

УДК 622.693.2.004.4

## ЗАЩИТА ШАХТНЫХ СТВОЛОВ И КАРЬЕРОВ ОТ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ИНЪЕКЦИОННЫМИ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫМИ ЗАВЕСАМИ

Войтенко В.С., Халявкин Ф.Г., Оника С.Г. (УО «Белорусский национальный технический университет», г. Минск, Беларусь)

*В статье рассматривается инъекционный способ создания противofильтрационных завес для защиты шахтных стволов и карьеров от притока подземных вод. Приводится методика их расчета.*

### Введение

Применение противofильтрационных завес в горной промышленности для защиты шахтных стволов и карьеров берет начало в 60-ые годы прошлого столетия. В начале данный способ защиты применялся на месторождениях полезных ископаемых с неглубоким залеганием водоносных горизонтов, характеризующихся высокими фильтрационными свойствами, а также на месторождениях, где динамические запасы подземных вод преобладали над статическими запасами. В дальнейшем было установлено, что применение противofильтрационных завес технически возможно и экономически целесообразно и на более крупных карьерах с глубоким залеганием водоносных горизонтов [1, 2].

В зависимости от технологии сооружения и применяемого материала различают следующие типы противofильтрационных завес: инфузионные (засыпные или заливные), инъекционные (нагнетательные) и криогенные (ледопородные). Каждый из этих типов имеет свою технологию изготовления, свои условия применения и назначения, свои преимущества и недостатки.

При проходке шахтных стволов, защите карьеров, в гидротехническом строительстве широкое применение нашел инъекционный тип завес. Его сооружают путем нагнетания в водоносный слой специальных закрепляющих растворов, которые, заполняя поры и полости в породах, образуют прочные водонепроницаемые соединения. Нагнетание растворов в водонасыщенные породы производится через специально пробуренные скважины, расположенные на небольшом расстоянии друг от друга вдоль проектной линии завесы. Давление нагнетания должно в 2-3 раза превышать гидростатическое давление подземных вод.

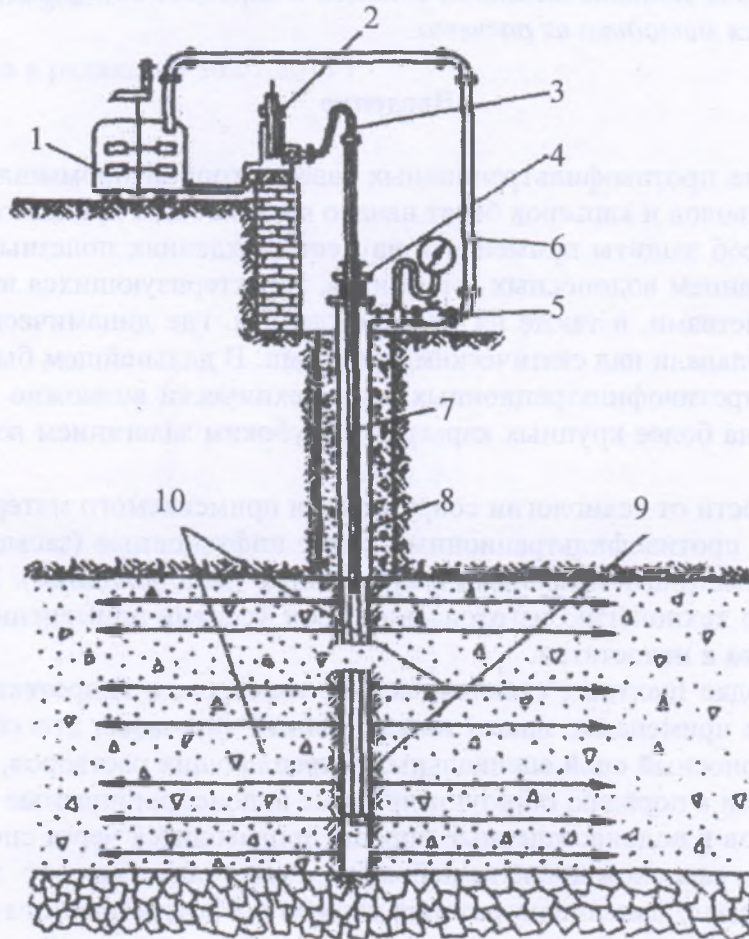
### Результаты исследований

Эффективность действия инъекционных противofильтрационных завес зависит во многом от размера трещин и пор закрепляемых горных пород, а также скорости фильтрации грунтовых вод и их химического состава. Поэтому на одном и том же объекте для создания надежной защиты часто приходится применять несколько видов тампонажных растворов, позволяющих обрабатывать разного рода грунты, входящие в зону создаваемой преграды.

При организации работ по созданию завес инъекционным методом преимущественное распространение получила схема бокового нагнетания (рисунок 1). В этой схеме известны два варианта нагнетания: бесциркулярный и циркулярный. При первом варианте инъекционный раствор не может совершать обратного движения между скважи-

ной и резервуаром установки 1 для приготовления раствора, из которого он засасывается нагнетательным насосом 2. Находясь под большим давлением в инжекторе 7, раствор проникает в трещины и пустоты через боковую поверхность скважины. Данный способ нагнетания рекомендуется применять при тонкой трещиноватости горных пород.

При циркуляционном нагнетании часть нагнетаемой жидкости, не поглощенной горной породой, возвращается обратно в резервуар, откуда снова засасывается нагнетательным насосом 2 и направляется в скважину 9. Благодаря этому создается циркуляция в скважине и предотвращается осаждение раствора. Циркуляционный способ нагнетания применяется в основном для заполнения крупных трещин.



- 1 – установка для приготовления раствора; 2 – насос; 3 – гибкий шланг;  
 4 – сальник; 5 – кран; 6 – направляющая трубка; 7 – инжектор;  
 8 – направляющие трубы; 9 – скважина; 10 – зона инъекции

**Рисунок 1 – Схема бокового нагнетания**

Независимо от способов циркуляции раствора в скважине, для организации тампонажа по схеме бокового нагнетания необходимо выполнение следующих работ:

- пробурить скважины для направляющих труб;
- в скважинах посредством заливки цементного раствора укрепить направляющие трубы 8;
- через направляющие трубы пробурить скважины 9 для нагнетания;
- через сальник 4 на верхнем конце каждой направляющей трубы ввести инжектор 7 и по нему под давлением подать нагнетаемый раствор к забою скважины.

### Расчеты инъекционных противofiltrационных завес

Нагнетаемые в грунт при создании инъекционных завес материалы на основе цемента, глины, битума, жидкого стекла, смол являются дисперсными, т.е. состоящими из жидкой среды и твердой фазы. Законы движения дисперсных жидкостей отличаются от законов истинных жидкостей и это обусловлено их механическими свойствами. Движение истинных жидкостей подчиняется закону Ньютона:

$$\tau = \mu \frac{du}{dn},$$

в то время как движение дисперсных жидкостей подчиняется закону Шведова-Бингама:

$$\tau = \mu \frac{du}{dn} + \tau_0,$$

где  $\tau$  – касательное напряжение в жидкости;

$\tau_0$  – начало текучести или предельное напряжение сдвига;

$\mu$  – структурная или пластическая вязкость;

$\frac{du}{dn}$  – градиент скорости.

При движении по порам и пустотам грунта структурные жидкости быстрее переходят из ламинарного в турбулентный режим фильтрации. В результате их движение происходит с малыми скоростями даже в крупных порах и трещинах горных пород.

Коэффициент фильтрации  $k$  структурных жидкостей для трещиноватых горных пород можно определить по формуле:

$$k = \alpha \cdot K_{\text{пр}} \frac{\nu}{\mu(1 + B \cdot C \frac{1}{\omega})}$$

где  $\alpha$  – коэффициент, равный отношению  $K'_{\text{пр}} / K_{\text{пр}}$ ;

$K_{\text{пр}}$  – коэффициент фильтрации трещиноватой среды;

$K'_{\text{пр}}$  – проницаемость структурной жидкости;

$\nu$  – вязкость структурной жидкости;

$B$  – реологическая константа, равная  $\tau_0 / \mu$ ;

$C$  – геометрическая константа, равная  $\frac{m - \delta}{2}$ ;

$m$  – пористость грунта;

$\delta$  – средний размер трещин;

$\omega$  – скорость фильтрации структурного потока.

В расчетах инъекционных завес определяют в первую очередь величину забойного давления  $P_0$  при нагнетании структурной жидкости в водоносный горизонт, расход нагнетания  $Q$  и максимальный радиус инъекции  $R_{\text{max}}$ . В крупнозернистых грунтах эти величины составят:

$$P_0 = \frac{A\mu}{E} \left[ \frac{Q}{2\pi d_0} \ln \frac{R}{r} + B \cdot C \cdot (R - r) + P_{II} \right];$$

$$Q = \frac{[E(P_0 - P_{II}) - B \cdot C \cdot R] \cdot 2\pi d_0}{\ln R - \ln r_0};$$

$$R_{\max} = \frac{2,66 \cdot m^{0,4}}{A} \cdot d_0 \cdot \left( \frac{P_0 - P_{II}}{\tau_0} \right),$$

где  $A$  – число, характеризующее коэффициент гидравлического сопротивления;

$R$  – радиус инъекции;

$E$  – число, определяемое по формуле  $E = \frac{m^{0,1} \cdot d_0^4}{1,2 \cdot D_0^2}$ ;

$d_0$  – диаметр поры грунта;

$D_0$  – диаметр частиц грунта;

$r_0$  – радиус скважины;

$r$  – расстояние до источника нагнетания;

$P_0 - P_{II}$  – перепад давлений;

$R_{\max}$  – максимальный радиус инъекции.

В трещиноватых горных породах величины  $k$ ,  $P_0$ ,  $Q$  и  $R_{\max}$  определяются по формулам:

$$k = \frac{\alpha \cdot K_{np} \cdot \nu}{\mu(1 + B \cdot C \frac{2\pi\alpha r}{Q})};$$

$$P_0 = \frac{\mu}{\alpha \cdot K_{np}} \left( \frac{Q}{2\pi\alpha} \cdot \ln \frac{R}{r} + B \cdot C \cdot R \right) + P_{II};$$

$$Q = \frac{\left[ \frac{\alpha \cdot K_{np} \cdot (P_0 - P_{II})}{\mu} - B \cdot C \cdot R \right] \cdot 2\pi\alpha}{\ln R - \ln r_0};$$

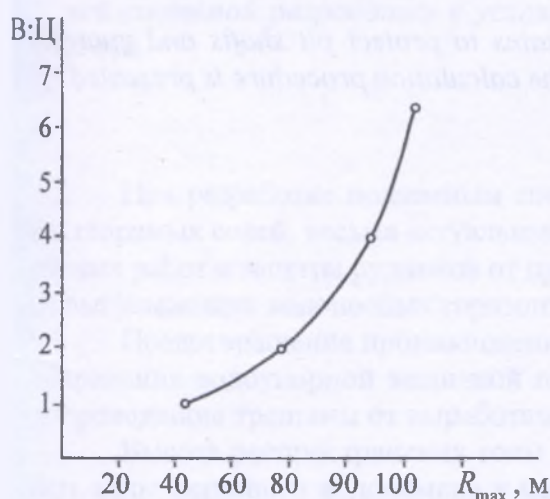
$$R_{\max} = \frac{2 \cdot \alpha \cdot K_{np} \cdot (P_0 - P_{II})}{m \cdot \delta \cdot \tau_0}.$$

Приведенные формулы учитывают дисперсную структуру тампонажных материалов, что позволяет более обоснованно и правильно определять расчетные элементы при проектировании и строительстве противодиффузионных завес в зернистых и прочных трещиноватых горных породах. На рисунке 2 показана зависимость максимального радиуса нагнетания цементной суспензии трех составов В:Ц = 4 (при  $\tau_0 = 1,77 \text{ Н/м}^2$ ); В:Ц = 2 (при  $\tau_0 = 2,1 \text{ Н/м}^2$ ); В:Ц = 1 (при  $\tau_0 = 3,93 \text{ Н/м}^2$ ) в

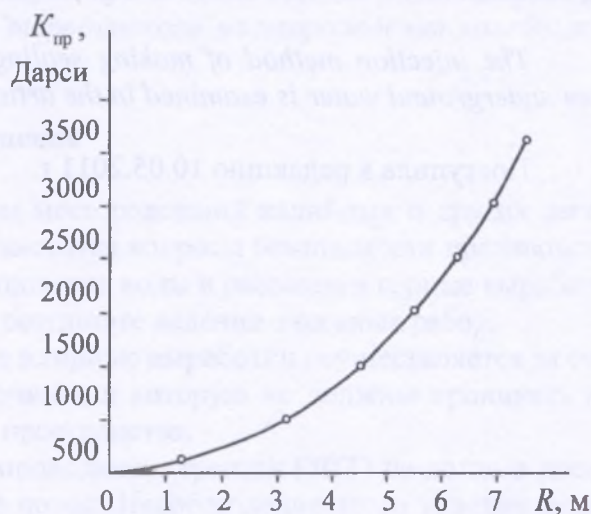
однородный гравий с диаметром зерен  $D_0 = 0,02$  м, пористостью  $m = 0,4$ ,  $k = 2$  м/с. Перепад давлений  $(P_0 - P_n) = 98 \cdot 10^4$  Н/м<sup>2</sup>.

Из графика видно, что наиболее интенсивно увеличивается радиус нагнетания до 100 м при соотношении В:Ц от 1:1 до 4:1. Дальнейшее увеличение соотношения В:Ц не оказывает существенного влияния на увеличение  $R_{\max}$ .

На рисунке 3 показан график зависимости радиуса инъекции  $R$  трещиноватой горной породы мощностью 5 м от коэффициента фильтрации  $K_{пр}$ . Состав цементной суспензии В:Ц = 2 (при  $\tau_0 = 1,47$  Н/м<sup>2</sup>). Напор нагнетания постоянный в течение 1 часа, равный  $78,48 \cdot 10^4$  Н/м<sup>2</sup>.



**Рисунок 2 – График зависимости максимального радиуса нагнетания  $R_{\max}$  цементной суспензии от соотношения В:Ц (вода-цемент)**



**Рисунок 3 – График зависимости радиуса инъекции  $R$  от коэффициента фильтрации  $K_{пр}$  трещиноватой горной породы**

Как следует из графика, с увеличением проницаемости трещиноватой горной породы по параболическому закону увеличивается радиус инъекции цементной суспензии в грунт. Причем, наибольшее увеличение радиуса  $R$  до 8 м происходит с возрастанием проницаемости горной породы до 3500 Дарси. При дальнейшем увеличении проницаемости грунта увеличение радиуса инъекции замедляется.

### Заключение

Для защиты карьеров, шахтных стволов и в гидротехническом строительстве широко применяются инъекционные противофильтрационные завесы. Из всех разработанных видов инъекционных завес наибольшее применение нашли глинизация и цементация, как более дешевые, надежные и не требующие дефицитных материалов.

Наибольшего радиуса нагнетания цементной суспензии до 50 м можно достичь в крупнозернистых песчаных и гравелистых породах, а чтобы достичь этих величин в прочных трещиноватых породах, необходимо разрабатывать способы и технологию увеличения трещиноватости, а следовательно, и проницаемости горной породы.

---

**Список использованных источников**

1. Лев, М.А. Устройство противofильтрационных завес и ограждений в водоносных породах / М.А. Лев // Шахтное строительство. – 1960. – № 3. – 95 с.
  2. Защита карьеров от воды / Абрамов С.К. [и др.]. – М.: Недра, 1970. – 215 с.
- 

**Voitenko V.S., Khalyavkin F.G., Onika S.G.**

**Protection of pit shafts and quarries from underground water by injection sealing curtains**

*The injection method of making sealing curtains to protect pit shafts and quarries from underground water is examined in the article. The calculation procedure is presented.*

Поступила в редакцию 10.05.2011 г.