

УДК 622.271

Л.А. Назарова, Л.А. Назаров, М.Д. Джаманбаев, М.К. Чыныбаев
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ОКРЕСТНОСТИ
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ
В КРИОЛИТОЗОНЕ*

Разработана и методом конечных элементов реализована теромогидродинамическая модель, описывающая эволюцию температуры и перколяционные процессы в окрестности защитной дамбы хранилища жидким отходов горного производства, расположенной на многолетнемерзлых породах. Оценено влияние размеров противофильтрационного экрана на объем проникшего через дамбу флюида. Проанализирован сценарий развития нештатной ситуации (нарушения целостности экрана) и выявлен индикатор, позволяющий обнаружить ее возникновение.

Ключевые слова: мерзлые и талые породы, защитная дамба, тепломассоперенос, противофильтрационный экран.

Введение

При строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений различного назначения на территории распространения многолетнемерзлых пород нарушается не только природный тепловой режим, но и появляются новые пути миграции флюидов, что может привести как к потере устойчивости объекта, так и к загрязнению окружающей среды отходами производства. Различные аспекты моделирования процессов тепломассообмена применительно к объектам, расположенным в районах распространения вечной мерзлоты, рассматривались в [1, 4]. Следует отметить, что большое внимание уделяется крупномасштабным природным объектам, особенно на геологических промежутках времени [5, 9], для средне- и маломасштабных естественных и искусственных объектов подобных исследований значительно меньше [10, 12].

В настоящей работе исследован температурно-фильтрационный режим

техногенного объекта – грунтовой плотины хранилища (типичный пример – дамба рудника Кумтор, Кыргызстан) жидким отходов и проанализированы сценарии развития различных горнотехнических ситуаций.

Модель объекта, формулировка и метод решения краевой задачи

Плотина имеет форму трапеции (высота h и основание L), покоящейся на многолетнемерзлых породах с постоянной температурой $T_p < 0$ на глубине $z = Z$ залегания нейтрального слоя (рис. 1). В начальный момент времени $t = 0$ хранилище до отметки $h - z_w$ заполняется жидкими промышленными отходами с температурой T_w , которая остается постоянной вследствие непрерывного цикла производства.

На дневной поверхности $A_2A_3\dots A_7$ давление $P = 0$ и задано сезонное изменение температуры $T_s = T_s(t)$ со среднегодовым значением \bar{T}_s . На участке $A_1A_2A_4$ создан противофильтрацион-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 14-05-90116).

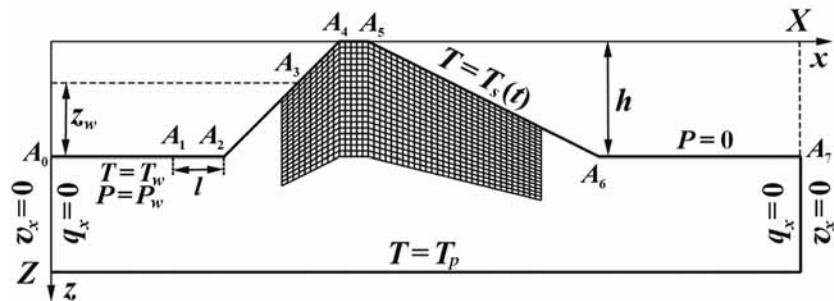


Рис. 1. Схема объекта, фрагмент сетки конечных элементов и граничные условия

ный экран так, что нормальная составляющая скорости флюида – нулевая, а $T = T_w$. На вертикальных границах $x = 0, X$ задаются условия симметрии: отсутствие теплового потока ($q_x = 0$) и движения флюида в горизонтальном направлении.

Необходимо описать эволюцию температуры в грунтовом массиве и теле плотины, а также гидродинамические процессы в талой зоне, инициированные перепадом давления. Предположим, что протяженность объекта в направлении z много больше его линейных размеров, а конфигурации сечений $y = \text{const}$ одинаковы, тогда можно рассматривать задачу в плоской постановке в декартовой системе координат (x, z) .

Теплообмен между скелетом грунта и флюидом происходит намного быстрее, чем процесс протаивания, эволюция температуры описывается нестационарным уравнением теплопроводности с конвективными членами [13]

$$T_t + \vec{v} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (a(T) \nabla T), \quad (1)$$

где $\vec{v} = (v_x, v_z)$ – скорость движения флюида, a – коэффициент температу-

ропроводности. Гидродинамические характеристики процесса (давление P и скорость \vec{v}) находятся из уравнений теории фильтрации

$$P_t = \nabla \cdot (b(T) \nabla P), \quad (2)$$

$$\vec{v} = -\frac{b(T)}{P_0} \nabla P, \quad (3)$$

где b – коэффициент фильтрации, P_0 – атмосферное давление. Отметим, что движение флюидов происходит только в талой зоне, в которой $T > 0$.

Нелинейная система уравнений (1)–(3) с начальными $T(0, x, z) = T_p$, $P(0, x, z) = 0$ и вышеописанными граничными условиями (рис. 1) решалась методом конечных элементов [14], шаг дискретизации по пространству 1 м, по времени – 1 сутки. Расчеты проводились при следующих значениях параметров модели: $X = 400$ м, $Z = 80$ м, $z_w = 30$ м, $h = 40$ м, $L = 130$ м, $T_w = -1$ °C, $T_s = 5,6$ °C, $P_w = \rho_w g z_w$, $\rho_w = 1050$ кг/м³ – плотность флюидов, ускорение свободного падения, коэффициенты a и b приведены в таблице.

Выбранная величина b соответствует низкопроницаемым глинам [15, 16].

Значения коэффициентов температуропроводности и фильтрации

Породы	$10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	$10^6, \text{ м}^2/\text{с}$
Мерзлые	2,0	0
Талые	1,2	5

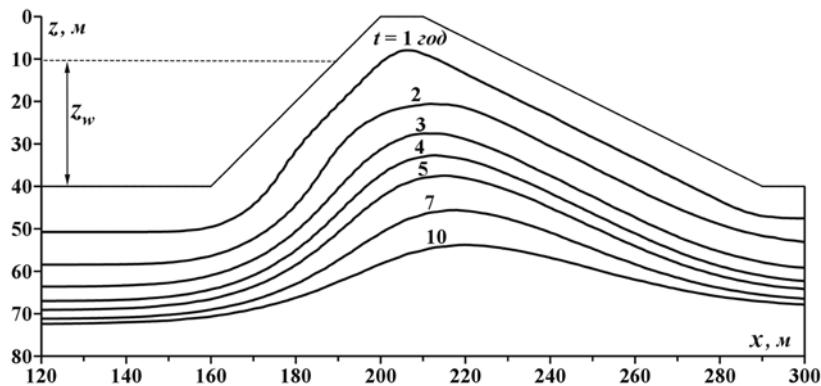


Рис. 2. Конфигурации нулевой изотермы в различные моменты времени

Параметрический анализ

Рис. 2 демонстрирует последовательные конфигурации нулевой изотермы, разделяющие талую и мерзлую зоны: поскольку среднегодовая температура положительная, то эта изотерма удаляется от дневной поверхности с уменьшающейся скоростью и примерно через 10–15 лет достигает стационарного положения (при неизменных теплофизических параметрах среды и внешних условиях). На рис. 3 темные линии – изобары давления (отнесено к P_0) при $t = 5$ лет и $l = 0$ (l – протяженность горизонтального участка A_1A_2 фильтрационного экрана, рис. 1): видно, что за этот проме-

жуток времени флюидопоток практически достиг гребня и противоположного откоса плотины.

С позиций экологической безопасности представляют интерес сравнительная оценка объема проникшего через плотину флюида при различных размерах противофильтрационного экрана

$$V(t) = W \int_0^t \int_{\Gamma} \vec{v} \cdot \vec{n} dC ,$$

где W – протяженность плотины в направлении y , \vec{n} – нормаль к дневной поверхности, C – контур $A_4A_5A_6A_7$ (рис. 1). На рис. 4 для различных l сплошными линиями показано рас-

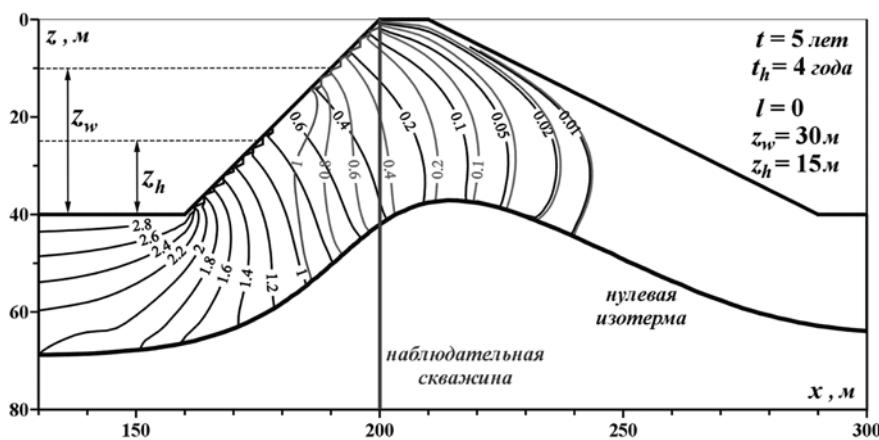


Рис. 3. Изолинии давления через 5 лет после заполнения хранилища

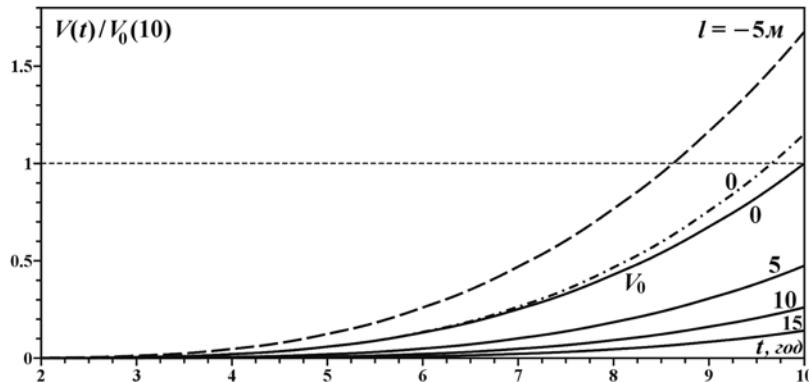


Рис. 4. Объем проникшего через плотину флюида при различных значениях l

пределение величины $V(t)$, отнесенное к ее значению при $t = 10$ лет при $l = 0$. Можно видеть, что увеличение горизонтального участка экрана существенно снижает объем фильтрата, в частности, при изменении l от 0 до 10 м величина V уменьшается практически на порядок.

Численными экспериментами установлено, что вариация температуры T_w в диапазоне 4–8 °C практически не влияет на величину V , в то же время снижение среднегодовой температуры \bar{T}_s (за счет увеличения периода отрицательных температур) существенно уменьшает V вследствие более длительного существования непроница-

емого мерзлого слоя на поверхности откоса.

Сценарий развития и диагностика нестандартной ситуации

Пусть [17] в некоторый момент времени $t = t_h$ на глубине $h - z_h$ в противофильтрационном экране возникло отверстие размером l_h (рис. 3). Проанализируем, как изменились характеристики фильтрационного процесса и оценим возможность диагностики описанной ситуации. На рис. 3 серыми линиями показаны изобары давления в момент времени $t = 5$ лет при $t_h = 4$ года, $l_h = 2$ м и $z_h = 15$ м. Здесь четко видно как резко повысилось дав-

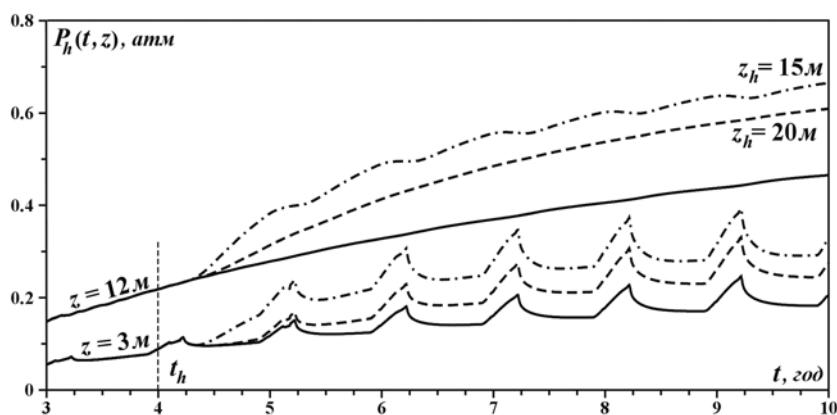


Рис. 5. Давление в наблюдательной скважине при различном положении отверстия в противофильтрационном экране

ление в окрестности отверстия и дневной поверхности. Следствием этого является увеличение объема V (штриховая линия на рис. 4), хотя размер отверстия много меньше геометрических параметров плотины.

Пробурили вертикальную наблюдательную скважину для мониторинга давления с гребня плотины (рис. 3). На рис. 5 показано изменение во времени давления $P_h(t, z)$ на отметках $z = 3$ и 12 м: сплошные линии – противофильтрационный экран не нарушен; штриховые – отверстие расположено на глубине $z_h = 15$ м; штрихпунктирные – $z_h = 20$ м.

Возникновение отверстия в экране «проявляется» в показаниях датчиков давления уже через 4–6 месяцев, причем, чем ближе оно к точке измерения, тем резче возрастает угол наклона $\alpha(z)$ кривых $P = P_h(t, z)$. Поведение параметра α на различной глубине

может служить не только индикатором целостности противофильтрационного экрана, но и указать местоположения отверстия.

Заключение

Предложена модель, описывающая эволюцию температуры и фильтрационные процессы в окрестности грунтовой защитной плотины, расположенной на территории распространения многолетнемерзлых пород. Численные эксперименты показали, что:

- изменение температуры в хранилище в диапазоне от 4 до 8 °C практически не влияет на объем проникшего через плотину флюида;
- резкое изменение наклона кривых изменения во времени давления в наблюдательных скважинах может служить признаком нарушения целостности противофильтрационного экрана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goy L., Fabre D., Menard G. Modeling of Rock Temperatures for Deep Alpine Tunnel Projects // Rock Mechanics and Rock Engineering. 1996. V. 29. N 1. 1 18.
2. Чжан Р.В. Проектирование, строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений низкого напора в криолитозоне. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2000. – 160 с.
3. Чжан Р.В. Температурный режим и устойчивость низконапорных гидроузлов и грунтовых каналов в криолитозоне. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002. – 207 с.
4. 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. – 344 с.
5. Bense V.F., Kooi H., Ferguson G. Read T. Permafrost degradation as a control on hydrogeological regime shifts in a warming climate // J. Geophys. Res. 2012. 117, F03036, doi:10.1029/2011JF002143.
6. Velicogna I., Tong J., Zhang T. Kimball 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, doi:10.1029/2012GL051623.
7. Rawlins M.A., Ye H., Yang D., Shiklomanov A., McDonald K.C. Divergence in seasonal hydrology across northern Eurasia: Emerging trends and water cycle linkages // J. Geophys. Res. 2009. 114, D18119, doi:10.1029/2009JD011747.
8. Michel F.A., van Everdingen R.O. Changes in hydrogeologic regimes in permafrost regions due to climatic change // Permafrost Periglacial Processes, 1994. 5, 191 195.
9. Bense V., Person M. Transient hydrodynamics in inter-cratonic basins during glacial cycles // J. Geophys. Res., 2008. 113, F04005, doi:10.1029/2007JF000969.
10. McKenzie J.M., Voss C.I., 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, 966 – 983, doi:10.1016/j.advwatres.2006.08.008
11. Колмогоров А.В., Протодьяконова Н.А. Математическое моделирование реологических деформаций насыщенной пористой среды при фазовых переходах поровой влаги // Наука и образование. – 2007. – № 1. – С. 77–83.

12. Степюха В.А. Особенности моделирования тепломассопереноса в условиях распространения высокотемпературных многослойных мерзлых пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 3. – С. 293–297.
13. Гончаров С.А. Термодинамика. – М.: Издательство МГТУ, 2002. – 440 с.
14. Zienkiewicz O.C. The finite element method in engineering science. London: McGraw-Hill, 1971. 521 p.
15. Свод правил 39.13330.2012 Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84. Дата введения 2013-01-01.
16. Руководство по определению коэффициента фильтрации водоносных пород методом опытной откачки. П-717-80 Гидропроект. – М.: Энергоиздат, 1981.
17. Барабанова С.Е. Случаи повреждений гидротехнических сооружений и меры по обеспечению безопасности // Гидротехническое строительство. – 1995. – № 3. – С. 24–27. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Назарова Лариса Алексеевна¹ – доктор физико-математических наук, заведующий отделом, e-mail: larisa@misd.nsc.ru,
 Назаров Леонид Анатольевич¹ – доктор физико-математических наук, зав. лабораторией, e-mail: naz@misd.nsc.ru,
 Джаманбаев Мураталы Джузумалиевич² – доктор физико-математических наук, зав. кафедрой, e-mail: jamanbaev@mail.ru,
 Чыныбаев Мирлан Койчубекович² – кандидат физико-математических наук, доцент, e-mail: chynybaev@mail.ru,
¹ Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН,
² Кыргызский государственный технический университет им. И.Р.Раззакова, Кыргызстан.

UDC 622.271

MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES IN THE VICINITY OF WATERSIDE STRUCTURES LOCATED IN CRYOLITE ZONE

Nazarova L.A.¹, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of Department, e-mail: larisa@misd.nsc.ru,
 Nazarov L.A.¹, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of Laboratory, e-mail: naz@misd.nsc.ru,
 Jamanbaev M.D.², Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of Chair, e-mail: jamanbaev@mail.ru,
 Chynybaev M.K.², Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor, e-mail: chynybaev@mail.ru,
¹ Institute of Mining of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Russia,
² Razzakov Kirghiz State Technical University, 720044, Bishkek, Kyrgyzstan.

Developed and implemented using FEM, the thermohydrodynamic model describes evolution of temperature and percolation processes in the vicinity of a protection embankment of mine liquid waste storage arranged in the permafrost formations. Effect of screen size on percolating fluid amount is evaluated. A contingency situation scenario (screen integrity violation) is analyzed, and the integrity violation indicator is defined.

Key words: frozen and thawed rocks, protection embankment, heat and mass transfer, screen.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Grant No. 14-05-90116.

REFERENCES

1. Goy L., Fabre D., Menard G. *Modeling of Rock Temperatures for Deep Alpine Tunnel Projects. Rock Mechanics and Rock Engineering.* 1996. V. 29. N 1. 1-18.
2. Chzhan R.V. *Proektirovaniye, stroitel'stvo i ekspluatatsiya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy nizkogo napora v kriolitozone* (Engineering, construction and operation of low-pressure waterworks in permafrost zone), Yakutsk, Izd-vo IMZ SO RAN, 2000, 160 p.
3. Chzhan R.V. *Temperaturnyy rezhim i ustoychivost' nizkonapornykh gidrouzlov i gruntovykh kanalov v kriolitozone* (Temperature conditions and stability of low-pressure hydraulic units and soil channels in permafrost zone), Yakutsk, Izd-vo IMZ SO RAN, 2002, 207 p.
4. Tsybin A.M. *Nekotorye voprosy rascheta temperaturnykh poley, svyazannye so stroitel'stvom i ekspluatatsiyey gidrosooruzheniy, rabotayushchikh v rayonakh Kraynego Severa i vechnoy merzloty* (Temperature field calculation issues associated with the construction and operation of waterworks in the far north and permafrost), Saint-Petersburg, VNIIG im. B.E. Vedeneeva, 1995, 344 p.
5. Bense V.F., Kooi H., Ferguson G. Read T. Permafrost degradation as a control on hydrogeological regime shifts in a warming climate. *J. Geophys. Res.* 2012. 117, F03036, doi:10.1029/2011JF002143.
6. Velicogna I., Tong J., Zhang T. Kimball 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, doi:10.1029/2012GL051623.
7. Rawlins M.A., Ye H., Yang D., Shiklomanov A., McDonald K.C. Divergence in seasonal hydrology across northern Eurasia: Emerging trends and water cycle linkages. *J. Geophys. Res.* 2009. 114, D18119, doi:10.1029/2009JD011747.
8. Michel F.A., van Everdingen R.O. Changes in hydrogeologic regimes in permafrost regions due to climatic change. *Permafrost Periglacial Processes,* 1994. 5, 191-195.
9. Bense V., Person M. Transient hydrodynamics in inter-crustal basins during glacial cycles. *J. Geophys. Res.*, 2008. 113, F04005, doi:10.1029/2007JF000969.
10. McKenzie J.M., Voss C.I., 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, 966-983, doi:10.1016/j.advwatres.2006.08.008.
11. Kolmogorov A.V., Protod'yakonova N.A. *Nauka i obrazovanie.* 2007, no 1, pp. 77-83.
12. Stetyukha V.A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2009, no 3, pp. 293-297.
13. Goncharov S.A. *Termodynamika* (Thermodynamics), Moscow, Izdatel'stvo MGGU, 2002, 440 p.
14. Zienkiewicz O.C. *The finite element method in engineering science.* London: McGraw-Hill, 1971. 521 p.
15. *Svod pravil 39.13330.2012 Plotiny iz gruntovykh materialov. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.06.05-84. Data vvedeniya 2013-01-01* (Set of rules 39.13330.2012 Earth embankments. Actual Edition of Construction Norms and Regulations 2.06.05-84. Enacted January 1, 2013).
16. *Rukovodstvo po opredeleniyu koefitsienta fil'tratsii vodonosnykh porod metodom optytnoy otkachki. P-717-80 Gidroproyekt* (Manual on assessment of seepage coefficient of water-bearing rocks by the pilot pumping method. P-717-80 Gidroproyekt), Moscow, Energoizdat, 1981.
17. Barabanova S.E. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo.* 1995, no 3, pp. 24-27.



Эффективному инженеру нет нужды много говорить, его достоинства определяются иными способами.