

УДК 622.271

**ЭВОЛЮЦИЯ ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
В ОКРЕСТНОСТИ ЗАЩИТНОЙ ДАМБЫ ХВОСТОХРАНИЛИЩА
РУДНИКА КУМТОР (КЫРГЫЗСКАЯ РЕСПУБЛИКА)**

Л. А. Назарова^{1,2}, Л. А. Назаров^{1,2}, М. Д. Джаманбаев³, М. К. Чыныбаев³

¹*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия, E-mail: larisa@misd.nsc.ru*

²*Новосибирский государственный университет,
ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Россия*

³*Кыргызский государственный технический университет им. И. Р. Раззакова,
просп. Мира, 66, 720044, г. Бишкек, Кыргызстан*

Разработана и методом конечных элементов реализована геомеханическая модель эволюции температурного и гидродинамического полей в окрестности защитной дамбы хвостохранилища жидких отходов золоторудного месторождения Кумтор (Кыргызская Республика), расположенного в зоне вечной мерзлоты. На основе численных экспериментов выполнена оценка влияния изменения температуры флюидов в хранилище и размеров противofильтрационного экрана на объем фильтрата через дамбу. Показано, что увеличение скорости изменения давления в наблюдательной скважине может служить индикатором повреждения противofильтрационного экрана.

Грунтовой массив, термогидродинамическая модель, вечная мерзлота, рудник Кумтор, хвостохранилище, защитная дамба, противofильтрационный экран

Возведение гидротехнических сооружений (гидроэлектростанций, плотин, дамб) может изменить не только климатические условия, но и геомеханическую и геодинамическую обстановку региона [1–3]. Наличие вечной мерзлоты осложняет ситуацию: изменение температурного режима вызывает протаивание грунтов и возникновение новых путей миграции флюидов, что повышает опасность загрязнения окружающей среды [4, 5].

Вопросы моделирования тепломассопереноса в крупномасштабных природных объектах, расположенных на территории распространения многолетнемерзлых пород, рассматривались, например, в [6–13]. В основу подобных исследований для техногенных объектов зачастую положены инженерные методы оценки термогидродинамических полей и эмпирических соотношений между определяющими параметрами рассматриваемых процессов [14–18]. В [19] предложена модель, описывающая термический режим хвостохранилища в криолитозоне.

Золоторудное месторождение Кумтор находится в юго-восточной части Кыргызской Республики на высоте 3600–4400 м среди гор Тянь-Шаня в зоне многолетнемерзлых пород [20].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-05-90116 Киргизия_а).

Занимаемая рудником территория относится к континентальной климатической зоне [21], самый холодный месяц — январь (до -35°C), самый теплый — июль (до 20°C). Средняя годовая температура $\bar{T} = 5.6^{\circ}\text{C}$.

Месторождение отрабатывается открытым способом, после извлечения полезного компонента жидкие отходы собираются в хвостохранилище, защитная дамба которого наращивается по мере развития производства [22]. К настоящему времени площадь водной поверхности составляет 3.3 км^2 , высота гребня достигла 36 м , а длина основания — 280 м [23]: на рис. 1 показано вертикальное сечение рассматриваемого объекта (тело дамбы выделено серым тоном). Дно хранилища и поверхность дамбы покрыты непроницаемым материалом (противофильтрационный экран). Хранилище не замерзает в течение всего времени эксплуатации, температура флюида T_f изменяется в пределах от 4 до 8°C . Для мониторинга состояния дамбы и подстилающего грунтового массива пробурены наблюдательные скважины, где ведутся термобарические измерения.

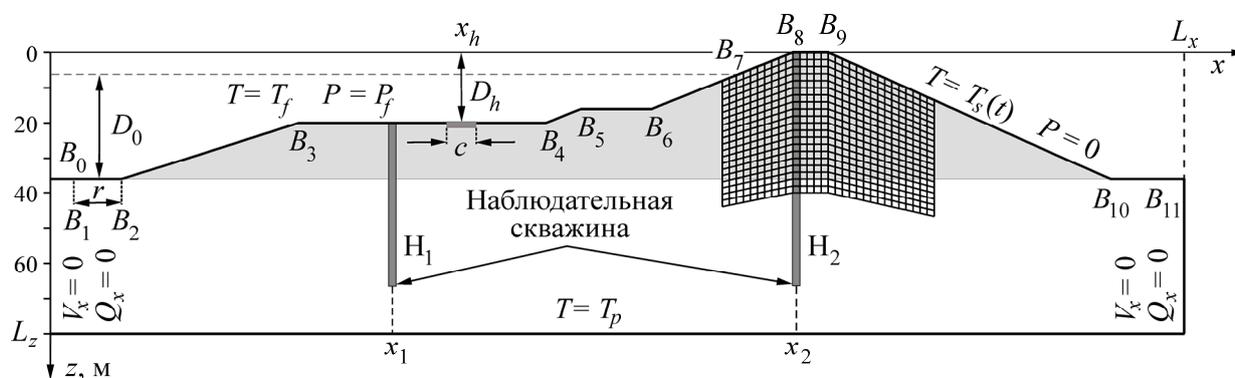


Рис. 1. Структура расчетной области, граничные условия и фрагмент сетки конечных элементов

На основе термогидродинамической модели исследована эволюция температурно-фильтрационных полей в окрестности защитной дамбы и выполнен анализ развития возможной нештатной ситуации.

ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ

На рис. 1 представлена расчетная область, нижняя граница которой $z = L_z$ (глубина залегания нейтрального слоя) расположена на мерзлых породах с постоянной отрицательной температурой T_p . Для моделирования текущего состояния рассмотрим несколько упрощенную ситуацию, игнорируя последовательность изменения конфигурации дамбы. Пусть в начальный момент времени $t = 0$ температура грунтового массива $T = T_p$ и хранилище за непродолжительное время до глубины D_0 заполняется флюидом с постоянной (из-за непрерывного процесса производства) температурой T_f .

Протяженность L_y объекта в направлении, перпендикулярном сечению на рис. 1, много больше его поперечных размеров; конфигурации этих сечений мало различаются, поэтому задача рассматривается в двумерной постановке в декартовой системе координат (x, z) . Процесс протаивания происходит намного медленнее, чем теплообмен между флюидом и грунтом, поэтому эволюцию температуры T будем описывать нестационарным уравнением теплопроводности, учитывающим конвекцию [24]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_c(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_c(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где $k_c(T)$ — коэффициент температуропроводности; V_x и V_z — горизонтальная и вертикальная скорости флюида, которые определяются из закона Дарси:

$$V_x = -\frac{k_f(T)}{p_0} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad V_z = -\frac{k_f(T)}{p_0} \frac{\partial P}{\partial z}, \quad (2)$$

p_0 — атмосферное давление; $k_f(T)$ — коэффициент фильтрации. Изменение давления P находится из уравнения линейной теории фильтрации

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_f(T) \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_f(T) \frac{\partial P}{\partial z} \right), \quad (3)$$

которое справедливо только в области, где $T > 0$.

Сформулируем следующие краевые условия (см. рис. 1):

на B_0B_1

$$T = T_f, \quad P = \rho_f g D_0 \quad (4)$$

(ρ_f — плотность флюида; g — ускорение свободного падения);

на $B_1B_2 \dots B_7$ (противофильтрационный экран)

$$T = T_f, \quad V_n = 0 \quad (5)$$

(V_n — нормальная составляющая вектора скорости);

на $B_7B_8 \dots B_{11}$ (дневная поверхность)

$$T = T_s(t), \quad P = 0 \quad (6)$$

($T_s(t)$ — распределение температуры со среднегодовым значением \bar{T});

на вертикальных границах $x = 0, L_x$

$$V_x = 0, \quad Q_x = 0 \quad (7)$$

(Q_x — горизонтальная компонента теплового потока);

на нижней горизонтальной границе

$$T = T_p, \quad V_z = 0. \quad (8)$$

Нелинейная система (1)–(3) с начальными $T(0, x, z) = T_p$, $P(0, x, z) = 0$ и граничными (4)–(8) условиями решалась методом конечных элементов [25] с использованием оригинальных наработок [26, 27], шаг дискретизации по времени 6 ч, по пространству 2 м. Приняты следующие значения модельных параметров: $L_x = 500$ м, $L_z = 80$ м, $D_0 = 34$ м, $T_p = -1^\circ\text{C}$, $\rho_w = 1020$ кг/м³, коэффициентов фильтрации k_f , температуропроводности k_c приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Коэффициенты фильтрации и температуропроводности, м²/с

Порода	k_f	k_c
Талая	0.0000020	0.0000012
Мерзлая	0	0.0000020

Выбранное значение коэффициента k_f соответствует слабопроницаемым глинам [28].

Поскольку в мерзлой зоне движение флюидов не происходит, рассмотрим в различные моменты времени после заполнения хвостохранилища положения нулевой изотермы, представленные на рис. 2 (цифры у линий — время, лет) для $T_f = 4^\circ\text{C}$. Поскольку $\bar{T} > 0$, эта изотерма удаляется от дневной поверхности с затухающей скоростью, достигая стационарного положения через 10–15 лет. Отметим, что увеличение вдвое температуры флюидов в хранилище незначительно влияет на глубину протаивания: для сравнения на рис. 2 штриховой линией показана нулевая изотерма для $t = 10$ лет при $T_f = 8^\circ\text{C}$.

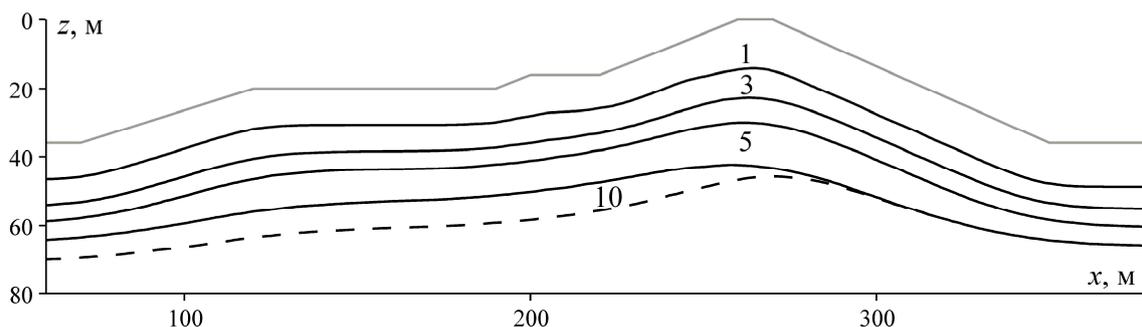


Рис. 2. Положение нулевой изотермы в различные моменты времени при $T_f = 4^\circ\text{C}$

На рис. 3 приведены линии уровня давления P при $t = 6.5$ лет и протяженности $r = 0$ горизонтального участка B_1B_2 изолирующего покрытия (см. рис. 1): очевидно, что в настоящее время фильтрационный поток достиг свободной поверхности откоса плотины.



Рис. 3. Изобары давления (атм) через 6.5 лет после заполнения хранилища

В этой связи представляет интерес сравнить объем фильтрата через плотину:

$$W(t) = L_y \int_0^t \int_C V_n dC$$

(C — контур $B_7B_8\dots B_{11}$, рис. 1) при различной величине r . На рис. 4 для $r = 0, 20$ и 40 м сплошными линиями показано изменение во времени объема W , отнесенного к значению $W_0 = W(10)$ при $r = 0$. Сравнительно небольшое увеличение r существенно снижает объем фильтрата и, следовательно, уменьшает экологическую опасность: в частности, при изменении r от 0 до 40 м величина W уменьшается практически на порядок.

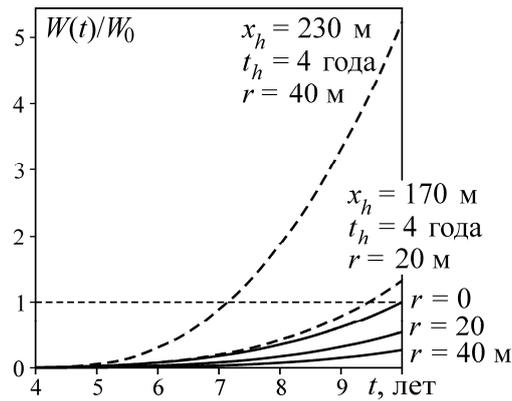


Рис. 4. Относительное изменение объем фильтрата через дамбу в различных ситуациях

Расчеты показали, что понижение среднегодовой температуры \bar{T} существенно уменьшает объем фильтрата W из-за более продолжительного существования мерзлого слоя на свободной поверхности откоса. Изменение же температуры T_f практически не влияет на величину W .

АНАЛИЗ НЕШТАТНОЙ СИТУАЦИИ

Пусть в силу той или иной причины в противофильтрационном экране в некоторый момент времени $t = t_h$ возникло отверстие (см. рис. 1) размером c с центром в точке (x_h, D_h) [29]. На рис. 5 представлено распределение в момент времени $t = 8.5$ лет приращения давления $\Delta P(t, x, z) = P(t - t_h, x, z) - P(t, x, z)$ в исследуемой области при $t_h = 4$ года, $c = 1$ м для $x_h = 170$, 230 м соответственно. Можно видеть, что отверстие является дополнительным источником флюида, при этом чем ближе отверстие к гребню дамбы, тем больше поступление фильтрата к свободной поверхности дамбы (штриховые линии на рис. 4), несмотря на то, что напор при $x_h = 230$ м вдвое меньше, чем при $x_h = 170$ м.

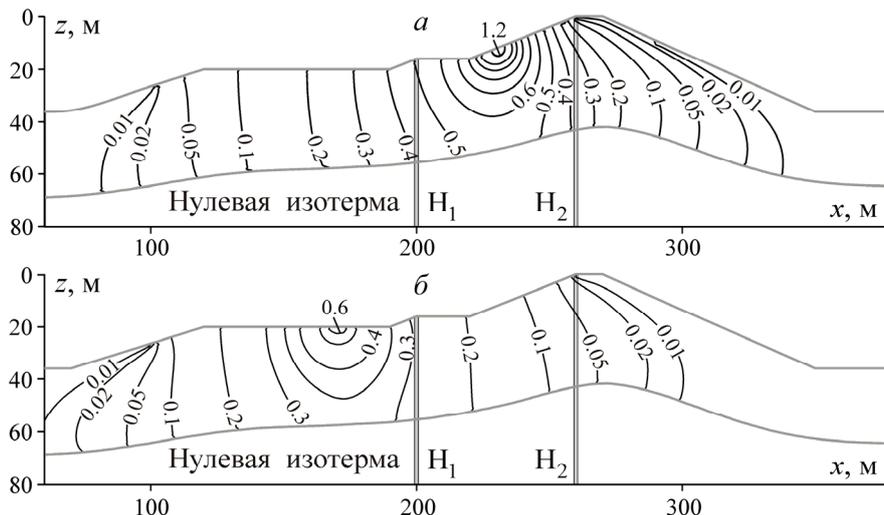


Рис. 5. Приращение давления (атм), вызванное повреждением противофильтрационного экрана, при различном положении отверстия: а — $x_h = 230$ м; б — $x_h = 170$ м

Расположенные в грунтовом массиве датчики давления реагируют на повреждение противофильтрационного экрана достаточно быстро: в течение первых месяцев (в зависимости от расстояния до места повреждения) при абсолютной точности 10 кПа. На рис. 6 показано изме-

нение во времени давления $P_h(t)$ в наблюдательных скважинах H_1 и H_2 (рис. 1): штриховые линии — противофильтрационный экран не поврежден; сплошные — отверстие расположено в точке с абсциссой $x = x_h$. Незначительные флуктуации давления во второй скважине вызваны сезонным изменением температуры, поскольку пункт измерения расположен на небольшой глубине ($z = 10$ м) от гребня дамбы.

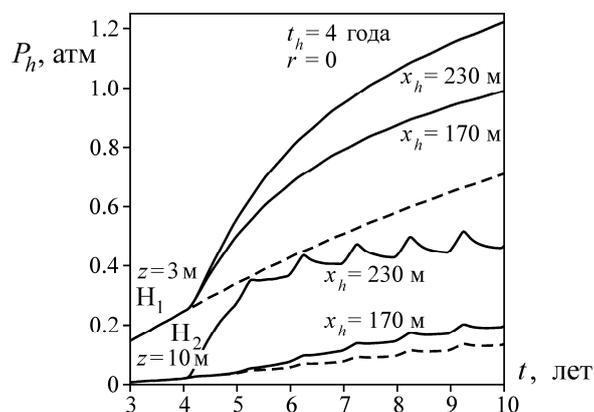


Рис. 6. Давление в наблюдательных скважинах при различном положении отверстия в противофильтрационном экране

Можно видеть, что чем ближе датчик к месту повреждения, тем больше изменяется угол наклона кривых $P_h(t)$. Таким образом, о состоянии противофильтрационного экрана можно судить по скорости изменения давления в наблюдательных скважинах.

ВЫВОДЫ

Разработана и методом конечных элементов реализована геомеханическая модель, описывающая эволюцию температуры и фильтрационные процессы в окрестности грунтовой защитной плотины хранилища жидких отходов золоторудного месторождения Кумтор, расположенного на территории распространения многолетнемерзлых пород. На основе численных расчетов установлено:

- изменение температуры флюида в технологическом диапазоне от 4 до 8 °С практически не влияет на глубину протаивания и объем фильтрата через тело плотины;
- незначительное увеличение размеров горизонтального участка противофильтрационного экрана существенно снижает объем фильтрата;
- резкий рост скорости изменения давления в наблюдательных скважинах служит признаком нарушения целостности противофильтрационного экрана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батугин А. С. Геодинамическое районирование. — М.: Изд-во МГГУ, 2003.
2. Довгань В. И. Сейсмометрические наблюдения на Токтогульской ГЭС: история и перспективы // Вестн. КРСУ. — 2006. — Т. 6. — № 3.
3. Влияние ГЭС на окружающую среду в условиях Крайнего Севера / под ред. В. Ф. Возина. — Якутск, 1987.
4. Соболев С. В. Водохранилища в области вечной мерзлоты. — Н. Новгород: ННГАСУ, 2007.
5. Биянов Г. Ф., Когодовский О. А., Макаров В. И. Грунтовые плотины на вечной мерзлоте. — Якутск, 1989.

6. **Goy L., Fabre D., and Menard G.** Modeling of rock temperatures for deep alpine tunnel projects, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1996, Vol. 29, No. 1.
7. **Bense V. F., Kooi H., Ferguson G., and Read T.** Permafrost degradation as a control on hydrogeological regime shifts in a warming climate, *J. Geophys. Res.*, 2012, 117, F03036.
8. **Michel F. A., R. O. van Everdingen.** Changes in hydrogeologic regimes in permafrost regions due to climatic change, *Permafrost Periglacial Processes*, 1994, No. 5.
9. **Rawlins M. A., Ye H., Yang D. et al.** Divergence in seasonal hydrology across northern Eurasia: Emerging trends and water cycle linkages, *J. Geophys. Res.*, 2009, 114, D18119.
10. **Bense V., Person M.** Transient hydrodynamics in inter-cratonic basins during glacial cycles, *J. Geophys. Res.*, 2008, 113, F04005.
11. **Zhang Y., Chen W., and Riseborough D. W.** Disequilibrium response of permafrost thaw to climate warming in Canada over 1850–2100, *Geophys. Res. Lett.*, 2008, 35, L02502.
12. **Zhou W., Huang S. L.** Modeling impacts of thaw lakes to ground thermal regime in northern Alaska, *J. Cold Reg. Eng.*, 2004, 18(2), 70–87.
13. **Velicogna I., Tong J., Zhang T., and Kimbal J. S.** Increasing subsurface water storage in discontinuous permafrost areas of the Lena River basin, Eurasia, detected from GRACE, *Geophys. Res. Lett.*, 2012, 39, L09403.
14. **Чжан Р. В.** Температурный режим и устойчивость низконапорных гидроузлов и грунтовых каналов в криолитозоне. — Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002.
15. **Цыбин А. М.** Некоторые вопросы расчета температурных полей, связанные со строительством и эксплуатацией гидросооружений, работающих в районах Крайнего Севера и вечной мерзлоты. — СПб.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1995.
16. **McKenzie J. M., Voss C. I., and Siegel D. I.** Groundwater flow with energy transport and water–ice phase change: Numerical simulations, benchmarks, and application to freezing in peat bogs, *Adv. Water Resour.*, 2007, 30.
17. **Lolaev A. B., Spesivtsev A. V., Spesivtsev V. V. et al.** Site investigation of tailing dam in permafrost region, *Geoenvironmental Engineering*, eds. R. N. Yong and H. R. Thomas. Thomas Telford, London, 1997.
18. **Sayles F. H.** Special Report 87-11 July 1987 US Army Corps of Engineers Cold Regions Research & Engineering Laboratory Embankment dams on permafrost Design and performance summary, bibliography and the annotated bibliography.
19. **Буйских А. А., Замош М. Н.** Прогноз термического режима хвостохранилища в условиях криолитозоны // ФТПРПИ. — 2010. — № 1.
20. www.kumtor.kg
21. **СНиП 2.01.01-82.** Строительная климатология и геофизика.
22. **Kumtor Operating Company.** Проект Кумтор-золото // Технично-экономическое обоснование. Килборн проект S566-15. — 1993.
23. **Осмонбетова Д. К.** Современное экологическое состояние в районе верхнего течения р.Нарын и прогнозные оценки в связи с разработкой золоторудного месторождения / Зап. КРСУ. — 2011. — Т.11. — № 3.
24. **Гончаров С. А.** Термодинамика. — М.: Изд-во МГГУ, 2002.
25. **Zienkiewicz O. C.** The finite element method in engineering science. London: McGraw-Hill, 1971.
26. **Назарова Л. А.** Напряженное состояние наклонно-слоистого массива горных пород вокруг выработки // ФТПРПИ. — 1985. — № 2.
27. **Назарова Л. А.** Моделирование объемных полей напряжений в разломных зонах земной коры // ДАН. — 1995. — Т. 342. — № 6.
28. **Свод правил 39.13330.2012.** Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84. Дата введения 2013-01-01.
29. **Ищенко А. В.** Обеспечение фильтрационной безопасности и эффективности противотрационных устройств гидротехнических сооружений. — Ростов-н/Д.: СКНЦВШ, 2007.