

УДК 622.271

**ОЦЕНКА СОХРАННОСТИ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ ХВОСТОХРАНИЛИЩА
РУДНИКА КУМТОР (КЫРГЫЗСКАЯ РЕСПУБЛИКА) НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ
ЗАДАЧИ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ**

Л.А. Назарова, Л.А. Назаров, А.В. Панов, Н.А. Мирошниченко, М.К. Чыныбаев

На основе нелинейной термогидромеханической модели породного массива в окрестности защитной дамбы хвостохранилища рудника Кумтор решена обратная задача по определению параметров участка разрыва в противофильтрационном экране.

Ключевые слова: тепломассоперенос; напряженное состояние; защитная дамба; криолитозона; метод конечных элементов; обратная задача.

**ESTIMATE OF INTEGRITY OF RESISTANT COATING AT THE TAILING STORAGE
OF KUMTOR MINE (THE KYRGYZ REPUBLIC) BASED ON THE INVERSE PROBLEM
SOLUTION USING THE DATA OF PRESSURE SURVEY IN OBSERVATION WELLS**

L.A. Nazarova, L.A. Nazarov, A.V. Panov, N.A. Miroshnichenko, M.K. Chynybaev

Based on the nonlinear thermo-hydro-mechanical model of rock mass in the vicinity of protection embankment at the tailing storage of Kumtor Mine is solved the inverse problem on the parameters of rupture in anti-seepage screen.

Keywords: heat-and-mass transfer; stress state; protection embankment; screen; permafrost; finite element method; inverse problem.

В регионах распространения многолетнемерзлых пород строительство промышленных объектов нарушает природный тепловой баланс грунтов [1, 2], что может привести к уменьшению их прочности [3], разрушению зданий и сооружений [4].

Золоторудное месторождение Кумтор расположено в криолитозоне Иссык-Кульской области (Кыргызская Республика) на высоте около 4 км над уровнем моря. Добыча осуществляется открытым способом, полезный продукт извлекается методом цианирования. Загрязненные отходы сливаются в хвостохранилище. Протяженность защитной дамбы $L = 3$ км, длина основания 280 м, а высота 36 м [5]. На рисунке 1 показана сложившаяся к настоящему времени конфигурация вертикального сечения вкрест простираения дамбы. Температура производственных отходов T_0 сохраняется на уровне 3–8 °С в течении всего года. Проект возведения дамбы предусматривает покрытие поверхности дамбы защитным экраном для предотвращения проникновения флюидов во внешнюю среду. Отдельные части экрана соединяются посредством сварки [6]. Сварные швы –

наименее прочные участки экрана. Для мониторинга состояния дамбы в ее теле пробуривают наблюдательные скважины W_m (на рисунке 1 x_m – абсцисса местоположения W_m), в которых производят пьезометрические измерения.

Разработан целый спектр геомеханических моделей для исследования процессов тепломассообмена в напряженных средах [7–9]. Одной из основных сложностей является определение *in situ* значений параметров таких моделей, особенно, если они описывают взаимодействие различных физических полей. Поэтому модели зачастую упрощают [10], выделяя лишь несколько факторов, определяющих поведение объекта. Здесь – это зависимость от температуры T коэффициентов фильтрации K_f и температуропроводности K_c , а также сцепления τ_c и модуля Юнга E пород.

В начальный момент времени среда находится в мерзлом состоянии ($T_p < 0$), хранилище мгновенно до глубины h_0 заполняется флюидом с температурой $T_0 > 0$. Защитный экран покрывает дно на участке $A_1 A_2 \dots A_7$, а на $A_0 A_1$ происходит дренирование.

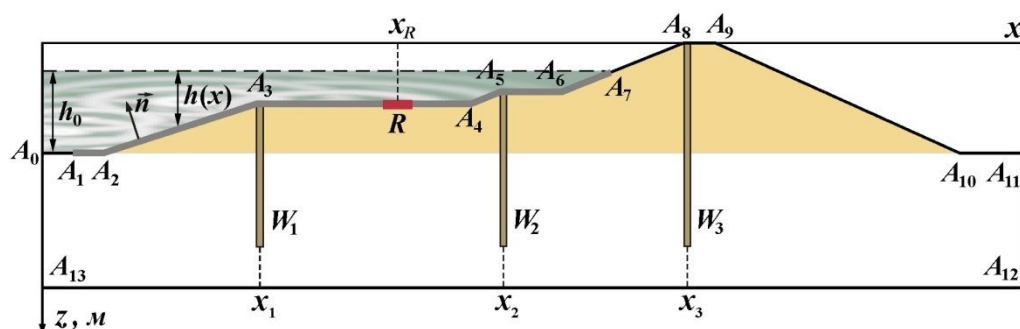


Рисунок 1 – Вертикальное сечение защитной дамбы

Поскольку поперечные размеры дамбы значительно меньше L , то здесь применима модель плоского деформированного состояния. Температура T и давление P подчиняются нелинейным параболическим уравнениям [11]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (K_c \nabla T), \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \nabla \cdot (K_f \nabla P), \quad (2)$$

а скорость фильтрации флюида – закону Дарси:

$$\vec{V} = -\frac{K_f}{\rho_0 g} \nabla P, \quad (3)$$

где t – время; g – ускорение свободного падения; ρ_0 – плотность флюида.

Напряженно-деформированное состояние объекта описывается пороупругой моделью [9], включающей уравнения равновесия (4), закон Гука (5), соотношения Коши (6):

$$\nabla \times \Sigma + \nabla G = 0 \quad (4)$$

$$\Sigma = (\lambda \text{tr} E - \beta P) I + 2\mu E \quad (5)$$

$$E = 0.5(\nabla U + \nabla U^*), \quad (6)$$

где Σ , E и I – тензоры напряжений, деформаций и единичный; U – вектор смещений; λ и μ – параметры Ламе; ρ – плотность пород; $\beta = 1 - 2\nu$; ν – коэффициент Пуассона, $G = \rho g z$ – потенциал сил гравитации.

Будем оценивать устойчивость дамбы по критерию Кулона-Мора [12]

$$\tau_{\max} = \tau_*, \quad (7)$$

($\tau_{\max} = I_2$, $\tau_* = (\sigma - P) \text{tg} \varphi + \tau_c$, $\sigma = 0.5(\Sigma_{xx} + \Sigma_{zz})$, I_2 – второй инвариант тензора напряжений, φ – угол внутреннего трения). Положительные значения величины $\Omega = \tau_{\max} - \tau_*$ указывают на зоны возможных разрушений среды.

На границе расчетной области (рисунок 1) заданы краевые условия:

- участок $A_0 A_1$
 $P = P_w$, $T = T_0$, $\Sigma_{zz} = -P_w$, $\Sigma_{xz} = 0$;
- участок $A_1 A_2 \dots A_7$
 $v_n = 0$, $T = T_0$, $\Sigma_n = -P_w n_x$, $\Sigma_t = -P_w n_z$;
- участок $A_7 A_8 \dots A_{11}$
 $P = 0$, $T = T_a(t)$, $\Sigma_n = \Sigma_t = 0$;
- участок $A_{11} A_{12} A_{13} A_0$
 $v_x = 0$, $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$, $U_x = 0$, $\Sigma_{xz} = 0$;
- участок $A_{12} A_{13}$
 $v_z = 0$, $T = T_p$, $U_z = 0$, $\Sigma_{xz} = 0$,

где $P_w = \rho_0 g h$ ($h = h(x)$ – глубина хвостохранилища; Σ_n и Σ_t – нормальная и касательная составляющие вектора напряжений на площадке с внешней нормалью $\vec{n} = (n_x, n_z)$; $T_a(t)$ – распределение температуры воздуха в течение календарного года [13]. Если в защитном экране возникает разрыв на участке R , то задаются условия дренирования, аналогичные таковым для $A_0 A_1$.

Теплофизические, фильтрационные и деформационно-прочностные свойства среды задавались по [14] и результатам компрессионных испытаний [15] искусственных образцов, по составу близким к грунтам исследуемого объекта: $\rho = 2100 \text{ кг/м}^3$, $\rho_0 = 1050 \text{ кг/м}^3$; $E = 63 \text{ МПа}$ для мерзлых пород и 27 МПа – для талых пород; $\nu = 0.35$ – для мерзлых пород и 0.3 – для талых; $\varphi = 35^\circ$ – для мерзлых пород и 25° – для талых пород; $\tau_c = 0.5 \text{ МПа}$ в мерзлых породах, в талых породах 0.1 ; $K_f = 4.5 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$; $K_c = 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ в мерзлых породах, а в талых $1.7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Параметры Ламе λ и μ в (5) выражаются через модуль Юнга и коэффициент Пуассона, принятое здесь значение K_c соответствует влажным глинам с низкой проницаемостью [16].

Система (1)–(6) с граничными условиями (8) решалась методом конечных элементов по ориги-

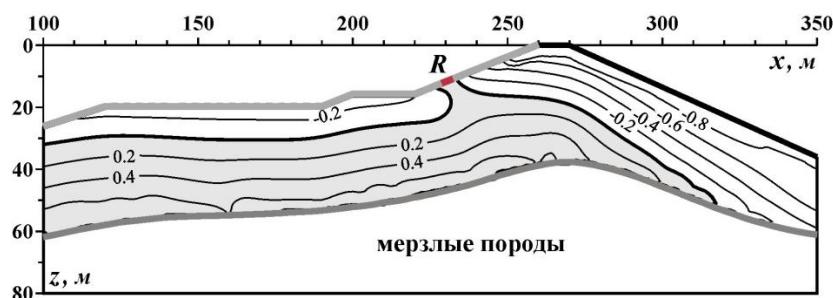


Рисунок 2 – Изолинии функции Ω (МПа)

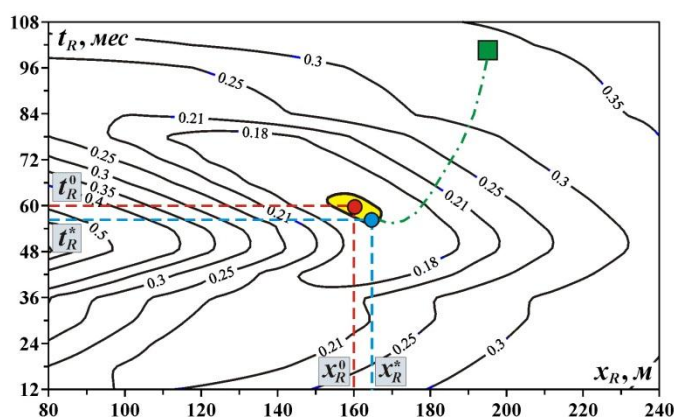


Рисунок 3 – Изолинии целевой функции в пункте измерения с координатами $x_m = 150$ м, $z_m = 32$ м

нальным кодам [10, 17], шаг дискретизации сетки с средним составлял 2 м. Температура нейтрального слоя T_p принята равной -2 °С, глубина $h_0 = 34$ м, период эксплуатации 10 лет.

Исследовалось влияние возможного повреждения защитного экрана на напряженно-деформированное состояние дамбы. На рисунке 2 представлены линии уровня функции Ω , характеризующей устойчивость объекта для случая нарушенного ($x_R = 230$ м, $t_R = 5$ лет) экрана. Как видим, даже небольшое отверстие приводит к значительному увеличению зоны возможных разрушений ($\Omega > 0$), что объясняется повышением давления в фильтрационной зоне и, соответственно, уменьшением предельного значения касательного напряжения τ_* в критерии прочности (7).

Пусть в момент времени t_R в точке x_R в защитном экране образовалось отверстие протяженностью 2 м. В качестве входной информации будем использовать пьезометрические данные – давление $P_m(t, z_k)$ (z_k – глубина заложения датчиков) в скважине W_m . Сформулируем обратную

задачу “определить положение x_R разрыва и время t_R его возникновения по входным данным P_m ”.

Введем целевую функцию

$$\Delta^2(t_R, x_R) = \frac{1}{t_*} \int_{t_m}^{t_m+t_*} [P(t, x_m, z_k, t_R, x_R) - P_m(t, z_k)]^2, \quad (9)$$

как абсолютную среднеквадратичную ошибку между теоретически рассчитанным по (1), (2) давлением $P(t, x_m, z_k, t_R, x_R)$ и давлением P_m , измеренным в той же точке (x_m, z_k) . Нижний предел t_m в (9) – момент начала резкого изменения давления в соответствующем пункте; t_* – временной промежуток, величина которого подбирается эмпирически, как правило, это первые месяцы.

Будем использовать синтетические входные данные:

$$P_m(t, z_k) = [1 + \xi(t)]P(t, x_m, z_k),$$

где $P(t, x_m, z_k)$ – решение прямой задачи – давление в пункте с координатами (x_m, z_k) , если в защитном экране произошел разрыв протяженностью 1 м в пункте с абсциссой x_R^0 в момент времени t_R^0 ; ξ – случайная величина, равномерно распределенная на

отрезке $[-\delta, \delta]$; δ – относительный уровень шума. На рисунке 3 представлены изолинии функции Δ (нормированы на максимальное значение) при $\delta = 0.3$, $t^* = 5$ месяцев, $x_R^0 = 160$ м, $t_R^0 = 5$ лет. Квадратом отмечено начальное приближение при поиске минимума Δ модифицированным методом сопряженных градиентов [18]; светлый круг – предельная точка при реализации этого метода; темный круг – точное решение (x_R^0, t_R^0) . Численные эксперименты показали, что при умеренном уровне шума ($\delta \leq 0.3$) во входных данных целевая функция унимодальна, точка ее минимума (x_R^*, t_R^*) доставляет единственное решение обратной задачи.

Для возможности применения градиентных методов при отыскании точки минимума целевой функции необходимо, чтобы пункты пьезометрических замеров были заложены на некотором удалении от мерзлой зоны, поскольку для коэффициентов температуропроводности и фильтрации нулевая изотерма является линией сильного разрыва.

Литература

1. Лушникова О.И. Особенности строительства в районах Крайнего Севера и на приравненных к ним территориях / О.И. Лушникова // Вестник Уральского ун-та. 2009. № 2(28). С. 34–37.
2. Соболев С.В. Водохранилища в области вечной мерзлоты / С.В. Соболев. Н. Новгород: ННГАСУ, 2007. 432 с.
3. Qina Y. Experimental Study for the Compressible Behavior of Warm and Ice-rich Frozen Soil Under the Embankment of Qinghai-Tibet Railroad / Y. Qina, J. Zhanga, B. Zhenga, X. Maa // Cold Regions Science and Technology. V. 57. 2–3 (July 2009). P. 148–153.
4. Влияние ГЭС на окружающую среду в условиях Крайнего Севера / под ред. В.Ф. Возина. Якутск, 1987. 88 с.
5. Осмонбетова Д.К. Современное экологическое состояние в районе верхнего течения р. Нарын и прогнозные оценки в связи с разработкой золоторудного месторождения / Д.К. Осмонбетова // Вестник КРСУ. 2011. Т. 11. № 3. С. 50–53.
6. URL:<http://www.vb.kg/244692>
7. McKenzie J.M. Groundwater flow with energy transport and water-ice phase change: Numerical simulations, benchmarks, and application to freezing in peat bogs / J.M. McKenzie, C.I. Voss, D.I. Siegel // Adv. Water Resour. 2007. V. 30. P. 966–983.
8. Колмогоров А.В. Математическое моделирование реологических деформаций насыщенной пористой среды при фазовых переходах поровой влаги / А.В. Колмогоров, Н.А. Протодьяконова // Наука и образование. 2007. № 1. С. 77–83.
9. Coussy O. Poromechanics / O. Coussy. 2004. John Wiley & Sons Ltd. 315 p.
10. Назарова Л.А. Эволюция термогидродинамических полей в окрестности защитной дамбы хвостохранилища рудника Кумтор (Кыргызская Республика) / Л.А. Назарова, Л.А. Назаров, М.Д. Джаманбаев, М.К. Чаныбаев // ФТПРПИ. 2015. № 1. С. 23–29.
11. Гончаров С.А. Термодинамика / С.А. Гончаров. М.: Изд. Моск. госуд. горного ун-та. 2002. 440 с.
12. Турчанинов И.А. Основы механики горных пород / И.А. Турчанинов, М.А. Иофис, Э.В. Каспарьян. Л.: Недра, 1989. 488 с.
13. URL:<http://www.gismeteo.ru>
14. Аксенов В.И. Коэффициенты для корректировки значений модулей деформации, полученных в результате компрессионных испытаний мерзлых грунтов / В.И. Аксенов // Электронное научн. изд. Альманах Пространство и Время. Спец. выпуск «Система планета земля». 2013. Т. 4. Вып. 1.
15. Цой П.А. Экспериментальное определение деформационно-прочностных параметров мерзлых пород при различной температуре и льдистости / П.А. Цой, Л.А. Назарова, М.Д. Джаманбаев // Матер. XXIV междунаучн. школы им. акад. С.А. Христиановича (2014 г., Симферополь, Таврический нац. ун-т). С. 245–247.
16. Свод правил 39.13330.2012 Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05–84. Дата введения 2013-01-01.
17. Назарова Л.А. Моделирование объемных полей напряжений в разломных зонах земной коры / Л.А. Назарова // Докл. АН. 1995. Т. 342. № 6. С. 804–808.
18. Назаров Л.А. Оценка напряжений и деформационных свойств породных массивов на основе решения обратной задачи по данным измерений смещений на свободных границах / Л.А. Назаров, Л.А. Назарова, А.Л. Карчевский, А.В. Панов // Сиб. журнал промышленной математики. 2012. Т. 15. № 4. С. 102–109.