© А.Н. Воробьёв, С.С. Дьячков, 2006

УДК 622.283

А.Н. Воробьёв, С.С. Дьячков

КОНСТРУКЦИЯ КРЕПИ ШАХТНОГО СТВОЛА ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ И ЕЕ РАСЧЕТ В ВИДЕ ТОНКОЙ ОБОЛОЧКИ И ПО ПРОГРАММЕ COSMOS/M

Семинар № 15

В соответствии с ранее проведёнными исследованиями напряжённо-деформированного состояния крепи шахтного ствола в виде круговой цилиндрической оболочки [2] установлено, что снижение материалоёмкости рассматриваемой конструкции возможно обеспечить при периодическом вдоль выработки умень-шении толщины крепи. Данное изменение толщины крепи обосновывается перераспределением напряжений в тонкой части конструкции в продольном и окружном направлениях, когда в продольном направлении напряжения возрастают, а в окружном - уменьшаются, что их выравнивает и делает меньшими по абсолютному значению.

В работе [2] было предложено два варианта крепи - с периодически изменяющимся внешним и внутренним диаметром ствола. На крепь с периодически изменяющимся внешним диаметром ствола было получено авторское свидетельство № 945451, что подтверждает новизну проведённых исследований.

Однако с практической точки зрения выполнить крепь с переменным внешним диаметром достаточно сложно из-за необходимости точного оконтуривания выработки при двух паспортах буровзрывных работ.

Более технологичной является крепь с периодически изменяющимся внутренним диаметром ствола. Возведение такой крепи выполняется с применением опалубки переменного поперечного сечения с увеличением диаметра сверху вниз. Вариант такой крепи показан на рис. 1.

Крепь представляет собой чередующиеся участки большей толщины “h” с длиной “l” и меньшей толщины “h’“ с длиной ”l’”. Большая толщина крепи определяется по известным методам - по плоской расчётной схеме в виде кольца. Меньшая толщина крепи определяется на основе метода расчёта крепи в виде круговой цилиндрической оболочки [1, 2].

При этом за расчётную нагрузку принята нормально распределённая составляющая нагрузки $Z(\xi,\theta)$, изменяющаяся в поперечном сечении по закону косинуса двойного угла.

Для определения возникающих в тонких участках крепи усилий (изгибающих моментов, продольных сил) составляющая нагрузки $Z(\xi,\theta)$ разлагается в двойной ряд Фурье. При принятии коэффициента неравномерности нагрузки $\omega = \frac{z_4}{z_0}$ равным 0,1, что соответствует

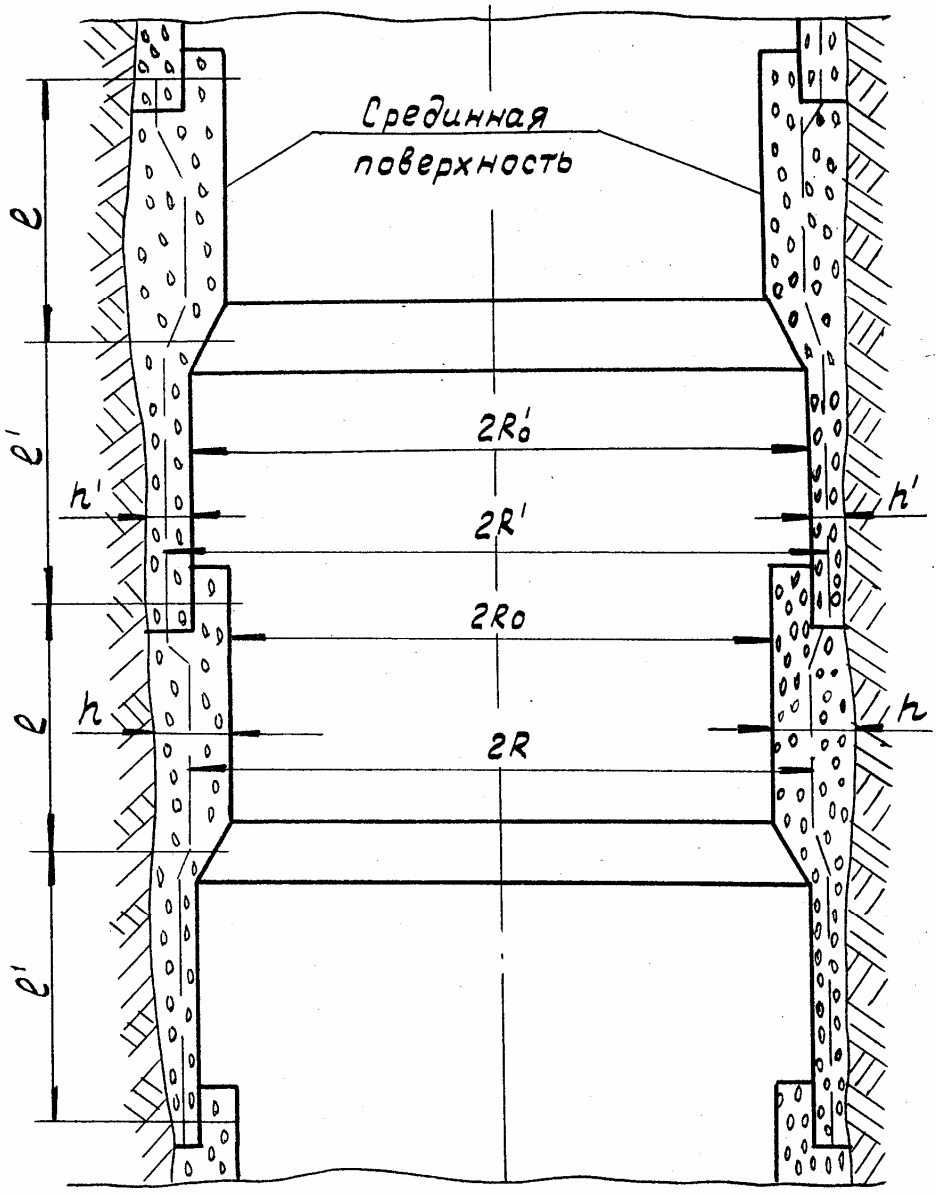

Рис. 1. Конструкция крепи с переменным внутренним диаметром (вариант 1)

подходу Г. Линка [3], разложение нагрузки в

$$Z(\xi,\theta) = z_{10} * Sin\frac{\pi\xi R}{l} * (1 + 0,1 * Cos2\theta),$$

где $\xi = \frac{x}{R}$ - безразмерная координата по образующей выработки; z_{10} - коэффициент разложения нагрузки в двойной ряд Фурье ($z_{10} \approx q$)

$X(\xi) = Sin\frac{\pi\xi R}{l}$ - балочная фундаментальная функция.

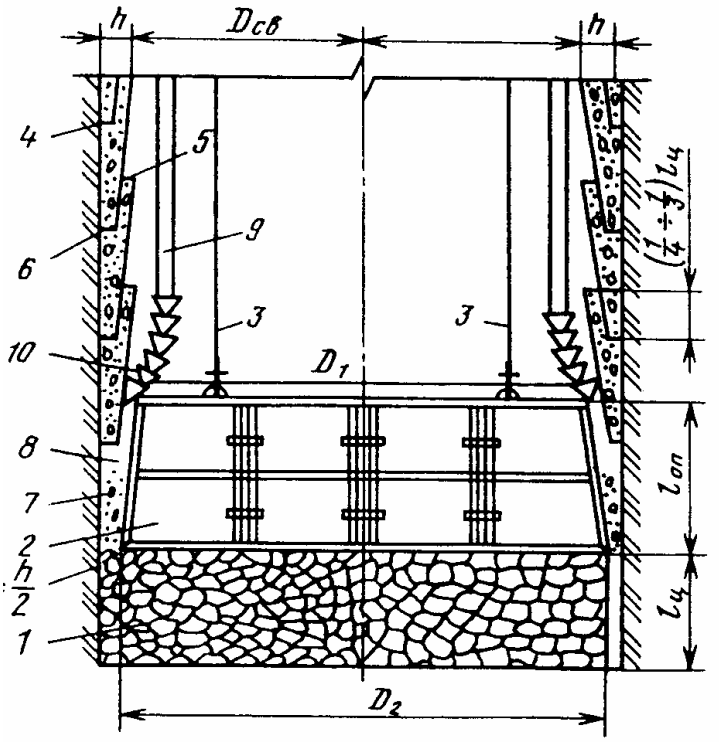

Рис. 2.1

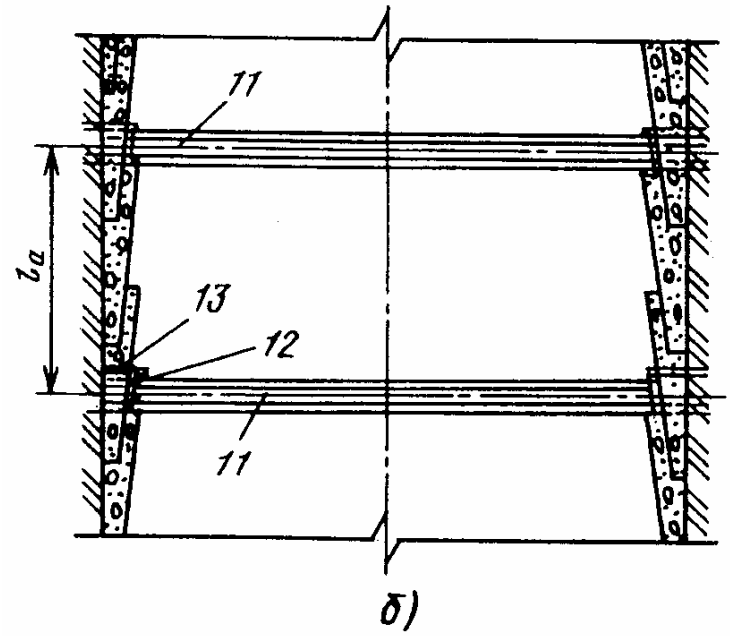

Рис. 2.2

Рис. 2. Способ сооружения вертикальных стволов (вариант 2)

двойной ряд Фурье выражается в следующем виде:

Усилия в тонких участках крепи определяются по формулам таблицы 2.1., а их коэффициенты разложения - по формулам (2.5) и (2.6) работы [2].

Расчётными напряжениями этих участков крепи являются нормальные по дуге поперечного сечения σ(ξ,θ). Они вычисляются по формулам внецентренного сжатия.

Проведённый расчёт показал, что наибольшая несущая способность тонких участков крепи будет при отношении их длины к радиусу срединной поверхности крепи равным единице - $\frac{l}{R} = 1$.

Установленные зависимости толщины h толстых и h' тонких участков крепи от величины действующей нагрузки приняты линейными, так как работа крепи происходит в упругой стадии. Из сравнения этих зависимостей следует, что с приемлемой точностью для практических расчётов возможно считать толщину толстых участков в два раза большей толщины тонких участков крепи, то есть h=2*h'. Сооружение шахтных стволов с периодически уменьшающейся толщиной крепи даёт уменьшение её материалоёмкости до 30 % с сохранением расчётной несущей способности. При всех достоинствах конструкции крепи по рис. 1 она также не лишена недостатков, связанных с усложнением выполнения опалубки и её отрывом от бетона.

Для устранения указанных недостатков был разработан способ сооружения вертикальных шахтных стволов с применением конической опалубки.

Разработанный способ поясняется рис. 2, где на рис. 2.1 показан продольный разрез ствола в процессе возведения монолитной бетонной крепи, а на рис. 2.2 - установка и закрепление расстрелов армировки шахтного ствола.

Способ осуществляется следующим образом.

Проходка ствола производится буровзрывным способом. При этом сначала в соответствии с паспортом БВР бурятся шпуры, выполняется их заряжание и взрывание. Разрушение породы *1* происходит на величину заходки lц (рис. 2.1).

С предыдущей заходки опалубку *2* устанавливают на взорванную породу *1*, выравнивают и центрируют. Опалубка является передвижной, например, подвешенной на канатах *3* специальной подъёмной машины.

По конструкции она может быть створчатой или секционной в зависимости от вида механизма отрыва от бетона.

Опалубку *2* выполняют конической формы с увеличением диаметра сверху вниз на толщину h крепи *4* в верхней части заходки. Данная толщина h крепи *4* равна проектной при её постоянной толщине, определённой расчётом в соответствии с существующими нормативными документами. В соответствии с этим толщина крепи каждой заходки будет уменьшаться от h в её верхней части до h/2 в нижней. Возможность такого умень-шения доказана предыдущим расчётом, при этом несущая способность крепи равна несущей способности крепи постоянной толщины, а мате-риалоёмкость на 20-30 % меньше.

Наружный диаметр D_1 опалубки 2 в её верхней части принимают равным диаметру сечения ствола в свету - Dсв (рис. 2.1), поэтому диаметр опалубки 2 в её нижней части равен D_2 = =D_1+h = Dсв+h.

Верх опалубки *2* устанавливают выше низа крепи 4 предыдущей заходки на 1/4-1/3 часть её величины lц, а бетони-

рование в данной части производят с нахлестом бетона смежных заходок с образованием внутренних уступов 5 по периметру поперечного сечения ствола. Величина нахлеста в 1/4 - 1/3 часть величины lц заходки принята из условия обеспечения достаточной надежности заделки крепи предыдущей заходки в крепь последующей, что важно для выполнения условия пространственной работы крепи. Кроме этого, данный нахлест ликвидирует открытые технологические швы, неизбежно возникающие при сопряжении смежных заходок, которые ослабляют и разгерметизируют конструкцию крепи при обычной технологии производства работ.

Для обеспечения величины lц заходки, определяемой как расстояние между уступами *5* или нижними концами *6* крепи *4* заходок (рис. 2.1), высоту опалубки *2* lоп принимают равной сумме величины lц заходки и величины нахлеста в 1/4 - 1/3 часть lц, то есть она равна lоп = (5/4 - 4/3)*lц. Технология бетонирования не отличается от общепринятой, при этом бетонная смесь *7* может, например, подаваться в заопалубочное пространство *8* по трубам *9* и гибким рукавам *10*. Укладку бетонной смеси *7*, включая её вибрирование, осуществляют до полного заполнения заопалубочного пространства *8* с образованием внутренних уступов *5*.

После укладки бетонной смеси *7* производят её выдержку до затвердения и набора начальной прочности. Время выдержки определяется продолжительностью остальных проходческих процессов цикла, выполняемых последовательно с процессом бетонирования. Для ускорения схватывания целесообразно применение различных добавок либо быстротвердеющих цементов.

Одновременно с процессом бетонирования при наличии поддонов в нижнем торце опалубки либо последовательно с данным процессом осуществляют уборку породы 1 (на рисунке не показано). После уборки породы производят бурение шпуров новой заходки, заряжание, взрывание и процессы повторяют.

Одновременно с проходкой либо после проходки и крепления шахтного ствола, когда это предусмотрено проектом, выполняют работы по его армировке. При этом работы по армировке начинают с установки расстрелов *11* (рис. 2.2).

В соответствии с данным способом расстрелы *11* устанавливают на уступах *5*, что значительно проще, быстрее и безопаснее, чем их заделка в лунках или на кронштейнах. Кроме того, схема расположения расстрелов может быть любая, так как уступы *5* выполняются по всему периметру поперечного сечения ствола. Для надёжного закрепления расстрелов *11* на уступах *5* можно использовать приваренные к торцам расстрелов 11 кронштейны *12* в виде, например, соответствующих уголков и анкеров *13*. Для расположения расстрелов *11* на уступах *5* величину lц заходки принимают равной целой части от шага la установки расстрелов (рис. 2.2). При рельсовых проводниках la равно 3,125 или 4,168 м, при проводниках из металлических профилей - 4 или 6 м. Целесообразная величина заходки, определяемая паспортом буровзрывных работ в соответствии с горно-геологическими условиями и технологией проходки, соответственно равна: 3,125 м, 2,084 м, 4,168 м, 4 м, 2 м, 3 м, 6 м.

Выполнение крепи с переменным внутренним диаметром в соответствии с разработанным способом особых трудностей не вызывает. Единственное отличие от обычного совмещённого способа проходки состоит в конструкции

опалубки и бетонировании верхней части заходки.

Расчёт данной конструкции крепи на основе точного решения теории тонких оболочек [1, 2] затруднён из-за линейной переменности толщины крепи по участкам (рис. 2). Применение современной программы расчёта сплошных конструкций COSMOS/M, основанной на методе конечных элементов, устраняет данные трудности введением соответствующих граничных условий.

При расчете использовалась программа COSMOS/M, хорошо зарекомендовавшая себя для решения широкого класса задач механики сплошной среды.

В программе используется метод конечных элементов в форме метода перемещений.

В основе метода лежит интерполяционное соотношение, посредством которого вектор перемещений в точке элемента выражается через перемещения узлов элемента $\{\delta\}$:

$$\{f\} = [N]\ \{\delta\},$$

где [N]- матрица формы, компоненты которой являются функциями положения.

Деформации, таким образом, связаны с перемещениями узлов элемента:

$$\{\varepsilon\} = [B]\ \{\delta\},$$

где [B]- матрица деформации.

Напряжения и деформации в точке задаются соотношением:

$$\{\sigma\} = [D]\ (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}) + \{\sigma_0\},$$

где [D]- матрица, содержащая характеристики материала.

Подставив введенные зависимости в уравнение равновесия, получаем основную систему метода конечных элементов:

$$K\{U\} + \{R\} = 0,$$

где {U} - вектор перемещений узлов конечноэлементной модели; [K] - матрица жесткости; {R} - вектор нагрузок.

Вектор нагрузок представляет собой суперпозицию векторов различных силовых воздействий:

$$\{R\}=\{F\}_p+\{F\}_g+\{F\}_{\varepsilon 0}+\{F\}_{\sigma 0}-\{R\}_i,$$

$\{F\}_p= -\int_V [N]^T\{p\}dV$ - вектор узловых усилий, эквивалентных воздействию объемных сил; $\{F\}_g= -\int_S [N]^T\{p\}dS$ - вектор сил от давления; $\{F\}_{\varepsilon 0} = -\int_V [B]^T[D]\{\varepsilon_0\}dV$ - вектор сил от начальных деформаций; $\{F\}_{\sigma 0} = -\int_V [B]^T\{\sigma_0\}dV$ - вектор сил от начальных напряжений; {R} - вектор сосредоточенных нагрузок, приложенных к узлам.

Система содержит n уравнений, где n - общее число степеней свободы конечноэлементной дискретной модели. В общем случае эта система нелинейная.

Расчет конструкции проводился в предположении осесимметричного напряженно- деформированного состояния. При расчете осесимметричных тел из шести компонент тензоров деформаций и напряжений рассматриваются только четыре. Вектора деформаций и напряжений записываются в цилиндрической системе координат.

Деформации:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{r\theta} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dfrac{\partial w}{\partial z} \\ \dfrac{\partial u}{\partial r} \\ \dfrac{\partial v}{\partial \theta} \\ \dfrac{\partial u}{\partial \theta} + \dfrac{\partial v}{\partial r} \end{Bmatrix}$$

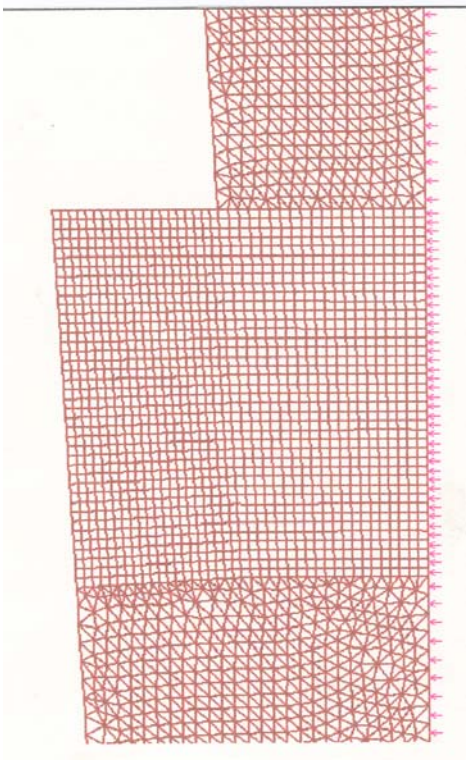

Рис. 3. Расчетная схема сопряжения заходок крепи с разбиением конструкции на конечные элементы

Напряжения связаны с деформациями посредством соотношения:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \tau_{r\theta} \\ \sigma_z \end{Bmatrix} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & \frac{\nu}{1-\nu} \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 & \frac{\nu}{1-\nu} \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{r\theta} \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix}$$

При выводе результатов особое внимание уделялось компонентам тен-зора главных напряжений σ_1 и σ_3 – максимальному растяжению и максимальному сжатию, соответстненно.

Крепь шахтного ствола в виде осесимметричной цилиндрической оболочки постоянной толщины на осесимметричную радиальную нагрузку легко рассчитать по формуле Ламе [4]:

$$\sigma_{ħ} = \frac{p \cdot b^2}{b^2 - a^2} \cdot (1 - \frac{a^2}{b^2})$$

$$\sigma_t = \frac{p \cdot b^2}{b^2 - a^2} \cdot (1 + \frac{a^2}{b^2}),$$

где $\sigma_к$ и σ_t - радиальное и тангенциальное напряжения в крепи-оболочке, Па; p-радиальная постоянная нагрузка на крепь, Па; a и b- внутренний и внешний радиусы крепи-оболочки, м.

Как видно из формул, наибольшие радиальные сжимающие напряжения действуют на внутреннем контуре крепи, а наибольшие тангенциальные сжимающие напряжения - на внешнем. Опасными являются тангенциальные напряжения, т.к. их наибольшая величина в 2 раза превосходит наибольшую величину радиальных напряжений.

При p = 0,5 МПа, a = 4 м и b = 4,5 м получим следующие значения наибольших напряжений:

$\sigma_{r\,max}$ = 2,38 МПа = 2,38*10^6 Па,

$\sigma_{t\,max}$ = 4,76 МПа = 4,76*10^6 Па.

Для разработанной крепи по рис. 2 сложной конфигурации расчёт выполнен, как указывалось, по программе COSMOS/M.

Сначала расчёт выполнялся на заданную нагрузку p = 0,5 МПа.

На рис. 3 показана расчётная схема сопряжения заходок крепи, где компьютер по программе выполнил разбиение конструкции на конечные элементы, используемые в расчёте.

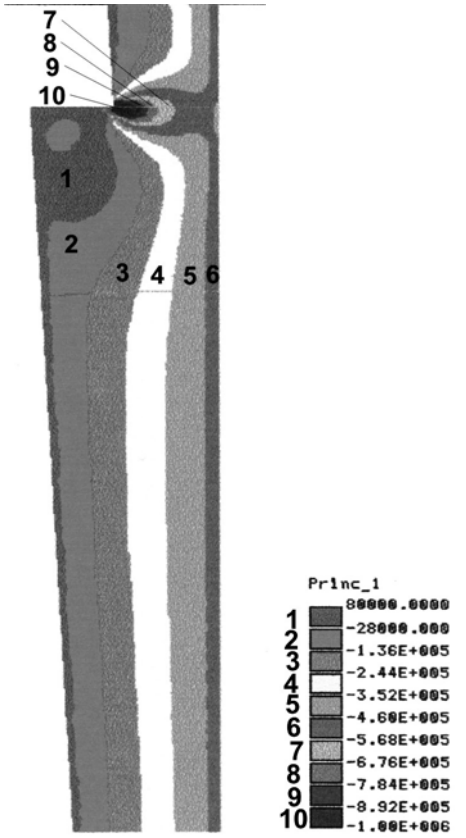

Рис. 4. Эпюра нормальных радиальных напряжений в крепи при расчёте на заданную нагрузку

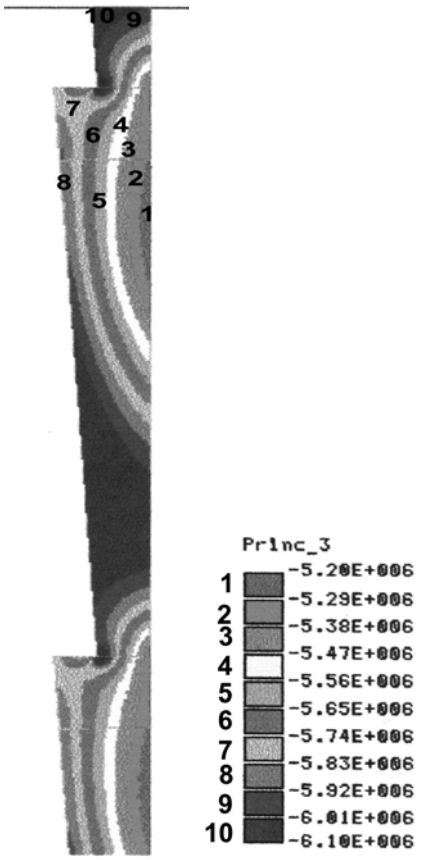

Рис. 5. Эпюра нормальных тангенциальных напряжений в крепи при расчёте на заданную нагрузку

На рис. 4 и 5 показаны полученные в результате расчёта цветные эпюры нормальных радиальных и тангенциальных напряжений в крепи.

Из рис. 4 видно, что наибольшие радиальные сжимающие напряжения сосредоточены к замкнутой области в углу сопряжения заходок и равны 1 МПа = $1*10^6$ Па. На внутреннем контуре крепи появились незначительные растягивающие напряжения, равные 80000 Па = 0,08 МПа.

Из рис. 5 видно, что наибольшие тангенциальные напряжения сосредоточены практически по всей толщине тонкой части заходки и равны $6{,}1*10^6$ Па = 6,1 МПа.

Расчёт данной сложной конструкции с применением точного метода механики сплошной среды показал, что при периодическом изменении по линейному закону толщины крепи по сравнению с крепью постоянной толщины максимальные радиальные напряжения уменьшаются в 2,38 раза, а максимальные тангенциальные - возрастают в 1,28 раза.

Однако при принятом коэффициенте запаса *2* конструкцию постоянной толщины и предложенную можно считать

Рис. 6. Эпюра нормальных радиальных напряжений в крепи при расчёте с учётом взаимодействия крепи с породным массивом

равнопрочными, т.е. прежние выводы сохраняются.

Кроме расчёта на заданную нагрузку по программе COSMOS/M проводился расчёт с учётом взаимодействия крепи с породным массивом.

На рис. 6, 7, 8 показаны эпюры нормальных радиальных, тангенциальных и продольных напряжений. Конструкция крепи при этом показана в деформированном состоянии.

Максимальные радиальные сжимающие и растягивающие напряжения носят локальный характер и сосредоточены на границе контакта заходок (рис. 6). Их значения равны, соответственно, 0,2 МПа и 0,49 МПа.

Максимальные сжимающие тангенциальные напряжения сосредоточены на внутреннем контуре крепи и равны 0.92 МПа, при этом напряжения в крепи и массиве выравниваются, Наименьшие напряжения в расчётной зоне массива пород равны 0,75 МПа.

Найденные продольные напряжения, действующие вдоль ствола, как и предполагалось, незначительны и рав-ны $\sigma_{max\ сж}$= 0,34 МПа, $\sigma_{max\ p}$= 0,055 МПа.

На всех эпюрах между участками заходок в результате деформирования виден просвет, перекрывающийся

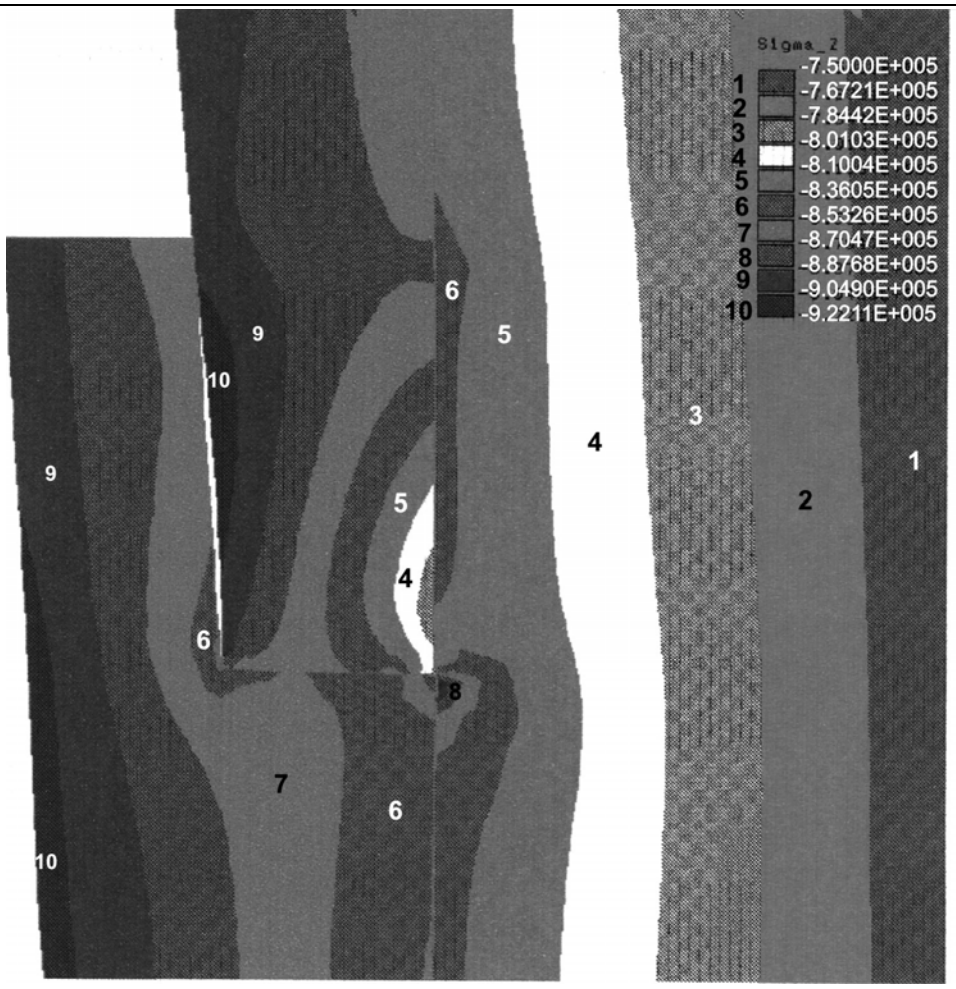

Рис.7. Эпюра нормальных тангенциальных напряжений в крепи при расчёте с учетом взаимодействия крепи с породным массивом

сверху и снизу, что подтверждает повышенную водонепроницаемость предложенного технического решения.

Таким образом, проведённые расчеты крепи с периодически изменяющейся по длине ствола толщиной, выполненные на основе теории тонких оболочек и как сплошной среды на основе метода конечных элементов по программе COSMOS/M, показали целесообразность такого изменения толщины, что при равнопрочности конструкций по сравнению с крепью постоянной толщины даёт возможность уменьшить затраты бетона до 30%.

Наиболее точный расчёт, учитывающий взаимодействие крепи с породным массивом, показал выравнивание напряжений и уменьшение максимальных, что, с одной стороны, ещё раз подтверждает выполненные исследования, с другой, говорит о целесообразности использования именно таких методов. Расчёт по программе COSMOS/M каких либо трудностей использования данного подхода не вызывает.

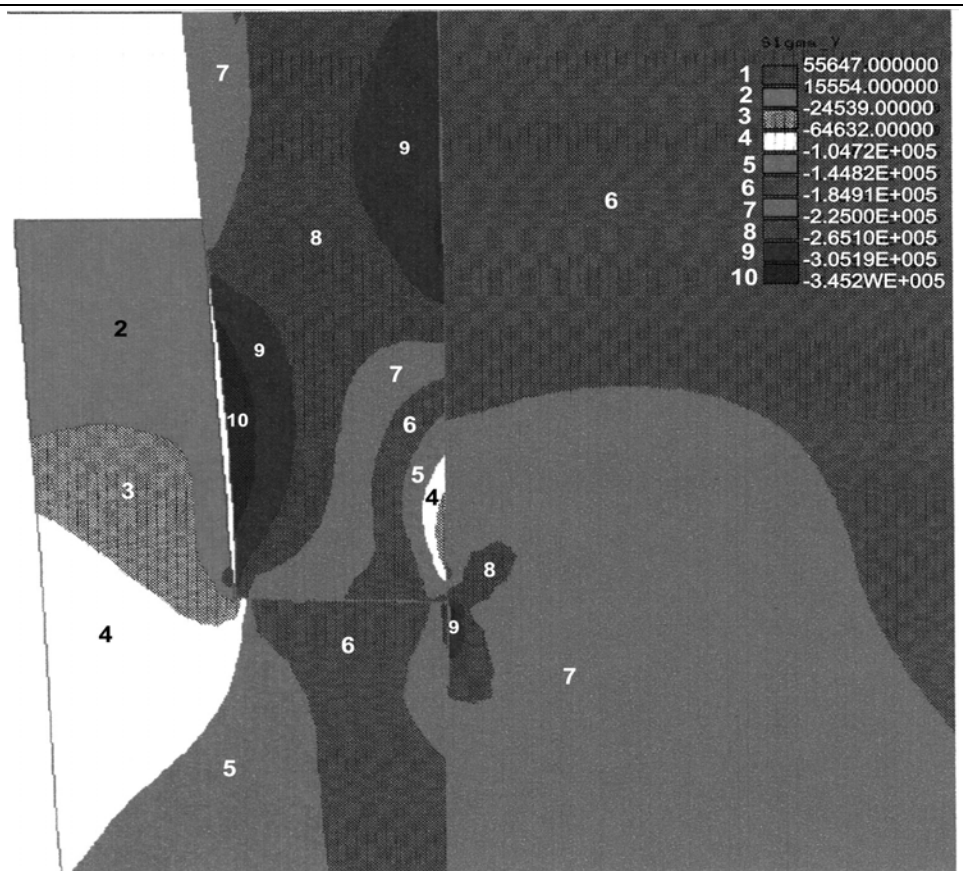

Рис. 8. Эпюра нормальных продольных напряжений в крепи при расчёте с учётом взаимодействия крепи с породным массивом

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Власов В.З.* Строительная механика оболочек. - М.-Л.: ОНТИ, 1936.

2. *Воробьёв А.Н.* Обоснование и разработка методов расчёта и совершенствования конструкций крепей горных выработок на основе теорий арочных систем и тонких оболочек. Дисс. докт. техн. наук. М., МГГУ, 1993.

3. *Link H.* Uber die Bemessung des Schachtausbaus und seine Beanspruchung durch Abbauwirkungen. - Bergbau - Archiv, 1955, Bd. 16, H.1, s. 1-23.

4. *Феодосьев В.И.* Сопротивление материалов. - М.: Наука, 1974.

Коротко об авторах

Воробьёв А.Н. – профессор, доктор технических наук,
Дьячков С.С. –

Московский государственный горный университет.