

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КРЕПИ СОПРЯЖЕНИЯ ШАХТНОГО СТВОЛА, ПРОЙДЕННОГО В СОЛЯХ

Ю.А. Кириенко

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

Аннотация: Сопряжения стволов с горизонтальными выработками, как правило, отличаются сложной конфигурацией, а в месте их сооружения в наибольшей мере проявляется действие горного давления. На калийных и соляных рудниках сопряжения стволов проходят в соляных или солосодержащих породах. Склонность соляных пород к длительной ползучести в основном определяет требования к выбору конструкции и материала крепи сопряжений. Приведены результаты численных экспериментов для определения наиболее эффективной конструкции крепи сопряжения, применительно к горно-геологическим условиям Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей. Расчет выполнялся в пространственной постановке в программном комплексе Midas GTS NX (FEA NX) методом конечных элементов. По каждому исследуемому вопросу строилась расчетная модель с несколькими вариантами конструктивного решения. Был проведен детальный анализ работы многослойной конструкции крепи узла сопряжения в части расположения и толщины податливого слоя; размеров деформационных швов в стволе и сопряжении; оценки влияния и расположения опорного венца в схеме узла сопряжения ствола с комплектом загрузки скипов. Таким образом, рассмотрены принципиально новые решения и оптимизированы существующие, которые снижают нагрузку на крепь в условиях влияния ползучести соляных пород. Полученные результаты показывают, что некоторые конструктивные решения позволяют уменьшить на 73% уровень напряжений в тюбинговых кольцах в области сопряжения. Сделанные выводы позволяют в полной мере обосновать принципиальную схему крепи сопряжения и принятые конструктивные решения.

Ключевые слова: расчет крепи, сопряжения, шахтный ствол, ползучесть каменной соли, численный метод, метод конечных элементов, двухслойная крепь, деформации ползучести, расчетная программа, устойчивость.

Для цитирования: Кириенко Ю. А. Обоснование конструкции крепи сопряжения шахтного ствола, пройденного в солях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6. – С. 20–34. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_20.

Justification of support design for tunnel and shaft intersections in salt

Yu.A. Kirienko

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

Abstract: Intersections of tunnels and shafts feature a complex geometry, as a rule, and experience the higher overburden pressure. In potash and salt mines, the tunnel and shaft intersections are driven in salt or in salt-bearing rocks. Sensitivity of salt rocks to long-term creeping governs

the choice of the support design systems and material for the tunnel and shaft intersections. The article presents numerical experimentation aimed to determine the most efficient support design for the tunnel and shaft intersection as a case-study of the Upper Kama Potassium–Magnesium Salt Deposit. 3D computation was performed using the finite element method in software program Midas GTS NX (FEA NX). In the study, the analytical model was constructed for each test item and with a number of the support design alternatives. The scope of the comprehensive analysis embraced: operation of the multi-layer support systems in the tunnel and shaft intersection with regard to location and thickness of the yielding layer; size of movement joints in the shaft and in its intersection with the tunnel; effect of the curb and its position in the tunnel and shaft intersection with a skip loading facility. In this manner, the cardinally new solutions are discussed and the existing decisions are optimized to decrease the support loading in the conditions of creeping salt rocks. The results show that some constructional decisions allow reducing stresses in the shaft tubing at intersections with tunnels by 73%. The conclusions drawn in the article make it possible to substantiate the general layout and constructional decisions of the support design for the tunnel and shaft intersections.

Key words: support design, intersections, shaft, rock salt creep, numerical method, finite element method, two-layer support system, creep deformation, computation program, stability.

For citation: Kirienko Yu. A. Justification of support design for tunnel and shaft intersections in salt. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6):20-34. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_20.

Введение

Проектирование и строительство горных выработок необходимо выполнять с учетом уникальных свойств соляных и соленосных пород. Это поможет избежать влияния негативных проявлений горного давления (разрушение жесткой крепи выработок, деформация несущих конструкций, пучение почвы).

Известно, что на устойчивость выработок, пройденных в солях, значительное влияние оказывают соседние выработки. Особенно это проявляется у стволов, где в соляном целике располагается большое количество выработок околоствольного двора. Еще в большей мере этому влиянию подвержены сопряжения стволов.

Благодаря исследованиям последних лет в области поддержания выработок в соляных и соленосных породах стало возможным проектирование крепей стволов и сопряжений с продолжительным безремонтным сроком службы.

Изучению охраны горных выработок в соляных породах посвящены работы В.А. Соловьева, В.Н. Аптукова [1], Д.М. Казикаева, С.В. Сергеева [2 – 3].

На сегодняшний день при проектировании сопряжений обязательными элементами конструктивных решений являются устройство деформационного шва, отделяющего крепь ствола от крепи сопряжения, и применение двухслойной крепи с податливым слоем.

Двухслойная крепь включает внутренний жесткий слой (монократно-бетонная или чугуно-бетонная крепь) и внешний податливый слой (например, жесткие минераловатные плиты [4, с. 317]).

Однако детальный анализ участка сопряжения показывает, что требуется уточнение существующих и принятие дополнительных принципиальных решений по конструктивной части, для снижения уровня вертикальных и горизонтальных напряжений в крепи.

Целью настоящей работы является проведение численных экспериментов для уточнения конструктивных особенностей и определения наиболее эффективной конструкции крепи сопряжения, применительно к горно-геологическим условиям Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВКМКС).

Если для оценки НДС крепи протяженной части ствола или любой другой одиночной выработки достаточно решить задачу в плоской постановке, то для участков сопряжений ствола необходимо учитывать как вертикальные, так и горизонтальные деформации вмещающих пород. В связи с тем, что различные аналитические методы расчетов [5, 6] не позволяют в полной мере оценить работу крепи сложных объемных конструкций, расчеты выполнялись в программном комплексе Midas GTS NX (FEA NX) в пространственной постановке методом конечных элементов. Расчетная модель имеет масштаб 1:1, и для исключения влияния граничных условий горизонтальный размер грани принят равным 150 м, высота модели составляет 160 м. Для соляных пород принята нелинейная модель пластического тела (модель Мизеса с мультилинейным упрочнением) с параметрами линейной наследственной ползучести.

Принятые коэффициенты ползучести Абелева ядра: безразмерный параметр ядра ползучести $\alpha = 0,7$, размерный параметр ядра ползучести $\delta = 0,0041c^{\alpha-1}$.

Важно отметить, что применение линейно-наследственной теории ползучести для соляных пород справедливо только для уровней нагрузки из области линейности свойств деформаций, т.е. в пределах значения длительной прочности породы. А чтобы учесть деформации за ее пределом, необходимо применение нелинейной модели. Таким образом, в расчетах для обратимой части деформаций воспользуемся ядром ползучести

типа Абеля, а необратимая деформация будет описываться в рамках модели Мизеса с мультилинейным упрочнением.

Модель Мизеса используется для моделирования нелинейного поведения материалов при достижении касательными напряжениями своего предельного значения. При течении материала закон упрочнения определяет характер изменения поверхности текучести с пластическим упрочнением. Для каменной соли в расчетах принят предел длительной прочности $\sigma = 0,3\sigma_{ск}$.

Условие разрушения в модели Мизеса предполагает, что разрушение происходит, когда инвариант 2-го порядка девиаторного напряжения J_2 достигает определенного значения. Это условие часто используется для моделирования пластического поведения материалов. Состояние идеального пластического разрушения, не учитывающее упрочнение, может быть выражено с помощью следующего уравнение:

$$f(\sigma) = \sqrt{3}J_2 - \sigma_y = \sqrt{\frac{3}{2}}\sigma_{dev} : \sigma_{dev} - \sigma_y = 0, \quad (1)$$

где σ_{dev} — девиатор напряжений; σ_y — предел текучести.

Предел текучести σ_y рассчитывается с помощью функций упрочнения с использованием переменной λ_c следующим образом:

$$\sigma_y = \lambda_c h_y(0) + (1 - \lambda_c)h_y(e_p), \quad (2)$$

где при $\lambda_c = 0$ предполагается изотропное упрочнение.

Кривая упрочнения является характеристикой материала, которая описывает его пластические свойства. Как правило, кривую упрочнения получают по результатам испытаний на одноосное растяжение/сжатие или чистый сдвиг. В расчетном программном комплексе GTS NX (FEA NX) кривая упрочнения строится на основании задаваемой пользователем в действительных величинах

Таблица 1

Физико-механические характеристики подстилающей каменной соли
Physical and mechanical characteristics of underlying rock salt

| Наименование породы | E , МПа | Коэффициент Пуассона, ν | σ_c , МПа | γ , г/см ³ |
|---------------------|-----------|-----------------------------|------------------|------------------------------|
| Каменная соль | 9660 | 0,23 | 20 | 2,33 |

кривой напряжений — пластических деформаций. Так как пластические деформации возникают в момент, когда проявляется текучесть материала, они могут быть вычислены следующим образом:

$$e_p = \varepsilon - \varepsilon^{el} = \varepsilon - \sigma/E, \quad (3)$$

где E — модуль упругости.

Физико-механические характеристики подстилающей каменной соли приведены в табл. 1.

Для материалов крепи принята упругая модель. В модели приняты пространственные конечные элементы: трехгранные и четырехгранные призмы с узлами в вершинах конечных элементов. Конечно-элементная сетка на внешних гранях составляет 30 м, а в расчетной области крепи выработок — 1 м. Заданы ограничения перемещений боковых и нижней граней модели по нормали к ним. На верхнюю грань приложен вес вышележащей толщи пород. Для всех элементов в модели задан собственный вес. Расчет выполнен с учетом начального напряженного состояния массива, принятого гидростатическим $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \gamma H$, до начала проходки.

В геомеханических расчетах использованы данные об естественном поле напряжений, прочностные и деформационные показатели, а также учтены деформации ползучести вмещающих пород. Исследования проблем ползучести соляных пород представлены в исследованиях зарубежных авторов [7–9] и отечественных ученых [10, с. 50], [11].

На рис. 1 (см. Приложение, с. 33) приведена расчетная пространственная модель породного массива из подстилающей каменной соли (ПдКС), вмещающего вертикальный ствол диаметром в свету 8 м и сопряжения. На рис. 2 (см. Приложение, с. 33) приведен фрагмент расчетной модели — сопряжение ствола с комплексом загрузки скипов на глубине 438 м.

Отталкиваясь от результатов инструментальных исследований и лабораторных испытаний горных пород ВКМКС [11, с. 75], была выполнена верификация модели. Результаты расчета конвергенции породного контура выработок в области сопряжения для времени $T = 50$ лет приведены в табл. 2. Дополнительно в пятом столбце таблицы ука-

Таблица 2

Результаты расчета конвергенции породного контура выработок в области сопряжения для времени $T = 50$ лет
Calculated convergence of tunnel boundaries in the area of intersection with shaft for the time $T = 50$ years

| Выработка | МКЭ | | | СП91 |
|---------------------|--|------------------------|------------------------|-------------------------|
| | Верт. (кровля/почва) Δu_z , мм | Гор. Δu_x , мм | Гор. Δu_y , мм | По формуле Е.4 U , мм |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Ствол | 205 | 251 | 357 | — |
| Конвейерная галерея | 440/360 | — | 475 | 492 |

заны расчетные смещения, определенные по формуле Е.4 СП91 и хорошо согласующиеся с результатами численных расчетов.

На рис. 3 (см. Приложение, с. 33) приведены изополя перемещений породного контура выработок.

Значения конвергенций по результатам моделирования хорошо согласуются с мониторинговыми наблюдениями за смещением приконтурных пород в соленосной толще [11 – 13]. Скорость установившейся ползучести солей для шахтных условий калийных и соляных рудников изменяется от 0,001 до 0,2 мм/сут [11, с. 75 – 77, с. 218, с. 219].

Ряд исследований роли податливого слоя (ПС), благодаря которому нагрузка от постепенно сжимающегося окружающего соляного массива длительное время не передается на крепь сопряжения ствола с горизонтальными выработками, выполнены учеными С.А. Константиновой, В.А. Соловьевым, В.Н. Аптуковым [1, 10, 11]. Важно отметить, что включение в конструкцию крепи податливого слоя вносит изменения в сов-

местную работу массива и крепи узла сопряжения из-за различающейся жесткости крепи вертикальной части и крепи горизонтальной части. В связи с этим представляет интерес более детальный анализ работы такой многослойной конструкции крепи узла сопряжения.

Выделим следующие вопросы:

- обоснование расположения и определение оптимальной толщины податливого слоя в кровле и боках выработок;
- оценка необходимости, оптимальные расположения и размеры деформационных швов в стволе и сопряжении;
- оценка влияния и оптимальное расположение опорного венца в схеме узла сопряжения ствола с комплексом загрузки скипов.

Исследуемые аспекты конструктивной части крепи сопряжения приведены на рис. 4.

В расчетной модели исследовались:

- толщина податливого слоя H_1 (бока) и H_1' (кровля);
- расположение горизонтального деформационного шва H_2 ;
- ширина деформационного шва H_3 ;

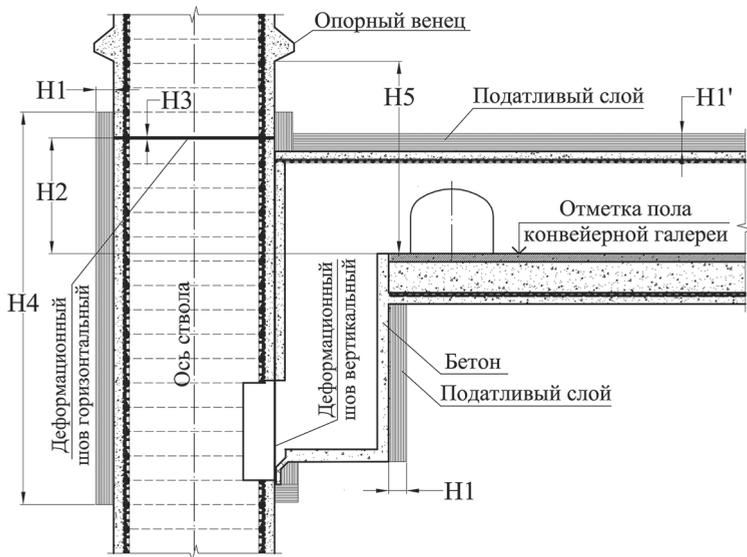


Рис. 4. Конструкция крепи сопряжения

Fig. 4. Support design for intersection

- протяженность податливого слоя ствола H_4 в зоне сопряжения;
- высота расположения опорного венца над сопряжением H_5 .

Необходимая и достаточная толщина податливого слоя

В качестве технического решения на сопряжении ствола применены стальные тубинги, монолитная бетонная крепь с добавлением фибры и внешний податливый слой (см. рис. 4).

Для обеспечения эффективного применения податливого материала, минимизирующего влияние ползучести соляных пород, необходимо отталкиваться от значений прогнозной конвергенции породного контура выработок сопряжений, см. табл. 1.

Некоторые результаты расчетов приведены на рис. 5 и 6. При условии, что материал податливого слоя способен компенсировать 70% смещений (требование СП91.13330, п. 7.2.2.7), а передаваемое давление на крепь составит не более 1,3 МПа [4, с. 318] толщина податливого слоя должна удовлетворять выражению:

$$H_1 \cdot 0,7 \geq u_r, \quad (4)$$

$$H_1' \cdot 0,7 \geq u_b, \quad (5)$$

где H_1 — толщина ПС в боках; H_1' — толщина ПС в кровле; u_r — расчетные горизонтальные смещения породного контура за весь срок службы выработки; u_b — расчетные вертикальные смещения породного контура за весь срок службы выработки.

В связи с тем, что податливый слой не располагают в почве выработок при назначении его толщины в кровле, необходимо учесть и пучение почвы. На рис. 5 показано сечение конвейерной галереи: 1 — вмещающий массив; 2 — ПС (проектный зазор между крепью и породным контуром); 3 — крепь конвейерной галереи; δ_y, δ_z — оставшийся зазор между крепью и породным контуром (при $T = 50$ лет).

К концу срока службы выработки зазор между крепью выработки и породой в кровле δ_z значительно меньше, чем в боках δ_y . Это обусловлено не только большим по величине смещением кровли, но и конструкцией крепи конвейерной галереи, которая имеет замкнутый контур, и пучение почвы приподнимает крепь. Для крепи без обратного свода пучение почвы будет иметь значительно меньший эффект.

К концу срока службы крепь начнет испытывать все большее давление со сто-

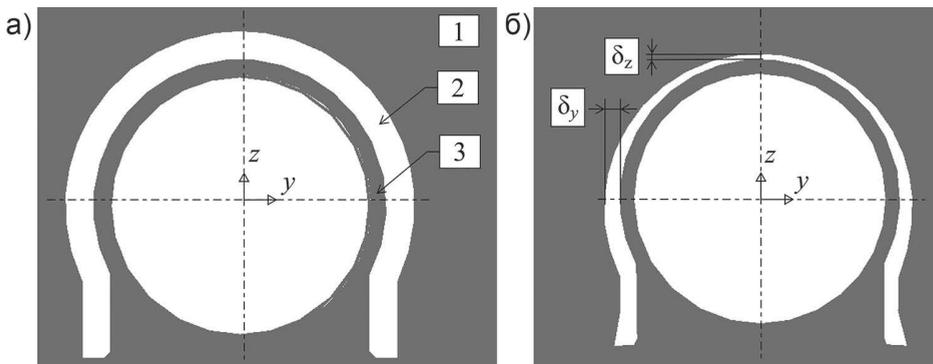


Рис. 5. Фрагмент расчетной области. Вертикальное сечение КГ: проектное сечение (а); НДС при $T = 50$ лет (б)

Fig. 5. Fragment of computational domain. Vertical section of conveyor tunnel: project section (a); stress-strain behavior in $T=50$ years (b)

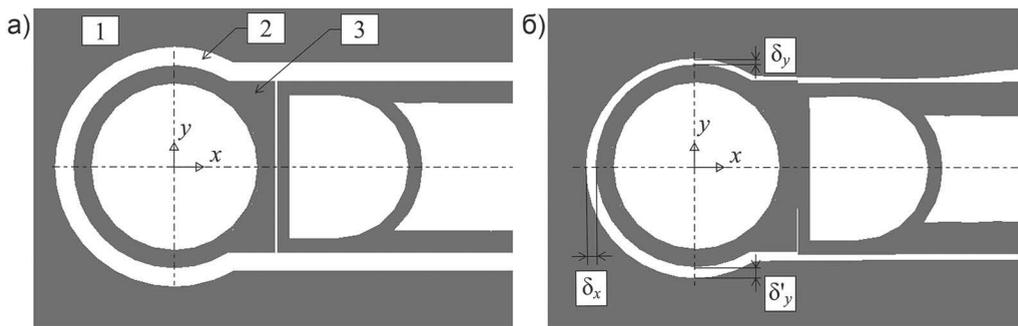


Рис. 6. Фрагмент расчетной области. Горизонтальное сечение ствола на уровне сопряжения: проектное сечение (а); НДС при $T = 50$ лет (б)

Fig. 6. Fragment of computational domain. Horizontal section of shaft at the level of intersection with tunnel: project section (a); stress-strain behavior in $T=50$ years (b)

роны кровли, а из-за неравномерного обжатия по контуру формируются крайне неблагоприятные условия работы крепи.

В горизонтальной плоскости вокруг ствола, как показано на рис. 6, так же присутствует неравномерное смещение породного контура $\delta_y < \delta_x = \delta'_y$, обусловленное наличием дополнительной выработки с одной стороны, примыкающей к конвейерной галерее. 1 — вмещающий массив; 2 — ПС (проектный зазор между крепью ствола и массивом); 3 — крепь ствола; δ_x, δ_y — оставшийся зазор между крепью и породным контуром (при $T = 50$ лет).

Деформационные швы

Если крепь сопрягающихся выработок из монолитного бетона представляет одно монолитное целое, то, как правило, в месте сопряжения крепь нарушается. Трещины из горизонтальной выработки переходят в ствол. Чтобы это

го не произошло, крепь ствола должна отделяться от крепи горизонтальных выработок вертикальным деформационным швом (ДШ) [14, с. 190]. Важно отметить, что существует необходимость разделять крепь ствола деформационным швом и над сопряжениями. Горизонтальные деформационные швы или горизонтальные осадочные швы (узлы вертикальной податливости), разделяющие крепь ствола непосредственно над сопряжением (см. рис. 4), служат для компенсации совместных вертикальных смещений крепи ствола и массива горных пород. В связи с тем, что массив за счет ПС свободно деформируется вниз, вместе с ним смещается и тубинговая колонна.

Как показали результаты моделирования, если такой шов не предусмотрен, в зоне сопряжения крепь ствола испытывает избыточные напряжения, см. рис. 7 (Приложение, с. 34) и табл. 3.

Таблица 3

Напряжения в тубинговой крепи ствола в зоне сопряжения
Stresses in shaft tubing support at intersection with tunnel

| № п/п | Конструкция крепи | Главные тангенциальные напряжения σ_t , МПа |
|-------|-------------------|--|
| 1 | без ДШ | -149,9 |
| 2 | с ДШ | -115,7 |

Примечание: Знак «минус» — напряжения сжатия.

Таблица 4

Напряжения в тьюбинговой крепи ствола над сопряжением
Stresses in shaft tubing support above intersection with tunnel

| № п/п | Конструкция крепи | Главные тангенциальные напряжения σ_1 , МПа |
|-------|-------------------|--|
| 1 | ДШ (вариант I) | -590,2 |
| 2 | ДШ (вариант II) | -160,4 |

Примечание: Знак «минус» — напряжения сжатия.

По приведенным в табл. 3 данным можно оценить положительный эффект защиты крепи ствола с помощью горизонтальных деформационных (осадочных) швов. Напряжения в конструкции тьюбинговой крепи, предусматривающей деформационный шов, на 23% ниже.

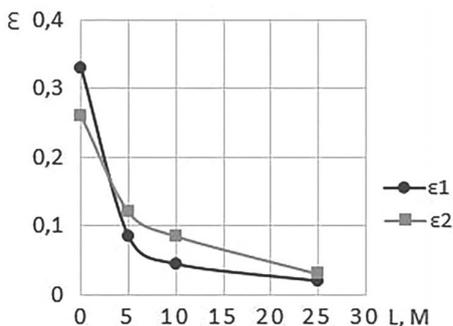
Немаловажную роль играет и расположение такого осадочного шва. Рассмотрено два варианта (рис. 8, см. Приложение, с. 34): в первом случае разрыв колонны устраивался непосредственно над сопряжением на одном уровне с податливым слоем (см. рис. 8, а); второй вариант предполагал разрыв колонны ниже на 1,5 м под защитой податливого слоя (см. рис. 8, б). Результаты расчетов приведены в табл. 4. Крепь ствола над сопряжением в варианте II испытывает меньший краевой эффект.

Напряжения в конструкции тьюбинговой крепи, предусматривающей расположение деформационного шва ниже на 1,5 м, под защитой податливого слоя (ва-

риант II), на 73% ниже. Ширину деформационного шва следует назначать на основе расчета ожидаемых относительных деформаций пород околоствольного массива. По результатам расчетов вертикальные смещения крепи ствола над сопряжением, обусловленные реологией, составляют $\Delta u_z = -157,6$ мм, а смещения крепи ствола в зоне сопряжения составят $\Delta u_z = 56,8$ мм (см. рис. 9, Приложение, с. 34). Таким образом, необходимая минимальная ширина ДШ составит $H_3 = 157,6 + 56,8 = 214,4$ мм.

Протяженность податливого слоя ствола на участке сопряжения

Податливый слой ствола на участке сопряжения служит для компенсации избыточных и неравномерных деформаций пород. Наибольшие горизонтальные смещения стенок ствола наблюдаются в направлении, перпендикулярном подходным выработкам. В связи с этим в окрестности сопряжения ствол прини-



ε_1 — эксцентриситет поперечного сечения породного контура ствола к концу срока его эксплуатации без крепи;

ε_2 — эксцентриситет поперечного сечения породного контура закрепленного ствола к концу срока его эксплуатации

Рис. 10. Графики зависимости эксцентриситета ствола от расстояния до сопряжения

Fig. 10. Shaft eccentricity versus distance to intersection with tunnel

Таблица 5

Значения эксцентриситета и смещений породного контура ствола на участке сопряжения

Values of eccentricity and displacements of shaft rock walls at intersection with tunnel

| Расстояние от сопряжения L , м | МКЭ | | | | СП91 |
|----------------------------------|--------------------|----------------|-----------------------|----------------|----------------|
| | закрепленный ствол | | не закрепленный ствол | | по формуле Е.4 |
| | ε_1 | u_{cp1} , мм | ε_2 | u_{cp2} , мм | U , мм |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 25 | 0,03 | 12 | 0,02 | 222 | 270 |
| 10 | 0,09 | 24 | 0,05 | 298 | — |
| 5 | 0,11 | 33 | 0,08 | 315 | — |
| 0 | 0,26 | 285 | 0,33 | 390 | 399 |

Примечание: u_{cp1} — осредненные по окружности относительные смещения контура поперечного сечения закрепленного ствола; u_{cp2} — осредненные по окружности относительные смещения контура поперечного сечения ствола без крепи.

мает эллипсоидальную форму с эксцентриситетом от $\varepsilon = 0,03$ (на расстоянии от сопряжения 25 м) до $\varepsilon = 0,26$ (на уровне сопряжения) (см. рис. 10, табл. 5). Подобные результаты были получены в работе [11, с. 186].

На графиках рис. 10 видно, как эксцентриситет ствола уменьшается по мере удаления от сопряжения. Более того, если бы ствол не был закреплен в течение всего срока службы (столбцы 4 и 5, табл. 5), то эксцентриситет стал бы несколько меньше на удалении 3—20 м, но выше в самом сопряжении. В следствии того, что конвергенция незакрепленного ствола на один порядок выше (315 >> 33 мм), приконтурный массив значительно разгружается и, как следствие, напряжения становятся более равномерными вокруг контура выработки.

Дополнительно в шестом столбце табл. 5 указаны расчетные смещения, определенные по формуле Е.4 СП91, они хорошо согласуются с результатами численных расчетов.

Протяженность податливого слоя ствола на участке сопряжения, кроме защиты крепи от избыточных смещений, еще решает задачу эксцентриситета (т.е. не-

благоприятных условий работы крепи), который уменьшается по мере удаления от сопряжения. Размер податливого слоя H_4 (см. рис. 4) необходимо принимать таким, чтобы напряжения в крепи ствола не превышали ее несущую способность.

Для данного примера, с учетом несущей способности крепи, протяженность податливого слоя H_4 ствола в зоне сопряжения принимаем с размерами:

- сверху не менее 1,5 м над сопряжением;
- снизу не менее 1,5 м под сопряжением.

Расположение опорного венца над сопряжением

Для обеспечения сцепления тубинговой колонны с окружающими породами устраивают опорные венцы (ОВ) [15]. Их необходимо предусматривать в первую очередь при механизированном способе разработки породы, когда проходка ствола осуществляется строго в пределах проектного контура. В этом случае необходимо обеспечить сцепление, эквивалентное способу БВР (устройство опорных венцов, формирование

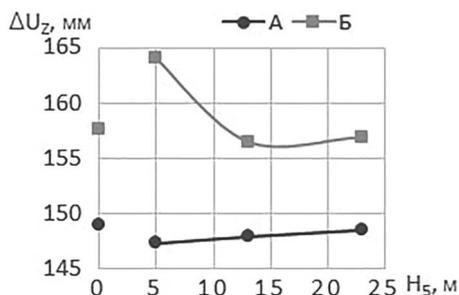


Рис. 12. Зависимость растягивающих деформаций в крепи ствола от расположения ОВ над сопряжением
 Fig. 12. Tensile strains in shaft support versus position of curb above intersection with tunnel

Таблица 6

Зависимость относительных вертикальных смещений в крепи ствола от расположения ОВ над сопряжением

Relative vertical displacements in shaft support versus position of curbs (C) above intersection

| п/п | Расположение ОВ H_5 , м | Δu_z , мм | |
|-----|---------------------------|-------------------|-------|
| | | А | Б |
| 1 | Без ОВ | 149,0 | 157,6 |
| 2 | 5 | 147,3 | 164,0 |
| 3 | 13 | 147,9 | 156,5 |
| 4 | 23 | 148,5 | 156,9 |

Примечание: Область А — дальняя от сопряжения сторона крепи; Область Б — ближняя от сопряжения сторона крепи.

поясов сцепления, формирование сплошной искусственной неровности и т.п.).

С помощью математического моделирования рассмотрено четыре случая: без устройства ОВ; устройство ОВ над сопряжением на расстоянии $H_5 = 5$ м, 13 м и 23 м (см. рис. 11, Приложение, с. 34). Размеры ОВ: высота 2 м, глубина постели вруба 1,2 м.

Полученные данные для четырех вариантов показывают, что крепь ствола со стороны сопряжения (Область Б, рис. 11) испытывает большие вертикальные деформации по всем вариантам (см. табл. 6). Наихудший вариант расположения ОВ — на расстоянии $H_5 \leq 13$ м, в этом случае вертикальные смещения крепи достигают 164 мм и, как следствие, возрастают растягивающие напряжения в тубингах и бетоне. На графиках

рис. 12 показаны зависимости смещений крепи ствола от расположения ОВ.

При расчетной необходимости обеспечить сцепление крепи с породой рекомендуется выполнять либо ОВ на расстоянии $H_5 \geq 13$ м, либо частые небольшие углубления (пояса сцепления) по всей протяженной части ствола.

Закключение

В результате численного моделирования различных вариантов конструктивных элементов крепи сопряжения для обеспечения безремонтной работы крепи на весь срок службы выработки ($T = 50$ лет) было установлено:

- толщина податливого слоя в кровле и боках выработок (размеры H_1 и H_1' , рис. 4) должна обеспечивать до 70% сжатия к концу срока службы выработки.

Необходимо дифференцированно подходить к назначению толщины ПС в кровле и боках выработок и/или учитывать в расчетах крепи нарастающую неравномерную нагрузку ближе к концу срока службы выработки;

- необходимость обязательного устройства деформационных (осадочных) швов в крепи ствола над сопряжением снижает на 23% уровень напряжений в тубингах;

- деформационный шов над сопряжением Н2 необходимо располагать под защитой податливого слоя для минимизации краевого эффекта, что позволяет снизить на 73% уровень напряжений в крайнем тубинговом кольце;

- размер деформационного шва должен назначаться на основе расчета ожидаемых относительных деформаций пород околоствольного массива, и в данном случае составляет $H_3 = 215$ мм;

- протяженность податливого слоя H_4 ствола необходимо проектировать минимум на 1,5 м больше сверху и снизу, чем границы самого сопряжения;

- область неблагоприятного расположения ОВ находится непосредственно над сопряжением на расстоянии 10–13 м. Оптимальное расположение опорного венца в схеме узла сопряжения ствола с комплексом загрузки скипов для данных условий составляет $H_5 \geq 13$ м. Это позволяет снизить величину вертикальных смещений крепи на 4,3%, со 164 до 156,5 мм, тем самым уменьшить растягивающие напряжения.

Полученные по результатам настоящей работы выводы и рекомендации по принципиальной конструкции крепи позволяют существенно снизить ожидаемые нагрузки на крепь, подобрать оптимальные типоразмеры тубингов, толщину закрепного бетона и бетона крепи сопряжений.

При проектировании шахтных стволов, пройденных в солях и соленосных породах, рассмотренные выше конструктивные решения будут иметь положительный эффект и для других типов сопряжений (односторонние, двухсторонние и пр.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьев В. А., Аптуков В. Н., Тарасов В. В., Котляр Е. К. Охрана сопряжений шахтных стволов с примыкающими выработками в соляных породах // Горный журнал. — 2017. — № 3. — С. 18–23.

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

3. 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.

4. Лебедева А. С., Манирова Л. А. К вопросу применения минералловатных плит «Тизол-170» для защиты крепи шахтных стволов от проявления горного давления в соляных породах / Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых: материалы XII Всероссийской научно-технической конференции. — Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2019. — С. 317–320.

5. Hentrich N.-A., Calderon D. S., Bock S., Franz J. Limitations of standard analytical methods of shaft liner design / Ground Support 2019: Proceedings of the Ninth International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction. Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2019, pp. 445–458. DOI: 10.36487/ACG_rep/1925_31_Hentrich.

6. Chen K., Peng F. L. An improved method to calculate the vertical earth pressure for deep shield tunnel in Shanghai soil layers // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018, vol. 75, pp. 43–66.

7. Cheng Lyu, Jianfeng Liu, Yi Ren, Chao Liang, Yilin Liao Study on very long-term creep tests and nonlinear creep-damage constitutive model of salt rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2021, vol. 146, article 104873. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104873.

8. Linjian Ma, Yunxiao Wang, Mingyang Wang, Bing Xue, Liqun Duan Mechanical properties of rock salt under combined creep and fatigue // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2021, vol. 141, article 104654. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104654.

9. Gharbi H., Bérest P., Blanco L.-Martín, Brouard B. Determining upper and lower bounds for steady state strain rate during a creep test on a salt sample // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2020, vol. 134, no 1, article 104452. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104452

10. Соловьев В. А., Константинова С. А., Аптуков В. Н. Охрана горных выработок в соляных породах. Теория и практика. — Новосибирск: Наука, 2017. — 264 с.

11. Соловьев В. А., Аптуков В. Н., Ваулина И. Б. Поддержание горных выработок в породах соленосной толщи: Теория и практика. — Новосибирск: Наука, 2013. — 412 с.

12. Морозов И. А., Паньков И. Л., Токсаров В. Н. Изучение устойчивости горных выработок в соляных породах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 9. — С. 36–47. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_36.

13. 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.

14. Ольховиков Ю. П. Крепь капитальных выработок калийных и соляных рудников. — М.: Недра, 1984. — 238 с.

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

REFERENCES

1. Soloviev V. A., Aptukov V. N., Tarasov V. V., Kotlyar E. K. Protection of junctions of mine shafts with adjoining workings in salt formations. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 3, pp. 18–23. [In Russ].

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

3. 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].

4. Lebedeva A. S., Manirova L. A. On the issue of the use of mineral wool plates «Tizol-170» to protect the supports of mine shafts from the manifestation of rock pressure in salt rocks. *Problemy razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh: materialy XII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Problems of development of deposits of hydrocarbon and ore minerals: materials of the XII All-Russian scientific and technical conference], Perm, Izd-vo PNIPU, 2019, pp. 317–320. [In Russ].

5. Hentrich N.-A., Calderon D. S., Bock S., Franz J. Limitations of standard analytical methods of shaft liner design. *Ground Support 2019: Proceedings of the Ninth International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction*. Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2019, pp. 445–458. DOI: 10.36487/ACG_rep/1925_31_Hentrich.

6. Chen K., Peng F. L. An improved method to calculate the vertical earth pressure for deep shield tunnel in Shanghai soil layers. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 75, pp. 43–66.

7. Cheng Lyu, Jianfeng Liu, Yi Ren, Chao Liang, Yilin Liao Study on very long-term creep tests and nonlinear creep-damage constitutive model of salt rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021, vol. 146, article 104873. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104873.

8. Linjian Ma, Yunxiao Wang, Mingyang Wang, Bing Xue, Liqun Duan Mechanical properties of rock salt under combined creep and fatigue. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021, vol. 141, article 104654. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104654.

9. Gharbi H., Bérest P., Blanco L.-Martín, Brouard B. Determining upper and lower bounds for steady state strain rate during a creep test on a salt sample. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020, vol. 134, no 1, article 104452. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104452

10. Solov'ev V. A., Konstantinova S. A., Aptukov V. N. *Okhrana gornyykh vyrabotok v solyanykh porodakh. Teoriya i praktika* [Protection of mine workings in salt rocks. Theory and practice], Novosibirsk, Nauka, 2017, 264 p.

11. Solov'ev V. A., Aptukov V. N., Vaulina I. B. *Podderzhanie gornyykh 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, 2013, 412 p.

12. Morozov I. A., Pankov I. L., Toksarov V. N. Stability of underground openings in salt rock masses. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 9, pp. 36–47. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_36.

13. 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.

14. Ol'khovikov Yu. P. *Krep' kapital'nykh vyrabotok kaliynykh i solyanykh rudnikov* [Support for capital workings of potash and salt mines], Moscow, Nedra, 1984, 238 p.

15. Sergeev S. V. *Vliyanie prokhodki vyrabotok sopryazheniya na napryazhennoe sostoyanie krep'i stvola v razdroblennom massive okolostvol'nykh porod* [Influence of penetration 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,
ORCID ID: 0000-0002-4575-7328.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Yu.A. Kirienko, Graduate Student,
Information Technology Department,
National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia, e-mail: 9267810740@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-4575-7328.

Получена редакцией 07.12.2021; получена после рецензии 25.01.2022; принята к печати 10.05.2022.
Received by the editors 07.12.2021; received after the review 25.01.2022; accepted for printing 10.05.2022.

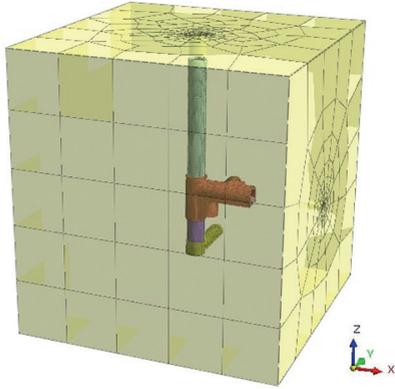


Рис. 1. Расчетная модель
Fig. 1. Analytical model

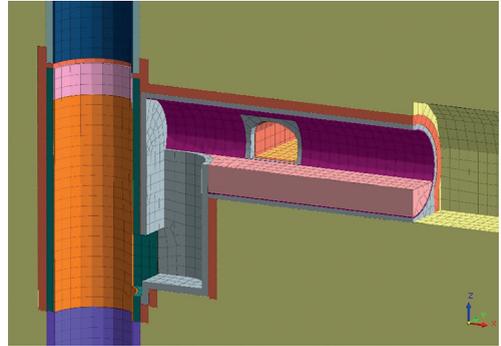


Рис. 2. Фрагмент расчетной модели сопряжения ствола с комплексом загрузки скипов
Fig. 2. Fragment of analytical model of tunnel and shaft intersection with skip loading facility

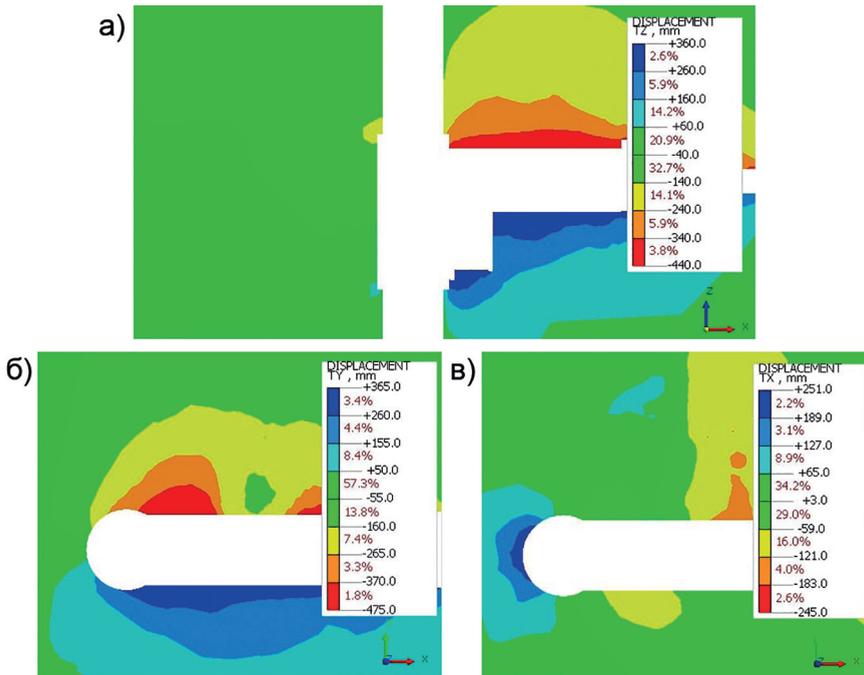


Рис. 3. Изополя смещений породного контура выработок в области сопряжения для времени $T = 50$ лет: вертикальное по оси Z (а); горизонтальное по оси Y (б); горизонтальное по оси X (в)
Fig. 3. Isofields of displacements of tunnel boundaries at intersection for time $T = 50$ years: vertical displacement along Z (a); horizontal displacement along Y (b); horizontal displacement along X (v)

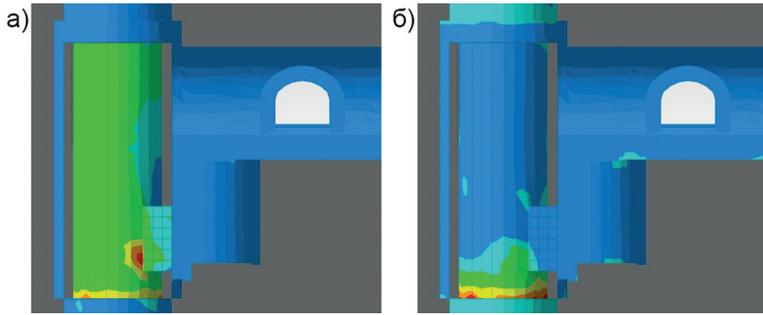


Рис. 7. Фрагмент расчетной области. Напряжения в крепи ствола в зоне сопряжения: горизонтальный ДШ не предусмотрен (а); с горизонтальным ДШ (б)

Fig. 7. Fragment of computational domain. Stresses in shaft support at intersection with tunnel: no (not necessary) horizontal movement joint (MJ) (a); with horizontal MJ (b)

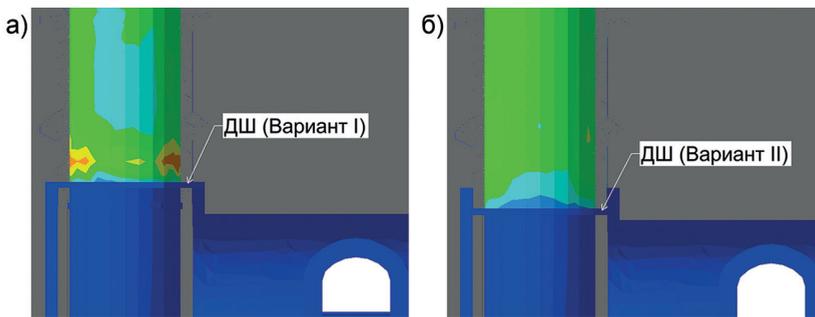


Рис. 8. Фрагмент расчетной области. Напряжения в крепи ствола в зоне сопряжения. Горизонтальное сечение ствола на уровне сопряжения: ДШ (вариант I) (а); ДШ (вариант II) (б)

Fig. 8. Fragment of computational domain. Stresses in shaft support at intersection with tunnel. Horizontal section of shaft at the level of intersection with tunnel: MJ (variant I) (a); MJ (variant II) (b)

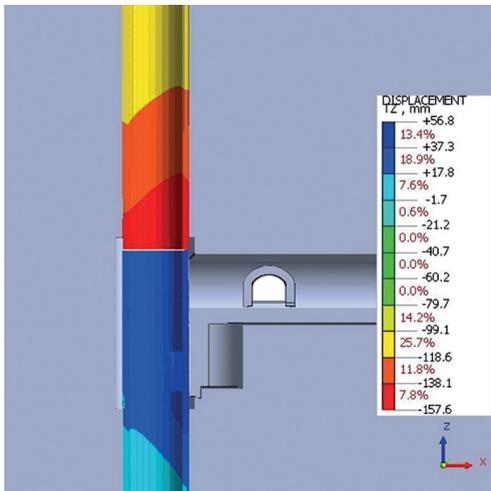


Рис. 9. Вертикальные смещения крепи ствола в зоне сопряжения

Fig. 9. Vertical displacements in shaft support at intersection with tunnel



Область А — дальняя от сопряжения сторона крепи
Область Б — ближняя от сопряжения сторона крепи
 H_5 — высота расположения ОВ над сопряжением

Рис. 11. Фрагмент расчетной области. Ствол в окрестности сопряжения

Fig. 11. Shaft at intersection