

УДК 522.272

**С.А. Масленников, Д.И. Шинкарь**

## **РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ ДАВЛЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА КРЕПЬ С УПРАВЛЯЕМЫМ РЕЖИМОМ РАБОТЫ**

*Рассмотрены закономерности формирования напряжений в многослойной крепи с внутренним фильтрующим слоем от гидростатического давления. Приведены полученные зависимости для определения величины давления подземных вод на крепь с управляемым режимом работы*

*Ключевые слова: комбинированная крепь, вертикальный ствол, горное давление, гидростатическое давление.*

---

Усложнение условий строительства вертикальных стволов, а также ужесточение требований заказчиков к их надежности привело к более широкому использованию при креплении чугунных тубингов. В последние годы этот тип крепи был использован при строительстве вентиляционных стволов на рудниках «Таймырский» и «Скалистый» ГМК Норильский Никель, пяти стволов на рудниках «Мир» и «Удачный» компании «Алроса», ствола шахты «Северная Вентиляционная №2» Гайского ГОКа, скипового и клетового стволов на Гремячинском месторождении калийных солей компании ОАО «Еврохим», двух стволов пятого калийного рудника ОАО «Уралкалий».

За рубежом чугунные тубинги ранее имели широкое применение. Но на новейшем этапе данный тип крепи потерял своё былое значение и применяется редко, а за последние 20-25 лет - примеров его использования не отмечено. Это обусловлено повышением требований к водонепроницаемости, а также малой податливостью чугунно-бетонной крепи. Наличие большого количества швов не позволяет выполнить их достаточно качественную гидроизоляцию и приводит к наличию остаточного водопритока, а, например, в воздухоподающих стволах периодические колебания температуры имеют следствием «раскрытие» швов и значительное ухудшение водонепроницаемости.

За рубежом на смену чугунным тубингам пришли сталебетонные крепи. Например, крепь со слоем скольжения, или внутренняя стальная оболочка с заполнением закрепного пространства цементно-песчаным раствором.

Значительный опыт эксплуатации стволов закрепленных чугунными тубингами в России также выявил ряд недостатков, важнейшие из которых – высокая стоимость, нерациональное использование материалов, невозможность обеспечения полной гидроизоляции. С ростом объёмов строительства стволов с чугунно-бетонной крепью перечисленные недостатки ведут ко всё более негативным последствиям. Это заставляет искать новые способы надёжного и экономически эффективного поддержания вертикальных стволов.

В трудах специалистов ЗАО «ВНИИ Галургии», занимающихся проектированием калийных рудников, авторы приходят к выводу о том, что «...возможности совершенствования тубинговой крепи практически исчерпаны, что обуславливает необходимость перехода на сплошные (сталебетонные) крепи».

Президент ОШК «Союзспецстрой» Паланков И.М. делает вывод о перспективности применения сталебетонной крепи в России, а также отмечает, что, необходимы дальнейшие исследования и отмечает, что «перспективы повышения эффективности крепления глубоких стволов прежде всего, связаны ... с переходом к инновационным технологиям крепления, основанным на комплексном учете влияющих факторов и условий».

Но традиционные подходы к проектированию крепей оставляют только путь дальнейшего роста несущей способности и материалоемкости. Существующие методы расчета предполагают восприятие давления воды водонепроницаемым слоем, давления пород – слоем бетона. Т.е. крепь не работает как единая конструкция.

Возможным выходом является включение в работу и максимальное использование несущей способности вмещающего массива и зоны искусственно уплотненных пород. С увеличением глубины отработки отмечается тенденция повышения прочности и устойчивости массива. В предыдущих работах авторами была предложена конструкция крепи с регулируемым режимом работы [1,2]. Открытым оставался вопрос о расчете напряжений возникающих в такой крепи, предлагаемая методика расчета изложена ниже.

В основу расчета положена методика, рекомендованная в [3] и детально разработанная Булычёвым Н.С. [4].

Давление подземных вод  $P_r$  на фильтрующую крепь при наличии 2-3 слоев (крепь - затампированные породы – породы) может быть определено по формуле, приводимой в [3]. Для расчета многослойной крепи (4-5 слоев) с ненулевым коэффициентом фильтрации внутреннего слоя стали требуется внесение изменений. Анализируя зависимость (16) [3], можно заключить:

1. Давление подземных вод при их фильтрации через многослойное кольцо распределяется между каждым из составляющих слоев пропорционально его геометрическим и фильтрационным характеристикам.

Т.е. при двухслойном кольце

$$P_{r\text{общ}} = P_{r1} + P_{r2},$$

при трехслойном кольце

$$P_{r\text{общ}} = P_{r1} + P_{r2} + P_{r3},$$

где  $P_{r1}, P_{r2}, P_{r3}$  - давление, воспринимаемое 1, 2, 3-м слоем.

$$2. P_r = f \left( k_{\phi}^{sp}, k_{\phi}^T, k_{\phi}^n, \lg \frac{r_1}{r_0}, \lg \frac{r_T}{r_1}, \lg \frac{R(t)}{r_T} \right).$$

Здесь и далее обозначения те же, что и в [3]).

Из положения 2 заключаем: если рассмотреть трехслойное и двухслойные кольца с идентичными фильтрационными характеристиками слоев 1 и 1', 3 и 3' (т.е.  $k_{\phi1}^{sp} = k_{\phi2}^{sp} = k_{\phi}^{sp}, k_{\phi1}^n = k_{\phi2}^n = k_{\phi}^n$ ), для которых выполняется условие

$$\frac{\lg \frac{r_1}{r_0}}{\lg \frac{r_3}{r_2}} = \frac{\lg \frac{r_1'}{r_0}}{\lg \frac{r_3'}{r_1'}}, \text{ то нагрузка, воспринимаемая слоем 2 в трехслойном кольце,}$$

перераспределяется в двухслойном между слоями 1' и 3', и при этом сохраняется зависимость

$$\frac{P_{\Gamma 1}}{P_{\Gamma 3}} = \frac{P'_{\Gamma 1}}{P'_{\Gamma 3}}$$

Принимая также величины  $H_e, \gamma_e$  равными для обоих случаев, составляем систему уравнений, связывающую их показатели:

$$\begin{cases} P_{\Gamma} = P'_{\Gamma 1} + P'_{\Gamma 3} \\ P_{\Gamma} = P_{\Gamma 1} + P_{\Gamma 2} + P_{\Gamma 3} \\ \frac{P_{\Gamma 1}}{P_{\Gamma 3}} = \frac{P'_{\Gamma 1}}{P'_{\Gamma 3}} \end{cases} \quad (1)$$

Находя из приведенной системы значение  $P_{\Gamma 2}$  и деля его на  $P_{\Gamma 1}$  получаем формулу для нахождения  $P_{\Gamma 2}$  в рекуррентном виде:

$$P_{\Gamma 2} = P_{\Gamma 1} \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{k_{\phi}^1}{k_{\phi}^2} \cdot \frac{\lg \frac{r_2}{r_1}}{\lg \frac{r_1}{r_0}} \quad (2)$$

Аналогичным образом из приведенной системы уравнений (1) можно получить формулы для определения  $P_{\Gamma 3}, P_{\Gamma 4}$ . Отметим, что при  $n=1$  значение, рассчитанное по формуле (2) совпадает со значением, полученным по формуле 5.46, приводимой проф. Булычевым Н.С. [4].

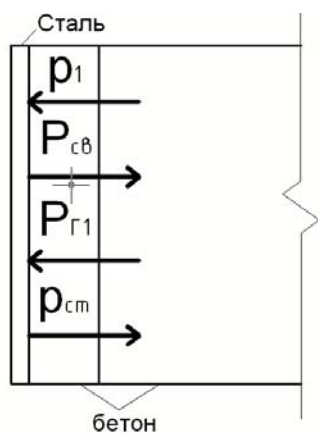
Для общего случая пятислойного кольца (стальная оболочка - слой бетона с повышенными водопроницаемыми свойствами - слой тяжелого бетона – затампированные породы – породы в естественном состоянии) формула для расчета нагрузки от давления подземных вод на первый слой примет вид:

$$P_{\Gamma 1} = \frac{n \cdot H_e \cdot \gamma_e \cdot \lg \frac{r_1}{r_0}}{\lg \frac{r_1}{r_0} + \frac{k_{\phi}^1}{k_{\phi}^2} \cdot \lg \frac{r_2}{r_1} + \frac{k_{\phi}^1}{k_{\phi}^3} \cdot \lg \frac{r_3}{r_2} + \frac{k_{\phi}^1}{k_{\phi}^4} \cdot \lg \frac{r_4}{r_3} + \frac{k_{\phi}^1}{k_{\phi}^5} \cdot \lg \frac{r_5}{r_4}}, \text{ кПа.} \quad (3)$$

В данной формуле неизвестным остается коэффициент  $k_{\phi}^1$ , характеризующий, в нашем случае, проницаемость для воды слоя стали (через регулирующие элементы). Его величина является функцией ряда параметров, и в том числе  $P_{\Gamma 1}$ :

$$k_{\phi}^1 = \frac{\lg \frac{r_1}{r_0} \cdot \left( \frac{H_e}{P_{\Gamma 1}} - 1 \right)}{\frac{1}{k_{\phi}^2} \cdot \lg \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{k_{\phi}^3} \cdot \lg \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{k_{\phi}^4} \cdot \lg \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{k_{\phi}^5} \cdot \lg \frac{r_5}{r_4}}, \text{ м/сут.}$$

Таким образом, мы приходим к циклической ссылке. Для решения возникшего затруднения были введены дополнительные условия (см. рисунок).



**Нагрузки на слой стали:**  $p_1$  – доля давления от пород передаваемая на слой стали,  $P_{св}$  – давление, возникающее на контакте металлической оболочки с бетоном и воспринимаемое связями (анкерами), МПа;  $p_{сr}$  – сопротивление стали деформациям

$$p_1 + P_{Г1} - P_{св} - p_{сr} = 0 \text{ или} \\ P_{Г1} = P_{св} + p_{сr} - p_1$$

где  $p_{сr}$  примем равным  $P_{сr}$  – критическое значение внешнего гидростатического давления, при превышении которого оболочка отрывается от бетона и теряет устойчивость выпучиванием.

Далее, чтобы отличать любое возможное значение гидростатического давления на слой стали  $P_{Г1}$  от максимально допустимого, которое в нашем случае является давлением сброса, обозначили его как  $P_{сб}$ . Коэффициент фильтрации слоя обозначили как  $k_{\phi}^{im}$  (от нем. *imagindt*) и в дальнейшем его именуем мнимым коэффициентом фильтрации. В этом случае:

$$k_{\phi}^{im} = \frac{\lg \frac{r_1}{r_0} \cdot \left( \frac{H_e}{P_{св} + P_{сr} - p_1} - 1 \right)}{\frac{1}{k_{\phi}^2} \cdot \lg \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{k_{\phi}^3} \cdot \lg \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{k_{\phi}^4} \cdot \lg \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{k_{\phi}^5} \cdot \lg \frac{r_5}{r_4}}, \text{ м/сут.} \quad (4)$$

$P_{св}$  определяем по формуле:

$$P_{св} = S \cdot R_s.$$

где  $S$  – площадь анкеров, приходящаяся на 1 м<sup>2</sup> поверхности оболочки, м<sup>2</sup>;  $R_s$  – расчетное сопротивление стали анкеров растяжению, МПа.

Критическое давление  $P_{сr}$  может быть определено в соответствии с принятой схемой расчета и рекомендациями [4] по методике Е. Амштутца.

С учетом характера работы управляющих элементов, в которых вода фильтруется только по достижению  $P_{сб}$ , можно сделать вывод о том, что крепь будет иметь два режима работы:

1.  $P_{сб} > P_{Гобщ}$ ,  $k_{\phi}^{im} = 0$ , все давление воды воспринимается внутренней стальной оболочкой, крепь работает как обычная сталебетонная водонепроницаемая крепь, режим работы – неуправляемый, соответственно этому ведется расчет.

2.  $P_{сб} < P_{Гобщ}$ ,  $k_{\phi}^{im} \neq 0$ , давление воды распределено между слоями крепи и вмещающим породным массивом, доля воспринимаемого слоем давления может быть определена по формулам 1-4, крепь работает в управляемом режиме, рассчитывается как фильтрующая.

Для выделения основных влияющих на искомое значение  $k_{\phi}^{im}$  факторов применялся математический аппарат, используемый для проведения отсеивающего эксперимента [4].

Пределы варьирования отдельных факторов были определены путем анализа нормативной, научно-технической и научной литературы.

Применение сталебетонной крепи с регулируемым режимом работы актуально в сложных горно-геологических условиях, при высоком гидростатиче-

ском давлении и значительном водопритоке, т.е. в породах с коэффициентом фильтрации  $\frac{k_{\phi}^5}{k_{\phi}^3} \gg 100$ . В этом случае согласно п. 3.33 [4] члены  $\frac{1}{k_{\phi}^5} \cdot \lg \frac{r_5}{r_4}$  и  $\frac{1}{k_{\phi}^4} \cdot \lg \frac{r_4}{r_3}$  могут быть приняты равными нулю. Учитывая возросшее качество тампонажа, появление новых материалов, примем равным нулю только член, характеризующий естественный массив  $\frac{1}{k_{\phi}^5} \cdot \lg \frac{r_5}{r_4} = 0$ .

Корреляционный анализ выявил, что все входящие в формулу (4) факторы являются взаимонезависимыми.

Выполнение расчета показало, что основными влияющими факторами являются  $\frac{H_e}{P_{сб}}$ ,  $k_{\phi}^3$ ,  $\lg \frac{r_1}{r_0}$ ,  $\lg \frac{r_3}{r_2}$ , то есть соотношение давления сброса и гидростатического давления в массиве, геометрические, фильтрационные характеристики второго слоя бетона. Геометрическая характеристика слоя стали при расчете мнимого коэффициента фильтрации, хотя и существенно влияет в силу особенностей выбранной математической модели, но не имеет физического смысла, не дает нового знания об объекте исследования и является существенно влияющим фактором исключительно в силу моделирования сброса воды как процесса фильтрации.

С учетом сделанных выводов для наиболее распространенных условий [5], при толщине второго слоя бетона 0,5 м, для радиусов стволов в свету 3; 3,5; 4 м. были разработаны номограммы, позволяющие определить мнимый коэффициент фильтрации слоя стали.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Масленников С.А., Страданченко С.Г., Шинкарь Д.И. Конструкция гидроизолирующей сталебетонной крепи вертикальных стволов с регулируемым режимом работы // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. - № 2. - 2010 - С. 29 - 32.
2. Пат. 2433269 РФ, МПК E21 D Конструкция крепи вертикальных стволов с регулируемым режимом работы / Страданченко С.Г., Масленников С.А., Шинкарь Д.И. - Опубл. 10.11.2011.
3. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчёту крепи/ВНИИМИ, ВНИИОМШС Минуглепрома СССР. - М.: Стройиздат. - 1983. - 272 с.
4. Бульчѳв Н.С. Механика подземных сооружений. - М: Недра, 1994. - 382 с.
5. Плешко М.С., Курнаков В.А. Анализ нормативной базы и научных исследований в области крепления вертикальных стволов. Направления их дальнейшего развития // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 4. С. 49-53. **ГИАС**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Масленников Станислав Александрович* – кандидат технических наук, доцент, Шахтинский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)» (Шахтинский институт (филиал) ЮРГТУ (НПИ)), MaslennikovSA@mail.ru

*Шинкарь Денис Игоревич* – аспирант, Шахтинский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)» (Шахтинский институт (филиал) ЮРГТУ (НПИ)), телефон: (8636)222036.