

УДК 622.793.2: 504

**К МЕТОДУ ОЦЕНКИ БАЛАНСА ВОДЫ В ХВОСТОХРАНИЛИЩАХ  
С УЧЕТОМ ПРОЦЕССОВ КОНСОЛИДАЦИИ ГРУНТОВ**

Канд. техн. наук      Г.Т. Трунков  
Канд. техн. наук      М.А. Шинтемиров

*При составлении водного баланса одним из наиболее сложных вопросов является оценка фильтрационных потерь из хвостохранилищ и количества воды, оставшейся в порах грунта. В статье на основе теории консолидации предложена методика оценки фильтрационных потерь из хвостохранилища, позволяющая обоснованно рассчитать водный баланс в любой период эксплуатации. Приведен пример расчета потерь воды для реального хвостохранилища и проведено сравнение с обычным методом.*

Складирование твердых отходов промышленности, в частности хвостов горнодобывающей отрасли, – одна из крупнейших мировых проблем в обеспечении рационального использования и эффективной защиты от загрязнения природной среды. В отличие от обычных намывных гидросооружений энергетического и транспортного строительства хвостохранилища намываются из более дисперсных малосвязных грунтов. Другой особенностью их намыва является необходимость полного осветления пульпы, что приводит к сохранению в отложениях намыва самых мелких фракций. Кроме того, добавление коагулянтов приводит к образованию весьма рыхлой структуры. Поэтому грунты отложений хвостохранилищ относятся к сильносжимаемым, обладающим малой водопроницаемостью, и устойчивость сооружения следует рассчитывать с учетом нестабилизированного состояния грунта.

Исследования консолидации хвостохранилищ позволяют оценить влияние на величину порового давления и, как следствие, на устойчивость откосов хвостохранилищ значений принятых расчетных характеристик: коэффициентов фильтрации, уплотнения, характеристик ползучести скелетов грунта и т.п. В результате имеющиеся инженерные методы расчета грунтовых гидротехнических сооружений оказываются неприменимыми при проектировании хвостохранилищ.

При проектировании сооружений хвостовых хозяйств необходимо

производить составление годового водного баланса хвостохранилищ. Для систем 1 и 2 классов рекомендуется производить также и посезонный баланс воды. В современной методической литературе [1] и действующих нормативных документах [2, 3] водный баланс хвостохранилищ рекомендуется оценивать по уравнению

$$W_0 = W_{ест} + W_n - W_u - W_\phi - W_x - W_z - W_\delta, \quad (1)$$

где  $W_0$  – количество воды, получаемой для оборотного водоснабжения или сброса осветленной воды;  $W_{ест}$  – естественный приток воды в хвостохранилище;  $W_n$  – количество воды, поступающей в хвостохранилище вместе с хвостами;  $W_u$  – потери воды на испарение из пруда хвостохранилища;  $W_\phi$  – потери воды на фильтрацию в ложе и борта хвостохранилища;  $W_x$  – потери воды на заполнение пор отложений хвостохранилища;  $W_z$  – количество воды, необходимое для подъема горизонта воды в отстойном пруде в связи с повышением отметки гребня хвостохранилища;  $W_\delta$  – безвозвратные потери воды в технологическом процессе предприятия.

Если составляющие уравнения баланса  $W_{ест}$ ,  $W_n$ ,  $W_u$ ,  $W_z$ ,  $W_\delta$  определяются достаточно точно с помощью гидрометеорологических наблюдений и непосредственных замеров, то для определения потерь воды на фильтрацию и заполнение пор отложений хвостохранилищ в документах и методической литературе в некоторых случаях рекомендуются весьма приближенные методики расчета.

Например, для расчета фильтрации из хвостохранилища в простейших случаях плоского потока при несложных гидрогеологических условиях в [3] рекомендуется использовать имеющиеся аналитические зависимости для одномерного фильтрационного потока. В более сложных случаях фильтрационный поток должен рассчитываться на основе моделирования методом ЭГДА. Количество воды, идущей на заполнение пор отложений хвостохранилища, там же рекомендуется определять по средней пористости грунта в отвале. Таким образом, эти рекомендации не учитывают процессов консолидации отложений. Поэтому разработка обоснованных методов оценки баланса воды в хвостохранилищах, обеспечивающих работу систем полного водооборота, возможна только на основе фильтрационных расчетов с учетом процессов консолидации грунтов хвостохранилищ.

Для простейших случаев плоской задачи (равномерно распределенная или трапецеидальная нагрузка на поверхности основания, постоянные коэффициенты фильтрации и уплотнения) П.П. Бородавкиным предложены зависимости для определения расхода воды из области основания,

ограниченной вертикальными и горизонтальными плоскостями. Например, при уплотнении основания равномерно распределенной нагрузкой шириной  $2a$  и постоянных коэффициентах фильтрации уравнение для определения расхода будет иметь вид [4]

$$Q = -2k \int_0^{y_{ak}} \int_0^t \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right)_{x=a} dy dt - k \int_{-a}^{+a} \int_0^t \left[ \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right)_{y=0} + \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right)_{y=y_{ak}} \right] dx dt, \quad 2)$$

где  $a$  – полуширина полосовой нагрузки;  $y_{ak}$  – глубина зоны уплотнения;  $k$  – коэффициент фильтрации грунта;  $H$  – напорная функция (избыточные напоры).

Для определения напорной функции  $H$  используется уравнение консолидации В.А. Флорина, которое решается методом конечных разностей

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{k(1 + \varepsilon_{cp})}{\gamma a_{упл}} \left( \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \right), \quad (3)$$

где  $a_{упл}$ ,  $\varepsilon_{cp}$  – средние коэффициенты уплотнения и пористости;  $x$ ,  $y$  – декартовы координаты;  $t$  – время.

В то же время известно, что отложения пляжных и прудковых зон хвостохранилищ характеризуются большой и нелинейной сжимаемостью грунта и связанной с этим значительной нелинейностью зависимости коэффициента фильтрации от его пористости. По данным научно-исследовательской лаборатории (НИЛ) механики грунтов и устойчивости хвостохранилищ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ) [5], коэффициент уплотнения песчаных

отложений пляжных зон хвостохранилищ  $\frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma}$  может изменяться в 10...15

раз в диапазоне сжимающих напряжений  $\sigma$  от 0 до 0,5 МПа. Во столько же раз изменяется и коэффициент фильтрации. Для суглинистых и глинистых отложений прудковых зон аналогичные изменения коэффициентов уплотнения и фильтрации могут достигать двух порядков. Поэтому применение в расчетах консолидации постоянных (средних) значений коэффициентов уплотнения и фильтрации искажает характер процессов, происходящих при намыве хвостохранилищ, и приводит к значительным погрешностям.

В НИЛ механики грунтов и устойчивости хвостохранилищ СПбГПУ разработаны методики расчетов консолидации хвостохранилищ и их оснований с учетом нелинейных зависимостей коэффициентов филь-

трации и пористости от напряженного состояния, анизотропии фильтрационных свойств грунтов, влияния температурного режима, постепенности роста сооружения по высоте и неполного водонасыщения грунта. Данные методики реализованы в виде программ для автоматизированного расчета на персональных ЭВМ [6].

Для решения плоской задачи используется дифференциальное уравнение консолидации трехфазного грунта В.А. Флорина при соответствующих начальных и граничных условиях

$$\begin{aligned} & \left[ 1 - \beta \frac{1 + \varepsilon(x, y, \mathcal{G})}{\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathcal{G}}} \right] \frac{\partial}{\partial t} p(x, y, t) = \frac{\partial}{\partial t} \mathcal{G}^*(x, y, t) - \\ & - \frac{1 + \varepsilon(x, y, \mathcal{G})}{\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathcal{G}}} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ k(x, y, \mathcal{G}) \left[ \frac{1}{\gamma_s} \frac{\partial}{\partial x} p(x, y, t) \right] \right\} - \\ & - \frac{1 + \varepsilon(x, y, \mathcal{G})}{\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathcal{G}}} \frac{\partial}{\partial y} \left\{ k(x, y, \mathcal{G}) \left[ \frac{1}{\gamma_s} \frac{\partial}{\partial y} p(x, y, t) - 1 \right] \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $p$  – давление в поровой воде за вычетом атмосферного;  $\varepsilon$  – коэффициент пористости грунта;  $\mathcal{G}$  – полусумма нормальных напряжений в скелете грунта;  $\mathcal{G}^*$  – то же в предположении мгновенной стабилизации;  $k$  – коэффициент фильтрации грунта;  $\beta$  – коэффициент объемной сжимаемости грунта с учетом неполного водонасыщения;  $x, y$  – декартовы координаты точек;  $t$  – время, отсчитываемое от момента начала возведения сооружения.

Начальное условие:  $p(x, y, t) = p_0(x, y)$  – численно заданная функция.

Граничные условия:  $p(x, y, t) = 0$  – в зонах отсутствия грунта;

$$\frac{\partial}{\partial y} p(x, y, t) = \gamma_s \quad \text{– в зонах гидростатического давления;}$$

$\frac{\partial}{\partial \nu} p(x, y, t) = 0$  – на границе с нормалью  $\nu$ , выделяющей зону с водонепроницаемым грунтом;

$$\frac{\partial}{\partial x} p(x, y, t) = 0 \quad \text{– на оси симметрии;}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial n^2} p(x, y, t) = 0 \quad \text{– на границе с нормалью  $n$ , выделяющей расчетный}$$

прямоугольник из сечения сооружения с основанием.

Определив значения  $p$  в заданные моменты времени  $t$  вычисляются значения всех величин, входящих в дифференциальное уравнение, и их производные. Это дает возможность определять  $\frac{\partial p}{\partial t}$  и  $\frac{\partial \varepsilon}{\partial g}$ . Выбирая минимальное значение допустимого шага по времени  $\Delta t$ , значения  $p$  на текущий момент времени  $t + \Delta t$  вычисляют как  $p + \frac{\partial p}{\partial t} \Delta t$ . При этом текущая высота ячейки (с учетом сжатия грунта) определяется по выражению

$$\Delta y = \Delta y_0 \left[ 1 - \frac{\varepsilon(g_0) - \varepsilon(g)}{1 + \varepsilon(g_0)} \right], \quad (5)$$

а величина сжатия ячейки – по выражению

$$\Delta S = \Delta y_0 \frac{\varepsilon(g_0) - \varepsilon(g)}{1 + \varepsilon(g_0)}. \quad (6)$$

Таким образом, для правильной оценки потерь воды на заполнение пор отложений грунта при намыве хвостохранилищ и для оценки потерь на фильтрацию воды в основание и борта хвостохранилищ необходимо произвести предварительный расчет консолидации отложений с учетом нелинейных зависимостей указанных коэффициентов от напряжений в скелете грунта.

Полученные в результате расчета консолидации значения парового давления и напоров в теле хвостохранилища используются для определения значений коэффициентов фильтрации и пористости в любой точке хвостохранилища. Зная значения коэффициентов пористости в любой точке хвостохранилища в данный момент времени и при заданной степени водонасыщения грунта (обычно ниже кривой депрессии можно принять водонасыщение полным), можно легко оценить пористость грунта и суммировать объем воды, заполняющей поры отложений.

При известных значениях коэффициентов фильтрации путем построения линий равных напоров определяются значения градиентов напора и фильтрационных расходов в основание и борта хвостохранилищ. Для иллюстрации методики расчетов ниже приведены результаты определения фильтрационных расходов в основание и борта реального хвостохранилища обогатительной фабрики.

Так как в расчетах консолидации решается плоская задача, то предварительно хвостохранилище разбивалось на отдельные отсеки с оди-

наковым инженерно-геологическим и гидрогеологическим строением основания, намывтой толщи и характером рельефа местности. Для каждого выделенного отсека производился расчет консолидации при заданных интенсивности намыва и соответствующих зависимостях  $k = f(x, y, \vartheta)$  и  $\varepsilon = \varphi(x, y, \vartheta)$ , после чего были построены линии равных напоров для конкретных заданных моментов времени и на граничных поверхностях высачивания, выделены участки с близкими значениями коэффициентов фильтрации и градиентами напора.

Далее фильтрационный расход в основание и борта хвостохранилища определялся по обычной зависимости

$$Q = -2k \int_0^F \int_{\tau_1}^{\tau_2} k_y \frac{\partial H}{\partial y} dF dt + \int_0^{\omega} \int_{\tau_1}^{\tau_2} k_x \frac{\partial H}{\partial x} d\omega dt, \quad (7)$$

в которой  $k_x, k_y$  – коэффициенты фильтрации грунта на поверхности высачивания в данный момент времени,  $F$  и  $\omega$  – площадь высачивания в основание и в борта хвостохранилища.

В результате расчета для четырех моментов времени получены значения расходов в борта и основание хвостохранилища (рисунок).

Как видно на рисунке, в связи с уплотнением грунта расход в основание хвостохранилища (кривая 1) уменьшился в 8 раз при росте сооружения в высоту около 30 м.

Фильтрационные  
потери, м<sup>3</sup>/сут.

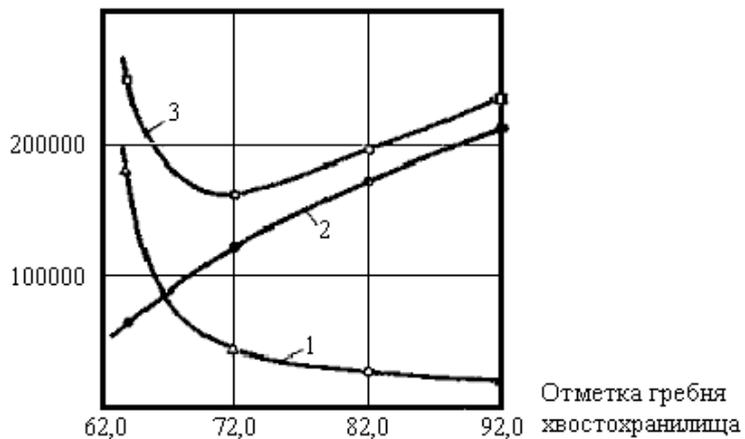


Рис. Изменение фильтрационных потерь из хвостохранилища.  
1 – потери в основание, 2 – потери в борта, 3 – суммарные потери.

В то же время, расход в борта хвостохранилища (кривая 2) в связи с возрастанием напоров увеличился в 3,4 раза. Суммарные фильтрационные потери из хвостохранилища (кривая 3) имеют минимум, приходящийся на отметку гребня 70 м.

По данным баланса данного хвостохранилища, суточный приход воды составляет 275 тыс. м<sup>3</sup>, забор воды на нужды комбината – 194 тыс. м<sup>3</sup>, потери на испарение – 15 тыс. м<sup>3</sup>. Очевидно, этим можно объяснить резкий спад объема отстойного пруда за последние годы и значительное заболачивание территории, прилегающей к хвостохранилищу.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евдокимов П.Д., Сазонов Г.Т. Проектирование и эксплуатация хвостовых хозяйств обогатительных фабрик. – М.: Недра, 1978. – 439 с.
2. Рекомендации по технологическому проектированию обогатительных фабрик руд цветных и черных металлов. Ч.5 Хвостовое хозяйство. РТП – ОФ – 5 – 72. – Л.: Механобр, 1972 – 89 с.
3. Рекомендации по проектированию хвостовых хозяйств предприятий металлургической промышленности. – М.: Стройиздат, 1972. – 89 с.
4. Бородавкин П.П. Механика грунтов в трубопроводном строительстве. – М.: Недра, 1976. – 224 с.
5. Шульц Л.В. К определению расчетных физико-механических характеристик отложений на ранних стадиях проектирования. // Транспорт и складирование отходов производства в условиях повышения требований к защите окружающей среды. – Л.: 1980 – С. 42-48.
6. Определение емкости хвостохранилищ. – Метод. указ. АрмНИИпроцветмет, 1978. – 33 с.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова

#### **ТОПЫРАҚ КОНСОЛИДАЦИЯСЫН ЕСЕПКЕ АЛА ОТЫРЫП ҚОЙМАДАҒЫ СУ БАЛАНСЫН БАҒАЛАУ ӘДІСІ**

Техн. ғылымд. Г.Т. Трунков  
канд.  
Техн. ғылымд. М.А. Шинтеміров  
канд.

*Су балансын құру кезіндегі ең қиын сұрақтардың бірі қоймадағы фильтрациялық жоғалуды бағалау және топырақ жесіктеріндегі қалған су мөлшері есептеу болып табылады. Консолидация теория шешімі негізіндегі мақалада фильтрациялық жоғалудың бағалау әдісі және қойма қойылған, бұл қолданудың барлық кезеңінде су балансын дәйекті есептеуге рұқсат етеді.*

*Ақиқат қойма үшін судың жоғалу есебінің мысалы және қарапайым әдістермен салыстаруы берілген.*