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК В СОЛЯНЫХ ПОРОДАХ**

**Д. Н. Алыменко<sup>1</sup>, В. А. Соловьев<sup>1,2</sup>, В. Н. Аптуков<sup>1,3</sup>, Е. К. Котляр<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>АО “Галургия”, E-mail: vniig@uralkali.com, ул. Сибирская, 94, 614002, г. Пермь, Россия

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Комсомольский проспект, 29, 614990, г. Пермь, Россия

<sup>3</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
ул. Букирева, 15, 614990, г. Пермь, Россия

<sup>4</sup>ПАО “Уралкалий”, ул. Пятилетки, 63, 618426, г. Березники, Россия

Рассмотрены варианты поддержания сопряжений шахтных стволов и приствольных выработок в соляных породах на основе применения монолитной бетонной крепи, бетонной крепи с податливым слоем и облегченных видов крепи. Показано, что традиционная жесткая бетонная крепь требует периодического капитального ремонта с частотой 5–10 лет в течение времени эксплуатации. Причем увеличение ее толщины не приводит к безремонтной эксплуатации. Подтверждена целесообразность применения при строительстве сопряжений с шахтными стволами облегченных видов крепи — анкерной и/или рамной с податливыми элементами. Выводы основаны на результатах инструментальных наблюдений за состоянием приконтурных пород и математического моделирования процессов развития напряженно-деформированного состояния и зон поврежденности породного массива во времени с использованием программного комплекса ANSYS.

*Соляные породы, сопряжения шахтных стволов, податливая крепь, математическое моделирование*

DOI: 10.15372/FTPRPI20180106

Соляные породы под действием горного давления испытывают необратимые деформации без видимого разрушения [1, 2]. Понимание такого поведения соляного массива является общепринятым, однако при проектировании шахтных стволов на Верхнекамском месторождении калийных и калийно-магниевых солей (ВКМКС) в 1960–1970 гг. и на рудниках “Интернациональный”, “Мир” для соляной части толщи была выбрана жесткая крепь из монолитного бетона или из чугунных тубингов. Более того, бетонная крепь примыкающих к стволу сопряжений выполнялась как одно целое с вертикальной кольцевой крепью стволов.

Как показала в дальнейшем практика, принятие подобных проектных решений оказалось весьма неэффективным, так как бетонная крепь не способна долгое время сдерживать нагрузку от постоянно деформирующегося соляного массива. Спустя некоторое время после ввода шахтных стволов в эксплуатацию вследствие деформации ползучести вмещающих соляных пород под действием горного давления развились процессы трещинообразования и разрушения элементов конструкции бетонной крепи вертикальных стволов и их сопряжений.

## ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ БЕТОННОЙ КРЕПИ И СОЛЯНОГО МАССИВА

Расчет напряженно-деформированного состояния бетонной крепи (при наличии или отсутствии податливого слоя) и соляного массива при их взаимодействии с учетом ползучести породы под действием горного давления является сложной задачей.

Применяемые инженерные методики для таких расчетов используют заданный заранее уровень давления на бетонную крепь со стороны породного массива. По существу, в приближении теории пластин и оболочек отдельно оценивается только напряженно-деформированное состояние и прочность бетонной крепи. Такая постановка задачи не соответствует реальной ситуации, поскольку давление на бетонную крепь зависит от времени и жесткости самой крепи, т. е. определяется в ходе решения контактной задачи. Меняя размеры, форму и/или механические характеристики крепи, получим разное силовое воздействие со стороны соляных пород. Дополнительная сложность состоит в том, что давление на контакте меняется во времени и неравномерно распределено по контуру бетонной крепи.

Известны расчетные подходы, основанные на численном решении двумерной геомеханической задачи, рассматривающие взаимодействие крепи и породного массива, но не учитывающие рост деформаций ползучести в правильной постановке. В этих подходах прямое моделирование эффектов ползучести заменяется решением серии упругопластических задач с падающим модулем упругости [3], что не соответствует действительности. Модуль упругости при таком подходе уменьшается в определенной части (или во всей) расчетной области, тогда как скорость роста деформаций ползучести зависит как от времени (или уровня достигнутых деформаций), так и от уровня напряжений в расчетной ячейке, т. е. в значительной степени неоднородна по сечению.

Известна феноменологическая теория деформирования породного массива, основанная на действии веса пород кровли с решением обратных задач на основе натурных измерений смещений пород кровли [4], которая не позволяет проводить расчеты для вновь проектируемых горных выработок. Далее будут использоваться численные методы исследования напряженно-деформированного состояния системы — бетонная крепь с возможным применением податливого слоя (ПС) и соляной массив — с учетом упругопластических эффектов, деформаций ползучести и роста поврежденных областей породного массива.

В силу наличия вертикальной плоскости симметрии, рассматривалась половина выработки, общие размеры прямоугольной (за исключением выработки) расчетной области 50 м по горизонтали и 100 м по вертикали. Граничные условия по вертикальным границам и нижней горизонтальной границе — отсутствие нормальных перемещений, на верхней горизонтальной границе задано давление, соответствующее глубине расположения выработки и высоте расчетной области. На контактных границах между податливым слоем и бетоном, податливым слоем и породным массивом, породным массивом и бетоном формулируются условия полного прилипания. Также учитывалась сила тяжести элементов породного массива.

Физические уравнения для бетона и податливого слоя соответствовали модели упругопластической среды с мультилинейным изотропным деформационным упрочнением [5]. Бетон крепи имел марку В45, в расчете учитывался длительный модуль упругости для уровня влажности 40 % согласно СНиПу [6]. Рассмотрено применение податливого слоя из материала “Пеноплэкс-35”, характеристики которого определены экспериментально в [7, 8].

Физические уравнения для подстилающей каменной соли (ПдКС) учитывали упругопластические свойства среды и эффекты ползучести под действием горного давления с течением времени. Параметры модели ПдКС, использующей ядро Абея, актуализированы для конкретных выработок на рудниках ВКМКС [9].

### СОПРЯЖЕНИЯ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ С ПРИМЫКАЮЩИМИ ВЫРАБОТКАМИ

Слабым местом при поддержании горных выработок в соляных породах являются сопряжения шахтных стволов с примыкающими выработками. Монолитная бетонная крепь не выдерживает давления горного массива. Усиление бетонной крепи металлической арматурой не обеспечивает сохранность крепи, приводит к разрушению бетона с выпиранием арматуры из крепи и образованию отдельных каверн (рис. 1) [10, 11].



Рис. 1. Разрушение железобетонной крепи сопряжений шахтных стволов с дозаторной камерой на руднике “Интернациональный”

Разрушение крепи сопряжений шахтных стволов с примыкающими выработками приводит к необходимости остановки шахтных стволов на капитальный ремонт с разборкой разрушенной бетонной крепи, что регулярно происходит в стволах всех рудоуправлений на рассматриваемых месторождениях. Опыт эксплуатации шахтных стволов в соляных породах выявил основные недостатки применения жесткой монолитной бетонной крепи для разных сопряжений и показал ее малую эффективность. Следует отметить, что приконтурный соляной массив после демонтажа разрушенной бетонной крепи остается в устойчивом состоянии, а выработки после выполнения ремонтных работ с использованием анкерной крепи продолжают успешно функционировать длительное время (30–40 лет).

С целью установления количественных зависимостей смещений породного контура от основных влияющих факторов в соляных породах проводились инструментальные наблюдения за конвергенцией породных контуров на сопряжениях шахтных стволов с примыкающими выработками на рудниках “Интернациональный” АК “АЛРОСА” и Второго Березниковского калийного рудоуправления ПАО “Уралкалий” [7]. На основании результатов многолетних натурных измерений и мониторинговых наблюдений за изменением состояния крепи горных выработок в разных горно-геологических и горнотехнических условиях методами математического моделирования с помощью программного комплекса ANSYS выполнены оценки влияния разных факторов на динамику напряженно-деформированного состояния крепей: монолитной бетонной, чугунной тьюбинговой, металлической рамной и анкерной, примыкающих к шахтным стволам выработок различного назначения.

На начальном этапе разработки нового подхода к обеспечению устойчивости вновь возводимых шахтных стволов с примыкающими выработками рассматривались непосредственно сопряжения. Основная идея заключалась в разработке двухслойной крепи с созданием податливого слоя из пенополистирола марки “Пеноплэкс-35”.

Оценка влияния податливого слоя на конвергенцию приконтурных пород в окрестности узла сопряжения скипового ствола с дозаторной камерой осуществлена в объемной постановке с использованием монолитной бетонной крепи применительно к условиям скипового ствола “Усть-Яйвинского” рудника ПАО “Уралкалий”. Фрагмент объемной модели сопряжения показан на рис. 2.

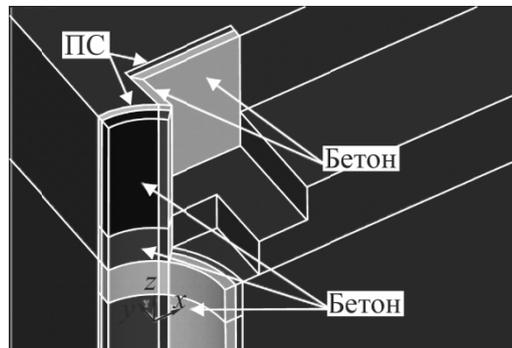


Рис. 2. Фрагмент объемной модели сопряжения

Рассмотрены три варианта крепи узла сопряжения ствола с дозаторной камерой: *A* — не содержит бетонного и податливого слоев; *B* — содержит бетонный слой (0.4 м), но не содержит податливый слой; *B* — содержит бетонный (0.4 м) и податливый слой (0.3, 0.4 и 0.5 м).

В результате численного анализа получено, что применение податливого слоя толщиной 0.4 м отодвигает область повышенной горизонтальной конвергенции вглубь выработки, где заканчивается податливый слой и бетон. Кроме того, значительно уменьшается конвергенция боковых поверхностей дозаторной камеры. Единственное увеличение вертикальной конвергенции наблюдается в варианте *B* (по сравнению с вариантами *A* и *B*), которое следует нейтрализовать применением деформационного шва (деревянного слоя), отделяющего ствол от дозаторных камер (в приведенных расчетах деформационный шов не учитывался).

Проведена оценка эффективности применения податливых слоев толщиной 0.2–0.5 м. Установлено, что наиболее приемлемым в расчете на 40 лет эксплуатации выработок сопряжения шахтного ствола является податливый пенополистирольный слой из “Пеноплэкс-35” толщиной 0.4 м.

В качестве мер защиты бетонной крепи горных выработок, примыкающих к выработкам сопряжений шахтных стволов, от разрушения горным давлением возможно применение податливого слоя из пенополистиролов “Пеноплэкс-35” [10, 11], что не всегда дает необходимый эффект. Особенно это касается большепролетных горизонтальных горных выработок шириной более 6 м с плоской или близкой к ней формой свода.

В [7, 8] показано, что применение бетонной крепи и податливого слоя хорошо зарекомендовало себя при строительстве стволов в соляных породах. Данный эффект объясняется более равномерным (в горизонтальной плоскости) воздействием породы на крепь, а также идеальной круговой формой (и замкнутостью) крепи. Автоматический перенос этих проектных решений на бетонную крепь выработок неправомерен. Необходимо численное моделирование ситуации в каждом конкретном случае. Применение податливого слоя в сочетании с бетонной крепью выработок несомненно улучшает ситуацию по сравнению с использованием чисто бетонной крепи, однако в некоторых случаях не обеспечивает сохранения крепи в течение всего срока эксплуатации (40–60 лет). Как уже отмечалось, это связано с неидеальным контуром выработок, незамкнутостью бетонной крепи (в отличие от ствола) и существенно неравномерным воздействием на нее породного массива.

В ряде случаев жесткая бетонная крепь может быть заменена облегченными видами крепи, когда поведение выработки соответствует первой или второй категории устойчивости в заданные сроки. Оценка категории устойчивости может быть выполнена согласно своду правил [12], но возникают ситуации, когда не все параметры для этой оценки являются достоверно известными. В этом случае можно использовать натурные наблюдения за подобными выработками в схожих горно-геологических условиях.

Возможно применение методов математического моделирования при прогнозировании конвергенции выработки под действием горного давления в течение заданного срока эксплуатации и оценке поврежденных и фрагментированных областей контура выработки. Если конвергенция и области трещинообразования незначительна и попадает в требуемый интервал ограничений, согласно [12, 13], то целесообразно применение облегченных видов крепи, например анкерной с подхватами.

В качестве примеров приведем результаты расчетов бетонной крепи приствольных выработок Южного рудника Второго Соликамского калийного рудоуправления ПАО «Уралкалий». При расчете напряженно-деформированного состояния системы «крепь – соляной массив» использовался программный комплекс ANSYS. Расчеты проведены в 2D плоской постановке.

Рассмотрим сначала приствольную выработку с жесткой бетонной крепью (без податливого слоя) различной толщины  $h_b = 0.6, 0.8, 1.0$  м. Выработка расположена в ПдКС (предел прочности 22.5 МПа) на глубине 349 м, имеет размеры  $a = 5.1$  м,  $h = 3.2$  м.

Установлено, что разрушение бетона происходит в течение нескольких лет после начала эксплуатации. На рис. 3 показано поле максимальных сжимающих напряжений  $\sigma_3$  для бетонной крепи толщиной  $h_b = 1.0$  м. Уже при  $T = 1$  год (а) в области перехода от вертикальной стенки крепи к арочному своду возникает сжимающее напряжение около 30.5 МПа. При  $T = 30$  лет (б) область сильного сжатия образуется и в центре кровли на внешней стороне крепи.

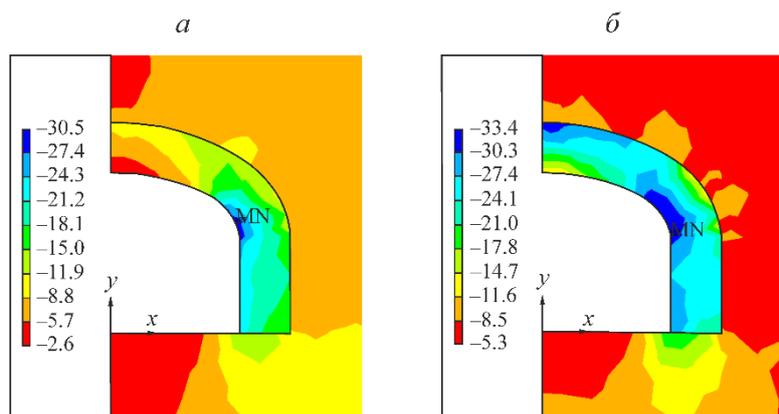


Рис. 3. Поле максимальных сжимающих напряжений (МПа) в монолитной бетонной крепи толщиной 1 м: а —  $T = 1$  год; б —  $T = 30$  лет

На рис. 4 приведены временные зависимости сжимающих напряжений в кровле и боковой стенке бетонной крепи при различной толщине бетона. Сплошная линия соответствует боковой части бетонной крепи, штриховая — кровле. Символом «квадрат» отмечены уровни напряжений для бетонной крепи толщиной 0.6 м, «ромб» — 0.8 м, «треугольник» — 1.0 м.

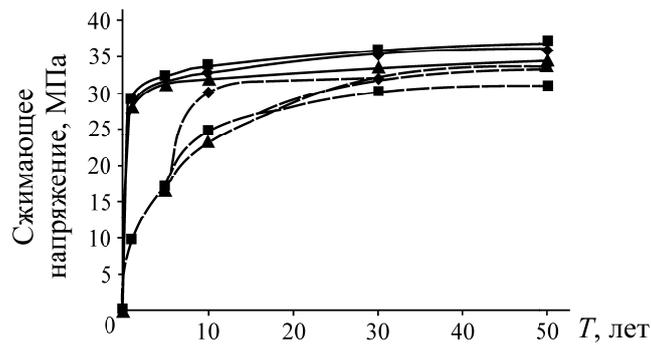


Рис. 4. Временные зависимости сжимающих напряжений в крыше (штриховая) и боковой части (сплошная) бетонной крепи

Первоначально относительно небольшие напряжения в крыше бетонной крепи (10–15 МПа) быстро увеличиваются и к 20–30 годам достигают значений 30 МПа. Очевидно, что толщина бетонной крепи слабо сказывается на величине напряжений. Увеличивая толщину крепи, мы увеличиваем и размеры выработки в соляном массиве, что приводит к росту изгибающих моментов от поверхностной контактной нагрузки со стороны массива.

На рис. 5 показаны временные зависимости максимальных сжимающих и растягивающих напряжений для бетонной крепи толщиной  $h_b = 0.6$  м при наличии податливого слоя толщиной  $h_p = 0.4$  м. Сплошная линия соответствует боковой части бетонной крепи, штриховая — крыше.

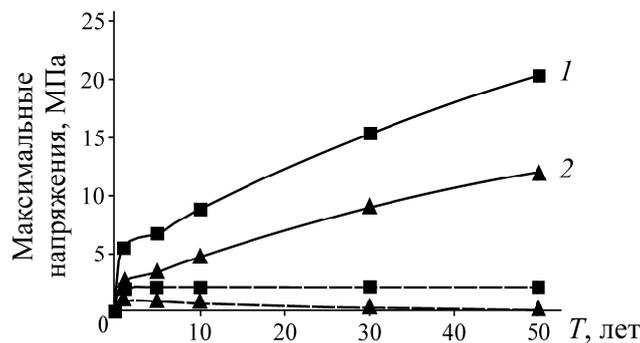


Рис. 5. Временные зависимости сжимающих (1) и растягивающих (2) напряжений в крыше (штриховая) и боковой части (сплошная) бетонной крепи при наличии податливого слоя

Использование податливого слоя значительно (в 2–5 раз) снижает уровень максимальных сжимающих напряжений, особенно в начальные периоды эксплуатации до 30 лет. Отрицательным эффектом здесь следует признать появление растягивающих напряжений, достигающих 5 МПа (10 лет), 9 МПа (30 лет) и 12 МПа (50 лет). Для сохранения прочности крепи в течение всего срока эксплуатации необходимо применение армированного бетона.

Рассмотрим большепролетную приствольную выработку сопряжения загрузки скипов, расположенную на глубине  $H = 353.5$  м размерами  $a = 8.1$  м и  $h = 8.2$  м. На рис. 6 представлены временные зависимости максимальных сжимающих и растягивающих напряжений для бетонной крепи толщиной  $h_b = 0.6$  м при наличии податливого слоя толщиной  $h_p = 0.4$  м.

По сравнению с выработкой небольшого сечения (рис. 4) для традиционной бетонной крепи (без податливого слоя) наблюдаются рост сжимающих напряжений от 35 МПа (1 год) до 45 МПа (50 лет) в боковой части крепи. Сжимающие напряжения в крыше остаются на старом уровне 30 МПа.

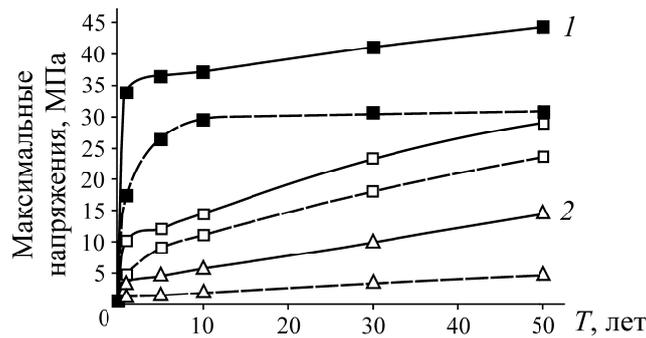


Рис. 6. Временные зависимости сжимающих (1) и растягивающих (2) напряжений в кровле (штриховая) и боковой части (сплошная) бетонной крепи: без податливого слоя — залитые черным символы, с податливым слоем — полые символы

Применение комбинированной крепи (бетон с податливым слоем) позволяет снизить сжимающие напряжения. Тем не менее они остаются достаточно высокими: 15–28 МПа в боковой части и 10–23 МПа в кровле. Отрицательным фактором, как и в предыдущем варианте (рис. 5), являются растягивающие напряжения, достигающие 5–15 МПа.

Из расчетов следует, что податливый слой сжимается не более чем на треть своей толщины. Однако даже небольшие давления (около 0.3 МПа), передаваемые на бетонную крепь, приводят к ее разрушению. Причина состоит в том, что бетонная крепь представляет собой криволинейную тонкую незамкнутую оболочку больших размеров, в которой создаются значительные изгибающие моменты. Увеличение толщины бетонной крепи или податливого слоя не приводит к снижению растягивающих напряжений.

Рассмотрим поведение этой выработки без применения жесткой бетонной (или комбинированной) крепи. Результаты численного моделирования (рис. 7) показывают, что выработка находится в области устойчивости первой категории (до 30 лет), а далее остается во второй категории устойчивости до конца срока эксплуатации [12].

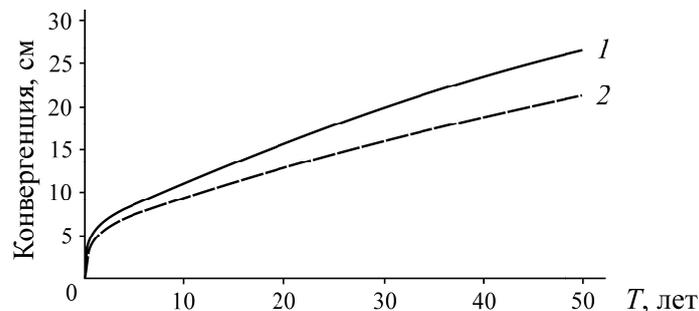


Рис. 7. Временные зависимости вертикальной (1) и горизонтальной (2) конвергенции

Возникает вопрос, каковы возможные разрушения приконтурного соляного массива, и существует ли необходимость применения жесткой бетонной крепи.

В [14] сформулирован деформационный критерий разрушения соляных пород, согласно которому введен коэффициент запаса прочности  $n$  по предельной деформации, зависящей от коэффициента жесткости напряженного состояния:

$$n = \frac{\varepsilon_1^{\text{пр}} \left( \frac{p}{\sigma_u} \right)}{\varepsilon_1},$$

где  $p = (1/3)\sigma_{ij}\delta_{ij}$  — среднее (гидростатическое) давление;  $\sigma_u = ((3/2)S_{ij}S_{ij})^{1/2}$  — интенсивность напряжений;  $S_{ij} = \sigma_{ij} - p\delta_{ij}$  — компоненты девиатора тензора напряжений;  $\varepsilon_1, \varepsilon_1^{pp}$  — главная и предельная главная деформации.

Коэффициент запаса прочности  $n$  имеет смысл величины, обратной к параметру относительной поврежденности  $\omega$ . Область значений  $n < 1$  ( $\omega > 1$ ) считается фрагментированной, а области  $1 < n < 2$  ( $0.5 < \omega < 1$ ) и  $2 < n < 3$  ( $0.5 < \omega < 1$ ) — поврежденными с ослаблением механических характеристик на 25 и 15% соответственно. Разработан алгоритм расчета и визуализации поврежденных зон в соляном массиве в процессе ползучести под действием горного давления. Алгоритм реализован во внутреннем языке APDL программной среды ANSYS.

На рис. 8 показаны поля коэффициента запаса прочности  $n$  по деформационному критерию разрушения соляного массива для времени  $T = 10, 30$  и  $50$  лет в окрестности незакрепленной выработки загрузки скипов. Синим цветом отмечены фрагментированные зоны. Поврежденная область соляного массива для рассмотренной выработки возникает в основном в боковой стенке крепи. Если удалить фрагментированный материал, то контур выработки будет приближаться к “оптимальному” — окружности некоторого радиуса. Этот вывод справедлив не для всех соляных пород — наличие ослабленных горизонтальных прослоев (особенно в кровле выработки) способно сильно изменить величину и форму фрагментированных областей.

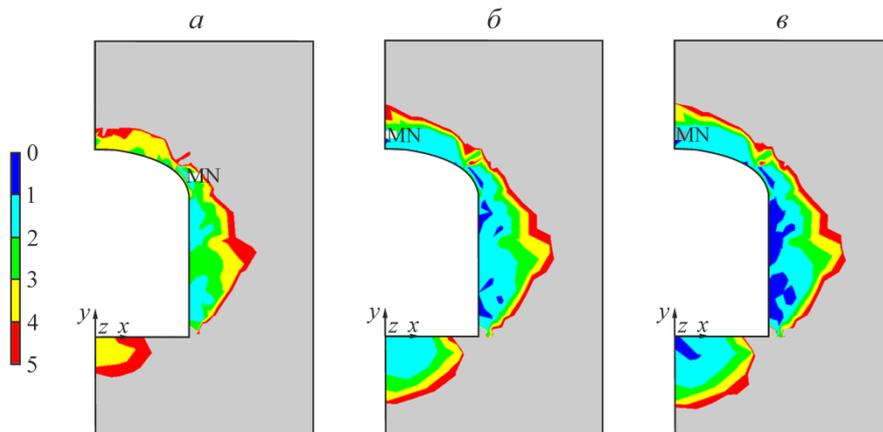


Рис. 8. Поле коэффициента запаса прочности  $n$  массива ПдКС в окрестности незакрепленной выработки: а —  $T = 10$  лет; б —  $T = 30$  лет; в —  $T = 50$  лет

Из рис. 8 следует, что в данном случае нет необходимости применения жесткой бетонной крепи, а достаточно облегченных видов (анкерной или рамной с податливым слоем), поскольку фрагментированная область породного массива в боковой стенке минимальна до 30 лет, а в кровле нарушения наблюдаются только к концу срока эксплуатации выработки.

Инструментальными измерениями смещений породного контура выработок, расположенных вблизи шахтных стволов, установлено, что скорость вертикального смещения породного контура большепролетных выработок шириной 8–10 м составляет около 7–10 мм/год, а вертикальная конвергенция достигает критических 20 см для пород первой категории за 20–30 лет, что подтверждает результаты расчетов.

Считается, что необходимость применения жесткой бетонной крепи приствольных выработок связана с уменьшением конвергенции выработок. Использование бетонной крепи ствола с податливым слоем приводит к тому, что ствол фактически уже отделен от породного массива, поскольку податливый слой практически не передает касательных напряжений. Бетонная крепь ствола испытывает только горизонтальные нормальные напряжения, передаваемые через по-

датливый слой и обусловленные горизонтальной конвергенцией соляного массива. В этом случае вертикальная конвергенция выработок сопряжения не оказывает существенного влияния на бетонную крепь ствола.

Исходя из оценок, проведенных на основе несущей способности анкера [13, 15], для однородных соляных пород второй категории устойчивости возможно применение в кровле анкерной крепи. Учитывая особую важность обеспечения устойчивости выработок в районе сопряжений и основываясь на результатах многочисленных расчетов и натуральных измерений состояния породного массива, подтверждена целесообразность применения анкерной крепи с подхватом и металлической или полимерной сеткой [13, 16].

Использование монолитной бетонной крепи в горизонтальных выработках, примыкающих к выработкам сопряжений шахтных стволов, неэффективно ввиду невозможности обеспечения сохранения сплошности крепи в течение срока эксплуатации из-за ползучести соляных пород.

### ВЫВОДЫ

На основе инструментальных наблюдений за смещением породных контуров выработок в соляных породах, примыкающих к сопряжениям шахтных стволов, и методов математического моделирования с использованием программного комплекса ANSYS показана целесообразность применения на сопряжениях бетонной крепи с податливым слоем из пенополистирола “Пеноплэкс-35”, а в выработках, примыкающих к выработкам сопряжений, — облегченных видов крепи (анкерной с сеткой или рамной с податливыми элементами).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов Г. Н. Механические свойства горных пород. — М.: Углетехиздат, 1947. — 180 с.
2. Барях А. А., Константинова С. А., Асанов В. В. Деформирование соляных пород. — Екатеринбург: УрО РАН, 1996. — 202 с.
3. Барях А. А., Самоделкина Н. А. Об одном подходе к реологическому анализу геомеханических эффектов // ФТПРПИ. — 2005. — № 6. — С. 32–41.
4. Курленя М. В., Миренков В. Е., Савченко А. В. Расчет деформирования массива вокруг заглубленных выработок с учетом собственного веса пород // ФТПРПИ. — 2017. — № 3. — С. 3–11.
5. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. — М.: Наука, 1969. — 420 с.
6. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. — М., 2012. — 174 с.
7. 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.
8. Соловьев В. А., Аптуков В. Н., Котляр Е. К. Охрана крепи шахтных стволов в породах карналлитовой толщи // Горн. журн. — 2017. — № 2. — С. 57–61.
9. Константинова С. А., Аптуков В. Н. Некоторые задачи механики деформирования и разрушения соляных пород. — Новосибирск: Наука, 2013. — 191 с.
10. Соловьев В. А., Аптуков В. Н., Константинова С. А., Секунцов А. И. Способы обеспечения устойчивости сопряжений шахтных стволов с примыкающими выработками в соленосных массивах горных пород // Горн. журн. — 2013. — № 7. — С. 53–56.
11. Соловьев В. А., Аптуков В. Н., Ваулина И. Б., Каменских А. С. Ремонт капитальных горных выработок в соляных породах // Горн. журн. — 2016. — № 1. — С. 43–49.
12. СНиП II-94-80. Подземные горные выработки. — М., 2012. — 53 с.
13. Соловьев В. А., Аптуков В. Н., Ваулина И. Б. Поддержание горных выработок в породах соленосной толщи. — Новосибирск: Наука, 2017. — 263 с.
14. Аптуков В. Н. Деформационный критерий разрушения образцов соляных пород // ФТПРПИ. — 2016. — № 3. — С. 39–45.
15. ГОСТ Р 52042-2003. Крепи анкерные. — М., 2003. — 12 с.
16. Константинова С. А., Крамсков Н. П., Соловьев В. А. Некоторые проблемы механики горных пород применительно к обработке алмазных месторождений Якутии. — Новосибирск: Наука, 2011. — 222 с.

*Поступила в редакцию 17/II 2017*