

## АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПЕРЕТОКОВ ПРИ ЗАТОПЛЕНИИ СМЕЖНЫХ ШАХТ

Розроблена методика розрахунку перетоку води через частково завалену збійку в період перекидання водопритоку із затоплюваної до дренажної шахти. На прикладі двох шахт Центрального району Донбасу виконано прогноз динаміки підпору та перекидання водопритоку у випадку регульованого затоплення однієї з них.

## ANALYSIS OF THE OVERFLOW DYNAMICS DURING FLOODING THE ADJACENT MINES

The method is developed to calculate the water overflow through a partially blocked up working connecting a flooded mine to a drained one. The forecast is carried out on the example of two mines in the Central Donbass region. The increase in the mine water head and the overflow dynamics is calculated, with one of the mines being flooded.

Введение. Научно обоснованное, управляемое затопление смежных шахтных полей представляет собой актуальную инженерно-техническую задачу в период консервации и закрытия угледобывающих предприятий.

Процесс затопления, протекающий в горном массиве с нарушенной структурой в условиях техногенного гидрогеологического режима, осложняется наличием сбоек между соседними шахтными полями на разных горизонтах. Наличие завалов в этих выработках создает дополнительное фильтрационное сопротивление перебрасываемому водопритоку. Полное перекрытие поперечного сечения сбойки слабопроницаемыми породами вызывает подпор, который может достигнуть нескольких десятков метров, что усиливает давление на целики. При высоком гидростатическом давлении следует оценить возможность прорыва завала и быстрого поступления большого объема воды в соседнюю шахту.

Недостаток информации о степени гидравлического совершенства сбоек не дает возможность выполнить адекватный ситуации детерминированный прогноз. В таких условиях переток целесообразно рассчитывать в рамках стохастического подхода, задавая положение завалов и их фильтрационные свойства с помощью распределенных параметров.

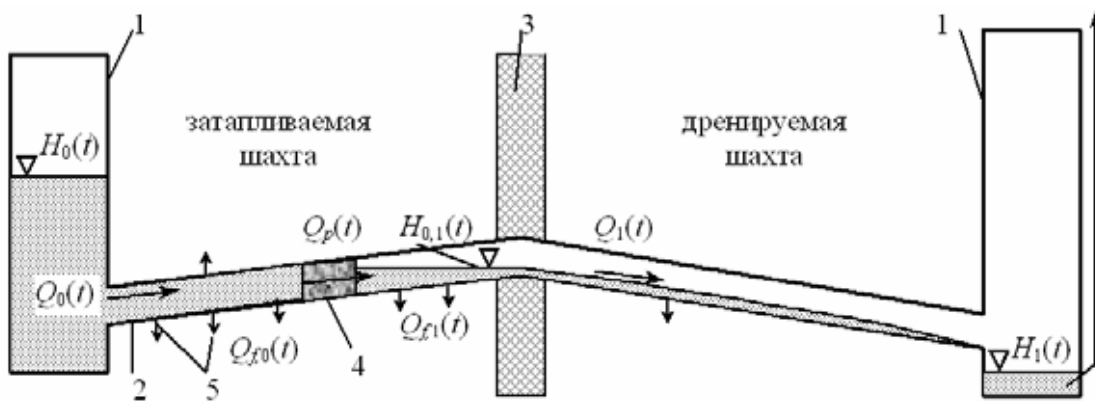
Целью данной работы является разработка и апробация методики расчета перетока через сбойку, соединяющую две соседние шахты, из которых одна затапливается, а в другой существует водоотлив. Наиболее важной частью методики является оценка фильтрационной проницаемости и устойчивости завалов в сбойке.

Методика расчета. Переток из затапливаемой в водоотливную шахту сопровождается следующими процессами (рис. 1):

- 1) поступлением воды в сбойку из выработок затапливаемой шахты;
- 2) движением воды в ней по мере подъема уровня  $H_0(t)$  в стволе;
- 3) фильтрацией через препятствия (завалы) и в окружающие сбойку породы.

При больших скоростях течения через завалы может происходить их суффозия. После перелива через верхнюю отметку сбойки («гребень») вода растекается по

выработкам, попадая, в конечном счете, на водосборник водоотливной шахты.



- 1) шахтные стволы; 2) сбойка; 3) целик; 4) препятствия (завалы);  
5) фильтрация в окружающие породы

Рис. 1 – Схема перетока воды по сбойке между шахтами

Ориентировочные оценки на основе формул Шези и Дарси-Вейсбаха показывают, что в заваленной сбойке небольшой просвет в сечении  $1,5-2,0 \text{ м}^2$  вдоль ее длины (при первоначальной площади сечения около  $8 \text{ м}^2$ ) оказывается достаточным, чтобы пропустить водоприток  $400-600 \text{ м}^3/\text{час}$ . При этом уровень воды в затапливаемой шахте может превысить «гребень» сбойки не более чем на 2-3 м. Наиболее опасным является полное перекрытие сбойки на каком-либо участке. Рассмотрим случай единичного завала более детально.

Пусть  $p(d)$  – распределение по размеру частиц пород, из которых состоит завал. Коэффициент линейной ламинарной фильтрации этих пород можно рассчитать по формуле [1], полученной на основе экспериментов для крупнообломочных пород, из которых состоят взрывонабросные плотины:

$$k_l = 0,0925 \frac{g}{\nu} \frac{n^3}{(1-n)^2} \frac{1}{S^2}, \quad (1)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость воды,  $g=981 \text{ см}/\text{с}^2$ ,  $S$  – площадь удельной поверхности частиц, определяемая на основе гранулометрического состава,  $\text{см}^2/\text{см}^3$ ,  $n$  – пористость (пустотность). Для рассматриваемых типов пород значения  $k_l$  изменяются в диапазоне от 180 до 1040 м/сут.

Фильтрационный расход в условиях переходного и турбулентного режимов, которые характерны для течения в завалах, рассчитывается по формуле

$$Q_s = S_p k_{nl} I^m, \quad (2)$$

где  $S_p$  – площадь поперечного сечения препятствия,  $k_{nl}$  – коэффициент нелинейной фильтрации,  $I = (H_0 - H_{0,1})/L_1$  – градиент напора,  $H_{0,1}$  – уровень воды за препятствием. Величина  $H_{0,1}$  определяется динамикой поступления воды через

препятствие и заполнением верхней части сбойки. Показатель степени  $m$  изменяется в диапазоне  $[0.5, 1]$  в зависимости от величины  $I$  согласно экспериментальным данным [1].

Кроме хаотически ориентированных пустот и малых трещин, через которые проходит фильтрационный поток, в завалах могут существовать несколько узких протоков, по которым движется гидравлический поток со значительно большей скоростью. Средняя длина этих каналов  $l_c = \chi L_1$ , где  $L_1$  – длина препятствия,  $\chi$  – коэффициент извилистости, принимаемый по аналогии с пористой средой приближенно равным 1,5. Скорость течения в таком канале можно определить по формулам [2]

$$v_h = \sqrt{2d_i g I_0 / \lambda}, \quad \lambda = k_1 / [21g(3,7/\bar{\Delta})]^2, \quad (3)$$

где  $I_0$  – градиент напора в препятствии, учитывающий извилистость канала,  $d_i$  – его диаметр,  $\bar{\Delta}$  – его относительная шероховатость,  $k_1$  – коэффициент, учитывающий форму поперечного сечения.

Диапазон изменения каналов по размеру  $[0, d_{max}]$  разбивается на  $n$  интервалов равной длины:  $d_i = \delta \cdot i$ ,  $i = 0, \dots, n$ . Средняя площадь одного канала составляет  $S_i = k_{2,i} (\pi/12\delta) (d_i^3 - d_{i-1}^3)$ , где коэффициент  $k_{2,i}$  учитывает отличие формы сечения канала от круговой. В соответствии с распределением каналов по размеру поперечного сечения  $p_h(d)$  для всех диапазонов найдем  $p_i$  – ту часть каналов, диаметры которых  $d$  находятся в промежутке  $[d_{i-1}, d_i]$ . Фактическая площадь каналов такого размера  $S_{i,i} = S_i p_i$ , а их среднее количество –  $k_{t,i} = S_{i,i} / S_i$ , где  $S_i$  – общая площадь поперечного сечения всех каналов. Тогда проходящий через все каналы гидравлический расход определяется по формуле

$$Q_h = \sum_i Q_{t,i} = \sum_i k_{t,i} S_i v_h(\bar{d}_i), \quad (4)$$

где  $\bar{d}_i$  – средний диаметр каналов в диапазоне  $[d_{i-1}, d_i]$ .

Суммарный расход воды через завал определяется по формуле

$$Q_p = Q_s + Q_h, \quad (5)$$

в которой величины  $Q_s$  и  $Q_h$  рассчитываются по формулам (2) и (4).

Поступление воды в сбойку и напор  $H_0$  в ней определяются динамикой водопритока и объемом пустот в затапливаемой шахте. Увеличение уровня воды в стволе и сбойке за промежуток времени  $\Delta t$  составит

$$\Delta H = (Q_0 - Q_p - Q_{f,0}) \Delta t / S_h, \quad (6)$$

где  $S_h$  – площадь горизонтального сечения выработок в затапливаемой шахте,

определяемая как отношение объема пустот  $V_w$  над горизонтом отработки к его толщине:  $S_h = V_w / \Delta z$ . Величина  $Q_0$  рассчитывается путем моделирования фильтрации при затоплении шахты, либо задается в пределах диапазона минимального и максимального значений, установленных по данным замеров в период эксплуатации шахты.

Потери на фильтрацию через стенки выработки в окружающие слабопроницаемые породы определяются по формуле

$$Q_{f,0} = S_1 K_1 I_1, \quad (7)$$

где  $S_1$  – смоченная площадь границы «выработка – массив» до завала,  $K_1$  – коэффициент фильтрации окружающих пород,  $I_1$  – средний градиент напора между сбойкой и ближайшими к ней выработками. Формула (7) справедлива в предположении, что между входом в сбойку и завалом отсутствуют сопряжения с другими выработками.

Прошедший через завал расход может уменьшиться вследствие фильтрации в окружающие породы в верхней части сбойки. Соответствующая потеря расхода  $Q_{f,1}$  рассчитывается аналогично формуле (7).

Перелив через «гребень» начинается с момента достижения уровнем воды его высоты. После этого необходимо учитывать дополнительный подпор, создаваемый нисходящим стоком в сбойке в пределах водоотливной шахты:

$$\Delta h = (Q_1 / b_s C_1 \sqrt{I_1})^{2/3},$$

где  $C_1$ ,  $I_1$  – коэффициент Шези и уклон потока в той части сбойки, которая расположена в пределах дренируемой шахты,  $b_s$  – ширина выработки

При высоких значениях градиента напора фильтрационная проницаемость завала изменяется вследствие суффозии. Так, если действительная скорость фильтрации  $v_r$  в препятствии, вычисленная с помощью формул [1]

$$v_r = v/n, \quad v = 0.5(\sqrt{\theta^2 + 4\eta} - \theta), \quad \theta = 10n^{2.3}v/\sqrt{k_l v/g}, \quad \eta = 10n^{2.3}\sqrt{k_l v g I},$$

превышает неразмывающую скорость  $v_{nr}$  для какой-либо фракции пород вывалов, становится возможен срыв частиц этой фракции протекающим потоком воды и их вынос за препятствие. Значения  $v_{nr}$  можно рассчитать по эмпирическим формулам, полученным для открытых русел [1, 3]. Интенсивность вымывания частиц характеризуется параметром  $\xi Q_s / V_f$ , где  $Q_s$  – фильтрационный расход через завал,  $V_f$  – объем воды в порах и трещинах,  $\xi$  – коэффициент, зависящий от суффозионных свойств и связанности горной породы. С учетом дискретизации процесса на каждом временном шаге определяется количество частиц разных фракций, которые вымываются из препятствия. При этом меняется гранулометрический состав слагающих его пород, и, следовательно, коэффици-

ент фильтрации, определяемые по формуле (1).

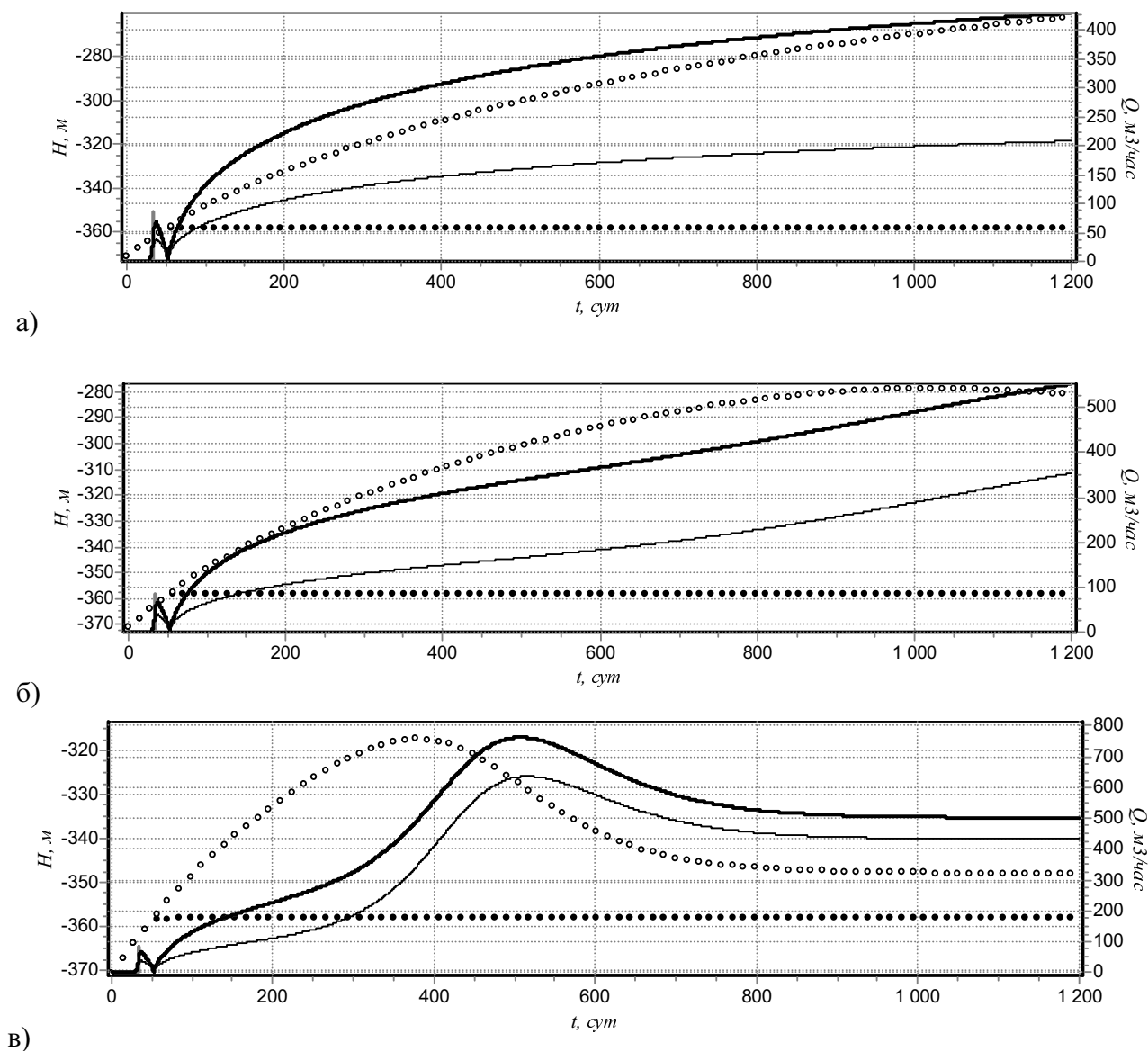
Размыв промоин, по которым проходит гидравлический поток, происходит быстрее вследствие более высоких скоростей течения в них. Пусть  $d_k$  – средний диаметр одного из таких каналов в момент времени  $t_k$ . При текущем градиенте по формуле (3) определяется скорость течения в нем. По формулам для неразмывающей скорости [1, 3] оценивается размер частиц  $d_{suf,k}$ , которые могут срываться и выноситься потоком воды при скорости  $v_h$ . Таким образом, непосредственному влиянию суффозии в течение промежутка времени  $\Delta t$  будет подвергаться слой толщиной  $d_{suf,k}$  вокруг канала. За период  $\Delta t$  из этого слоя будет вынесена часть его объема  $p_{suf,k} = \lambda \Delta t$ , где  $\lambda$  – параметр суффозии. Площадь поперечного сечения канала увеличится на величину  $\Delta S_k = p_{suf,k} \pi d_{suf,k} (d_{suf,k} + 2d_k) / 4$ , а диаметр его станет равным  $d_{k+1} = 4\sqrt{d_k^2/4 + \Delta S_k/\pi}$ . Кинетический параметр  $\lambda$ , определяющий интенсивность суффозии и увеличения промоин, можно оценить путем сопоставления начальных и конечных размеров каналов за длительный промежуток времени (несколько месяцев).

Апробация методики. Разработанная методика применена для расчета перетока из затапливаемой шахты «Юнком» в водоотливную шахту «Красный Октябрь» в Центральном районе Донбасса. Горизонт 560 м шахты «Юнком», расположенный на отметке –370 м, соединен с выработками шахты «Красный Октябрь», причем самая высокая точка сбойки имеет отметку –358.3 м. Длина сбойки в пределах шахты «Юнком», согласно планам горных работ, составляет от 500 до 900 м. Площадь сечения выработки в непогашенном состоянии равна 8 м<sup>2</sup>.

Согласно одному из вариантов консервации шахт [4], после затопления выработок ниже горизонта 560 м весь водоприток из шахты «Юнком» будет перетекать в шахту «Красный Октябрь». Длительность затопления нижележащих выработок, согласно выполненным прогнозным оценкам, может составить около 300 сут. Дальнейший подъем уровня воды в затапливаемой шахте и динамика перетока прогнозировались на основе разработанной методики при максимально возможном притоке в шахту «Юнком»  $Q_0=500$  м<sup>3</sup>/час.

Согласно имеющимся данным, гранулометрический состав пород завалов может быть представлен кусками и обломками, размер которых изменяется в широком диапазоне. Ввиду отсутствия точных сведений при расчетах рассматривались два варианта состава завалов, для которых значения фильтрационной проницаемости составляют 200 и 900 м/сут. Площадь поперечного сечения промоин в завале до начала перетока варьировала в диапазоне 1-5% площади всех пустот и пор в поперечном сечении.

Рассматривались варианты фиксированного расположения завала в сбойке, а также случай равновероятного расположения завала вдоль ее длины. В результате решения серии прогнозных задач установлено, что динамика формирования подпора в затапливаемой шахте и перетока в дренируемую шахту зависит главным образом от проницаемости и длины завалов, интенсивности суффозионных процессов, а в некоторых случаях и от расположения препятствия в сбойке. Основные результаты расчетов представлены на рис. 2-3.



○○○ – напор в затопляемой шахте, ●●● – напор за препятствием в сбойке,  
 ——— – общий расход через завал, ——— – расход через промоины (каналы) в завале:  
 а) без суффозии, б) при незначительной суффозии, в) при значительной суффозии

Рис. 2 – Изменение напора и расхода воды через сбойку в ходе переброски водопритока

При меньшей проницаемости, длине завала  $L_1=10$  м и отсутствии суффозионных процессов происходит значительный подъем уровня воды в затопляемой шахте с формированием подпора более 100 м (рис. 2а), что создает давление на препятствие и целик. Расход через промоины составляет в этом случае около половины суммарного расхода через завал.

Фильтрационные потери в окружающие породы  $Q_{f,0}$  при коэффициенте фильтрации  $K_1=0,01$  м/сут не превысят  $10$  м<sup>3</sup>/час при условии, что сбойка находится в зоне дренирования. В случае подъема уровня подземных вод эта величина уменьшится. Но даже указанное значение  $Q_{f,0}$  не окажет заметного влияния на динамику процесса, поскольку оно не превышает 2% перетока.

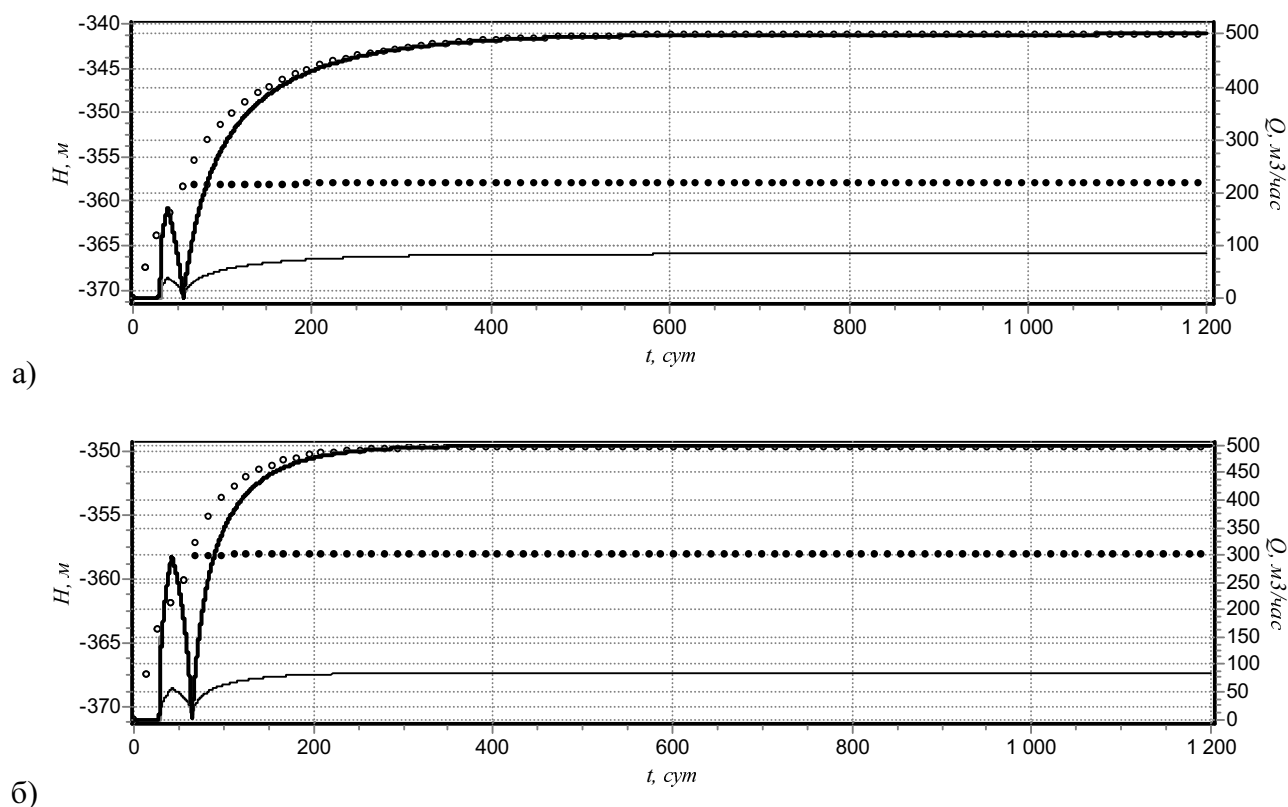


Рис. 3 – Изменение напора и расхода воды через сбойку в ходе перетока: (обозначения те же, что и на рис. 2):  $K=900$  м/сут, а)  $L_n=10$  м, б)  $L_n=5$  м

Увеличивающийся перепад напоров на препятствии приводит к большему расходу. Это, в свою очередь, замедляет подъем уровня воды в затапливаемой шахте и, в условиях суффозии, приводит к его снижению (рис. 2б, в). После перетока основных запасов воды, накопившихся в период постепенного размыва завала (например, промежуток времени 300 – 600 сут на рис. 2в), наступает квазистационарный режим. В этот период расход через препятствие медленно уменьшается до полного перетока всего ресурса водосбора на шахтном поле. При этом постепенно снижается уровень воды в затапливаемой шахте. Одновременно увеличивается доля расхода, проходящего через промоины. Перепад напоров на завале различной проницаемости в условиях суффозии в квазистационарном режиме составляет 10 – 20 м.

Интенсификация суффозии существенно ускоряет процесс формирования и сработки подпора в затапливаемой шахте (рис. 2б, в). Вследствие более высокой скорости течения воды в промоинах и их размыва доля проходящего через них расхода может возрасти и достичь 90% общего расхода через завал. При этом фильтрационная проницаемость за тот же период увеличится не более чем на 1–2%. Основной причиной этого является высокая гидравлическая крупность подавляющего большинства частиц в завале.

При высокой фильтрационной проницаемости влияние суффозии в рассматриваемых процессах менее выражено. Более важными факторами становятся длина завала и его расположение относительно «гребня» сбойки. Чем ближе к входу в сбойку расположен завал, тем большую длительность имеет период

первого возрастания и уменьшения расхода. Временное уменьшение расхода (при  $t = 30 - 60$  сут) объясняется быстрым затоплением сбойки за препятствием, когда поднимающийся уровень воды за препятствием вызывает уменьшение градиента. После достижения уровнем воды за препятствием самой высокой точки сбойки и установления  $H_0$ , градиент и расход снова возрастают, стабилизируясь в течение 5-8 месяцев. Далее наступает квазистационарный режим, при котором перепад уровней воды составляет от 4 до 50 м, если длина препятствия соответственно равна 2 и 20 м. Эффект временного уменьшения расхода почти не проявляется при близком расположении завала к «гребню».

Выводы. Полное перекрытие сбойки слабопроницаемыми завалами на небольшом участке (5 – 10 м) может создать гидростатическое давление на препятствие и целик. Расположение препятствий вдоль длины выработки влияет на динамику перетока по сбойке только при высокой проницаемости завалов в начальный период перетока воды. Промоины в завале, занимающие всего несколько процентов всех пустот, могут существенно компенсировать недостаточную фильтрационную проницаемость завалов, особенно если они подвержены суффозии.

Разработанная методика позволяет прогнозировать длительность переходного режима, в течение которого устанавливается расход воды через сбойку, близкий к водопритоку в затапливаемую шахту. Длительность этого режима для рассмотренных горно-геологических условий составляет от полугода до 2–3 лет в зависимости от длины завала и его проницаемости.

Принятая геометрическая схематизация допускает обобщения на случаи переменного наклона сбойки и ее сопряжения с другими выработками вдоль длины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидротехнические сооружения / Г.В. Железняков, Ю.А. Ибад-заде, П.Л. Иванов и др. М.: Стройиздат, 1983. – 543 с.
2. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
3. Мирцхулава Ц.Е. Основы физики и механики эрозии русел. – Л.: Гидрометеоздат, 1988. – 303 с.
4. Отчет «О результатах исследовательских работ по прогнозу изменения гидрогеологических условий в зоне влияния шахт «Красный Октябрь», «Красный Профинтерн» и «Юнком» после их закрытия». Артемовская геологич. партия, Артемовск, 1997. – 149 с.