

УДК 532.546.2

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТАИВАНИЯ МЕРЗЛОГО ГРУНТА ПОД ОСНОВАНИЕМ ВОДОХРАНИЛИЩА***К.Р. Шекеев**КГТУ им. И.Раззакова, кафедра «Прикладная математика»*

*Приведены результаты моделирования протаивания мерзлого грунта под основанием водохранилища, а также согласование с результатами другой работы.*

**Физическое описание задачи.** Изучение влияния климатических характеристик горной местности на инженерные сооружения и соблюдение проектных решений ТЭО при строительстве и в эксплуатации, позволяет обосновать надежность и долговечность сооружения. При промерзании и оттаивании горной породы в течение года, происходит изменение их текстуры, структуры, теплофизических и особенно физико-механических свойств. В зависимости от состава горных пород (глинистых мелкодисперсных пород) при промерзании и протаивании грунтов происходит их пучение и осадки. Пучение может происходить неравномерно. В результате этого связи между элементами сооружений нарушаются, образуются трещины и происходят деформации. Поэтому при промерзании грунтов возникают опасные для устойчивости сооружений криогенные явления, а оттаивание может привести к потере их связности, в результате чего происходит оплывание откосов оросительных и осушительных каналов, открытых горных выработок.

**Постановка задачи.** В данной работе рассматривается температурный режим хвостохранилища, расположенного в условиях вечной мерзлоты.

В результате работы золоторудной фабрики в хвостохранилище сбрасываются отходы в виде

жидкой массы, где в большинстве случаев около 55% этой массы составляет вода, остальные 45% составляют мелкодисперсные твердые частицы в виде пульпы. Работа фабрики рассчитано на большие сроки. В период эксплуатации образуется отстойный пруд с намывным пляжем. Придонный слой воды имеет зимой и летом положительную температуру.

Под влиянием положительной температуры придонного слоя воды происходит оттаивание мерзлого грунта. В начальный момент грунт считается мерзлым. Требуется определить распространение тепла в грунте.

В известных работах ученых А.И. Воейкова, В.Н. Будыко, Г.М. Фельдмана, Н.А. Цытовича, А.В. Павлова процесс теплопереноса моделировался отдельно для талой и мерзлой зоны грунта, а на границе этих зон ставилось условие сопряжения [1, 2], т.е.:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_i}{\partial t} &= a_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2}, \\ \frac{\partial T_o}{\partial t} &= a_o \frac{\partial^2 T_o}{\partial x^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\lambda_n \frac{\partial T_n(h, t)}{\partial t} - \lambda_m \frac{\partial T_m(h, t)}{\partial t} = L \gamma (W - W_n) \frac{dh}{dt} \quad (2)$$

Здесь  $T_{m,m}$  - температура

грунта соответственно в мерзлой и талой зонах,  $\alpha_{m,m}$  - коэффициент теплопроводности грунта,  $c, \rho, \lambda$  - удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводность грунта,  $L$  - теплота кристаллизации воды,  $\gamma$  - объемный вес грунта,  $W$  - общая влажность,  $W_n$  - влажность соответствующая содержанию не замерзшей воды.

Коэффициент теплопроводности грунта в данном уравнении считается постоянной, что характеризует однородность грунта. Такое упрощение дает возможность построить решение

уравнения теплопроводности. В действительности коэффициент теплопроводности является переменной величиной, т.к. при промерзании и протаивании теплофизические свойства одного и того же грунта изменяются. По глубине залегания составы грунта изменяются. Поэтому коэффициент теплопроводности должен быть переменной величиной, зависящей от пространственной и временной координаты. Тогда процесс переноса тепла в неоднородной среде более точнее описывается системой уравнений

$$c\rho \frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial x} \right), \quad (3)$$

$$c\rho \frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial x} \right), \quad (4)$$

и с граничными условиями вида:

Условие на границе талого и мерзлого грунта имеет вид:

$$T_m(h,t) = T_r(h,t) = T_3, \quad (5)$$

Расчеты проводились с помощью программы COMSOL в различных вариантах граничных условий, и результаты представлены отдельно для поля температуры, поля градиента температуры в

виде графика. Область представляет собой прямоугольную форму размера 80x700 м. Область автоматически разбивается на конечные элементы, расчет ведется методом конечных элементов. Область теплопереноса схематично представлена на рис.1.

Поскольку в начальный момент грунт под основанием считается мерзлым, то теплоперенос в этой среде моделируется уравнением

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (6)$$

и граничными условиями вида

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0, (x, y) \in \tilde{A}_1, \tilde{A}_4;$$

$$T = -1,87^\circ C, x \in \tilde{A}_5;$$

$$T = T_a, (x, y) \in \tilde{A}_3;$$

$$T = T_a, (x, y) \in \tilde{A}_2. \quad (7)$$

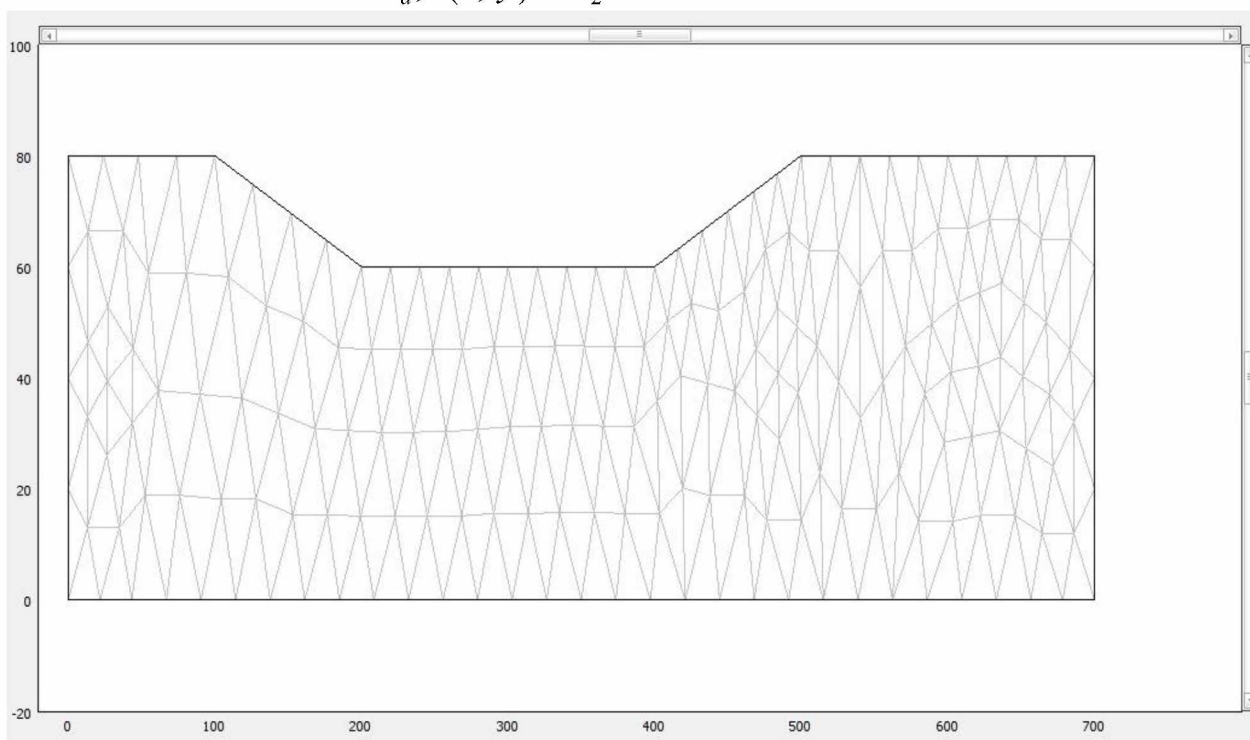


Рис. 1. Разбивка области на конечные элементы

Результаты расчета модели приведены на рис. 2 и 3.

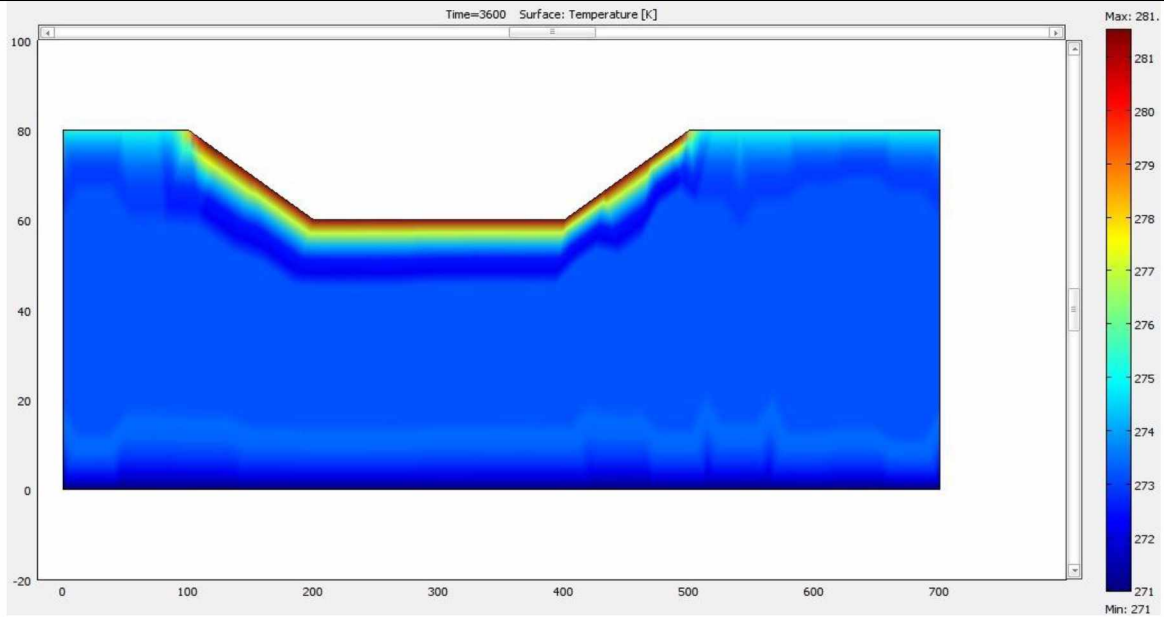


Рис. 2. Поле температуры

Как видно из рис. 2, плюсовая температура распространилась от дна водохранилища ( $\Gamma_3$ ) примерно до 12-13 метров, а на дневной поверхности на границе  $\Gamma_2$  до 7 м., при этом температура придонного слоя воды считалась равной  $+ 8^\circ\text{C}$ , а на

дневной поверхности  $T = 4^\circ\text{C}$ . Расчеты проводились в течении теплосезонного периода ( 5 месяцев). Результаты расчета хорошо согласуются с данными расчетов другой работы [3].

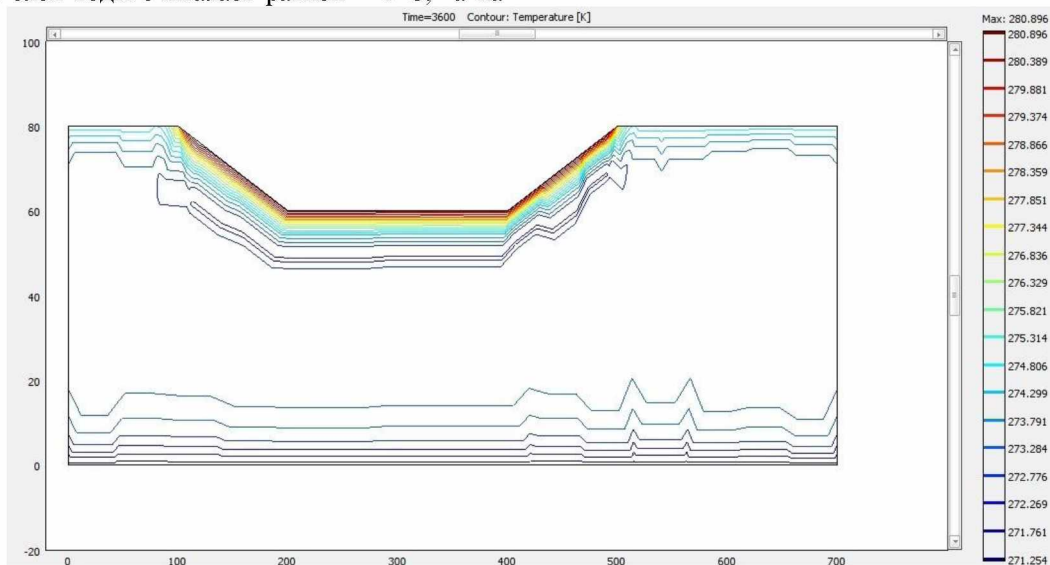


Рис. 3. Поле градиента температуры

Следует отметить, что в начальный период эксплуатации зона оттаивания будет наибольшим т.е. предельным. Затем по мере завершения срока эксплуатации зона оттаивания будет стягиваться к дневной поверхности, т.к. источник тепла будет удаляться от дневной поверхности с нарастанием мощности намывного слоя.

### Литература

1. А.В. Павлов. Теплообмен промерзающих и протаивающих грунтов с атмосферой. М.: Наука, 1965. - 253 с.
2. Г.М. Фельдман. Методы расчета температурного режима мерзлых грунтов. - М.: Наука, 1973.
3. М.Дж. Джаманбаев. Методы решения и идентификация параметров математической модели процессов переноса. - Бишкек: Илим, 1996.- 121 с.