

[DOI:10.26104/NTTIK.2023.49.38.003](https://doi.org/10.26104/NTTIK.2023.49.38.003)

Шекеев К.Р.

КОШУНДУНУН ТЕМПЕРАТУРАЛЫК ТАЛААЛАРЫНЫН ЖАНА ЖЕР ТҮЮККАБЫНЫН НЕГИЗИНИН ӨЗ АРА ТААСИРИН ИЗИЛДӨӨ

Шекеев К.Р.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПУЛЬПЫ И ОСНОВАНИЯ ХВОСТОХРАНИЛИЩА

K. Shekeev

STUDY OF MUTUAL INFLUENCE OF PULP TEMPERATURE FIELDS AND FOUNDATIONS OF TAILINGS RESERVOIR

УДК: 519.67

Бул макалада топуракта жылуулуктун таралышынын математикалык модели талкууланат. Жылуулук берүү калдык топтолуучу аймак үчүн өзүнчө жана калдык сактоочу жайдын түбүндөгү кыртыш аймагы үчүн өзүнчө каралат, ал эми аймактын чек араларынын кошулган жеринде кыртыштын температурасынын үзгүлтүксүздүгүнүн шарты белгиленет. Изилдөө объектиси – бийик тоолуу зонада, түбөлүк тоң зонасында жайгашкан калдык сактоочу жай. Изилдөөнүн предмети болуп калдык топтолуучу аймактын жана калдык сактоочу жайдын негизинин температуралык талааларынын өз ара таасири саналат. Эсептөөдө жылуулук өткөрүмдүүлүк коэффициенти мейкиндик жана убакыттык координаттарга жараша өзгөрүлмө чоңдук катары кабыл алынат, анткени тоңуу жана эрүү учурунда бир эле кыртыштын термофизикалык касиеттери өзгөрөт. Программалык комплексти колдонуу менен математикалык модель курулган, калдык сактоочу жайдын температуралык талааларынын жана калдык сактоочу жайдын негизинин өз ара таасир этүү даражасын аныктоо үчүн сандык эсептөөлөр жүргүзүлгөн.

**Негизги сөздөр:** температура талаасы, тоңгон топурак, жылуулук алмашуу, калдыктар, калдыктарды сактоочу жай.

В данной статье рассматривается математическая модель распространения тепла в грунте. Перенос тепла рассматривается отдельно для зоны отложения пульпы и отдельно для зоны грунта основания хвостохранилища, а на стыке границ области ставится условие непрерывности температуры грунта. В качестве объекта исследования выступает хвостохранилище, расположенное в высокогорной зоне, в зоне вечной мерзлоты. Предмет исследования – взаимовлияние температурных полей пульпы и основания хвостохранилища. В расчетах коэффициент теплопроводности принята как переменная величина, зависящая от пространственной и временной координаты, так как при промерзании и протаивании теплофизические свойства одного и того же грунта изменяются. При помощи пакета программ построена математическая модель, проведены численные расчеты, определяющие степень взаимовлияния температурных полей пульпы и основания хвостохранилища.

**Ключевые слова:** температурное поле, мерзлый грунт, теплообмен, пульпа, основание хвостохранилища.

This article discusses a mathematical model of heat propagation in the soil. Heat transfer is considered separately for the pulp deposition zone and separately for the soil zone at the base of the tailings dump, and at the junction of the boundaries of the region, the condition of continuity of soil temperature is set. The object of study is a tailings dump located in a high-mountain zone, in the permafrost zone. The subject of the study is the mutual influence of the temperature fields of the pulp and the base of the tailings

pond. In the calculations, the thermal conductivity coefficient is taken as a variable value depending on the spatial and temporal coordinates, since during freezing and thawing the thermophysical properties of the same soil change. Using a software package, a mathematical model was built and numerical calculations were carried out to determine the degree of mutual influence of the temperature fields of the pulp and the base of the tailings dump

**Key words:** temperature field, frozen soil, heat exchange, pulp, tailings dump base.

**Введение.** В стратегии устойчивого развития промышленности Кыргызской Республики на 2019-2023 годы развитие промышленного сектора является приоритетным направлением для социально-экономического развития страны. Из отраслей промышленности особое внимание уделяется развитию горнодобывающей промышленности и энергетике, так как они являются экономикаобразующими отраслями и в перспективе должны обеспечить максимальное удовлетворение потребностей страны в энергоресурсах.

Большинство месторождений в нашей республике расположены высокогорных районах, районах с со средними отрицательными значениями температуры воздуха. Разработка новых месторождений влечет за собой строительство различных сооружений (фабрика, завод, дамба, хвостохранилище и т.д.). При проектировании сооружений в зоне вечной мерзлоты, для безопасной и эффективной разработки полезных ископаемых требуются данные о температурном режиме грунта основания, климатические характеристики данной местности. А также требуются специальные исследования по изучению влияния процессов тепло и массопереноса в мерзлых грунтах, а также влияние этих процессов на безопасность сооружений и на окружающую среду.

В настоящее время изучение, прогноз и управление температурными полями в грунтовых средах являются необходимым элементом инженерно-геологического обоснования при строительстве объектов горнодобывающей отрасли в районах распространения вечномерзлых грунтов. На практике прогноз изменений температурного режима грунтов выполняется приближенными методами [1].

Целью данной работы является построение математической модели, позволяющей качественно ис-

следовать взаимовлияние температурных полей пульпы и основания хвостохранилища.

**Постановка задачи.** В работе не рассматривается фазовый переход, а рассматривается математическая модель распространения тепла в грунте. В процессе эксплуатации золоторудной фабрики в хвостохранилище сбрасываются отходы в виде жидкой массы, где в большинстве случаев около 55% этой массы составляет жидкость, остальные 45% составляют мелкодисперсные твердые частицы в виде пульпы.

Так как пульпа поступает в виде жидкой массы, под влиянием положительной температуры придонного слоя воды происходит оттаивание мерзлого грунта. В начальный момент времени грунт считается мерзлым. Требуется исследовать распространение тепла в грунтах при различных случаях: при различ-

ных значениях начальной температуры пульпы и температуры грунта основания хвостохранилища.

Изучению процесса теплопереноса посвящены многие работы известных ученых А.И. Воейкова, В.Н. Будыко, Г.М. Фельдмана, Н.А. Цытовича, А.В. Павлова и др. В большинстве этих работ процесс теплопереноса моделируется отдельно для талой и мерзлой зоны грунта, а на границе этих зон учитывается фазовый переход.

В данной работе рассматривается перенос тепла отдельно для зоны отложения пульпы и отдельно для зоны грунта основания хвостохранилища, а на стыке границ области ставится условие непрерывности температуры грунта. Математическая модель приведена ниже.

$$C_{II}\rho_{II} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{II} \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{II} \frac{\partial T_1}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$C_{Г}\rho_{Г} \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{Г} \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{Г} \frac{\partial T_2}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial T_2}{\partial t} = 0 \quad (x, y) \in \tilde{A}_1 \quad (3)$$

$$T_2(x, y, t) = -2^\circ C \quad (x, y) \in \tilde{A}_2 \quad (4)$$

$$T_1(x, y, t) = +6^\circ C \quad (x, y) \in \tilde{A}_3 \quad (5)$$

$$T_1(x, y) = T_2(x, y) \quad (x, y) \in \tilde{A}_4 \quad (6)$$

$$T_1(x, y, t) = +8^\circ C \quad (x, y) \in \tilde{A}_5 \quad (7)$$

$$T_2(x, y, 0) = 0^\circ C \quad (x, y) \in ABCDEFGH \quad (8)$$

$$T_1(x, y, 0) = 0^\circ C \quad (x, y) \in KDEFL \quad (9)$$

Коэффициент теплопроводности грунта в данном уравнении считается постоянной, что характеризует однородность грунта. 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 (1), (2).

Схематический чертеж области приведен на рисунке 1. Область представляет собой форму размерами 100x1000 м, глубина под основанием хвостохранилища составляет 40 м., высота отложения пульпы принята равной 20 м. На границе двух сред ставится условие непрерывности температуры ( $\Gamma_4$ ), на боко-

вых границах области ставится условие отсутствия теплового потока ( $\Gamma_1$ ), на дне пульпы  $+6^\circ C$  ( $\Gamma_3$ ), на дневной поверхности  $+8^\circ C$  ( $\Gamma_5$ ), а на глубине 40 м. от основания хвостохранилища ставится условие вечной мерзлоты ( $\Gamma_2$ ). Численная реализация данной математической модели выполнена в пакете Comsol Multiphysics [3]. Программа способна рассчитать температурное поле в заданной области. В проведенном численном эксперименте физические свойства грунтов учитывались в следующем предположении: тело плотины состоит из гравийного наполнителя, физические свойства пульпы принимались как усредненное значение физических свойств шлака. Теплофизические характеристики грунтов взяты из известных табличных данных [4].

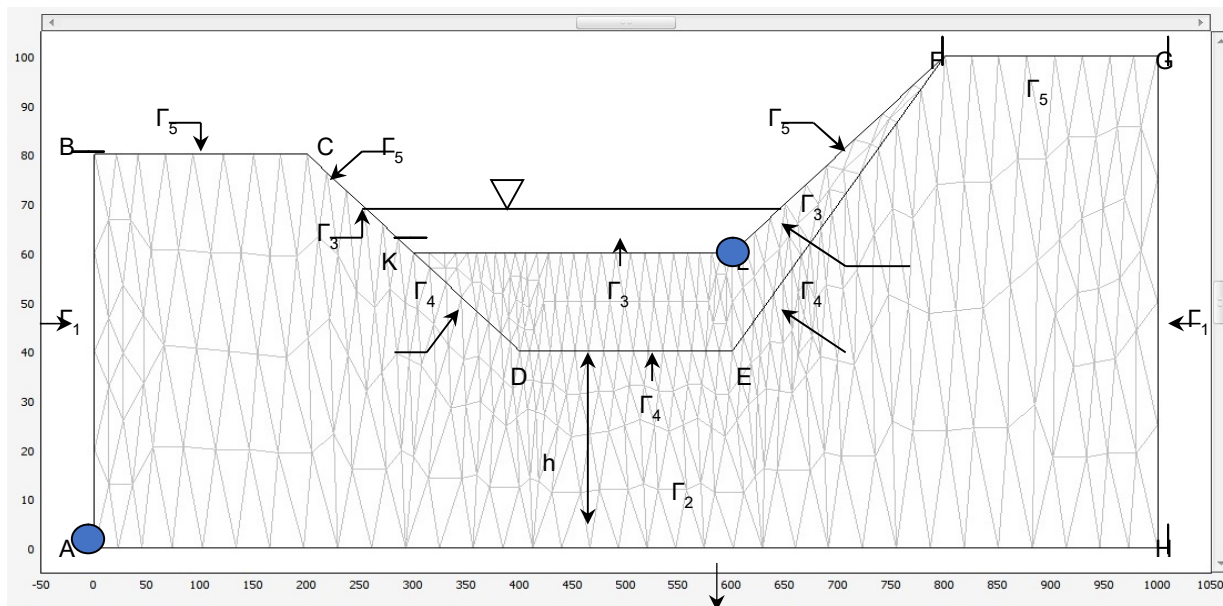


Рис. 1. Расчетная область модели.

Для исследования взаимовлияния температурных полей пульпы и основания хвостохранилища проведен следующий численный эксперимент:

1. Проведено вычисление поля температуры грунта области в самом начале, когда еще нет поступления пульпы, а начальное значение температуры грунта области была равна 0. В этом случае, за один год плюсовая температура (фронт таяния) была распространена от основания ( $\Gamma_4$ ) на 11,1 метров под воздействием температуры дневной поверхности, равной  $+8^\circ\text{C}$ .

2. Проведено вычисление, когда начальная температура области пульпы равна  $0^\circ\text{C}$ , высота отложе-

ния пульпы равна 20 м., начальная температура области основания хвостохранилища считалась равной  $0^\circ\text{C}$ . Температура придонного слоя воды считалась равной  $+6^\circ\text{C}$  (рис. 2). В этом случае, за один год плюсовая температура распространилась от верхней границы пульпы ( $\Gamma_3$ ) на 9,1 метров. Значит, когда высота пульпы равна 20 м., то зона таяния не достигнет основания хвостохранилища. Результаты расчета хорошо согласуются с данными расчетов на основе другой модели [2]. Так как пульпа поступает в хвостохранилище в виде жидкой массы, начальная температура пульпы не может быть равной нулю.

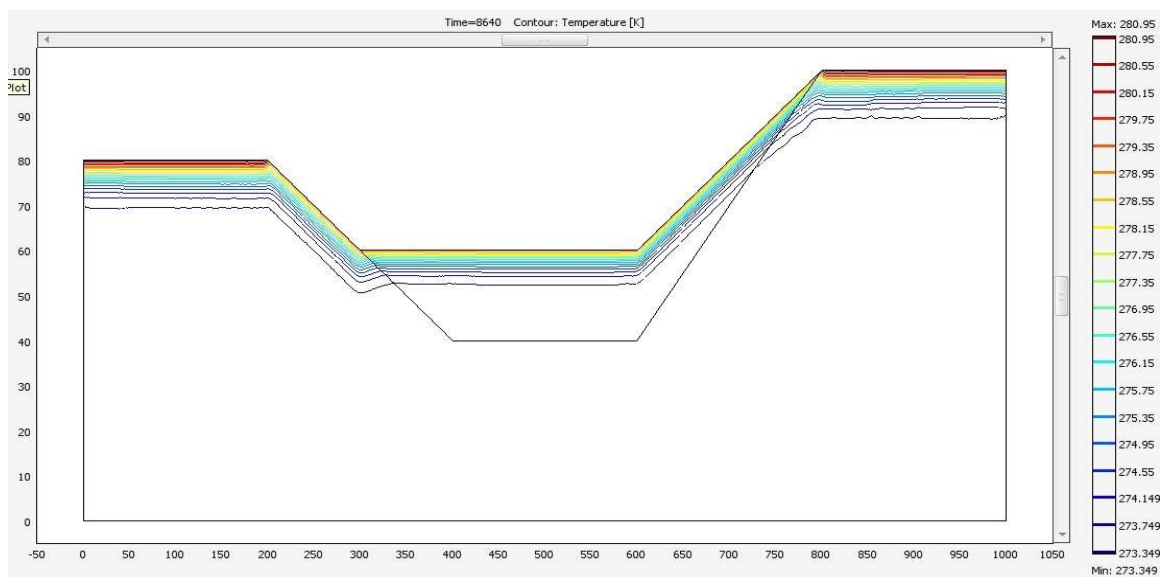


Рис. 2. Контурный график поверхности.

Для исследования взаимовлияния температур пульпы и основания тела плотины был проведен численный эксперимент в двух вариантах:

1) начальное значение температуры основания плотины была принята равной нулю, а начальное значение температуры пульпы было принято равным  $+2^{\circ}\text{C}$  и  $+4^{\circ}\text{C}$ ;

2) начальное значение температуры основания плотины была принята равным  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $-2^{\circ}\text{C}$  и  $-4^{\circ}\text{C}$ , а начальное значение температуры пульпы было постоянной  $+1,5^{\circ}\text{C}$ . Остальные параметры расчета были равны с параметрами предыдущего расчета.

Результаты эксперимента показывают, что при мерзлом состоянии тела хвостохранилища изменение

начальной температуры пульпы на  $2^{\circ}\text{C}$  приводит к углублению таяния основания хвостохранилища на 7,6 м., последующее увеличение начальной температуры пульпы на  $2^{\circ}\text{C}$  приводит к увеличению глубины таяния на 12%.

Из второго варианта эксперимента следует, что уменьшение начальной температуры основания хвостохранилища на  $-2^{\circ}\text{C}$  за один год приведет к увеличению фронта промерзания от дна хвостохранилища на 1,3 метра, последующее уменьшение начальной температуры основания на  $2^{\circ}\text{C}$  приводит к увеличению фронта промерзания на 2,5 метра.

Результаты численного эксперимента приведены на рисунках 3 и 4.

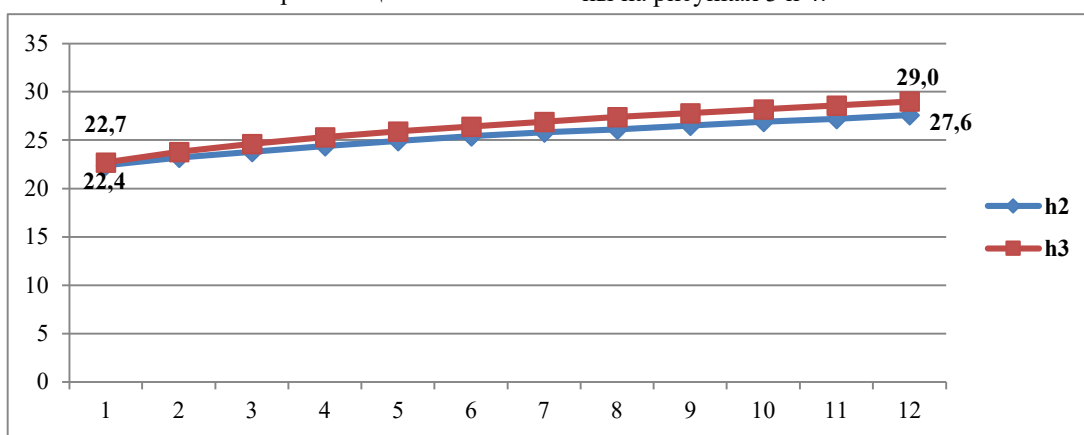


Рис. 3. 1-вариант (h2 → T = +2°C, h3 → T = +4°C).

Следует отметить, что в начальный период эксплуатации зона оттаивания будет наибольшей, т.е. предельной, так как влияние придонных отложений отходов (пульпа) не учитывалась. В действительности же придонный слой пульпы будет нарастать, и будет оказывать влияние на температурный процесс под основанием водоема. Затем по мере завершения срока эксплуатации зона оттаивания основания водоема будет стягиваться к дневной поверхности, т.к. источник тепла будет удаляться от дневной поверхности с нарастанием мощности намытого слоя.

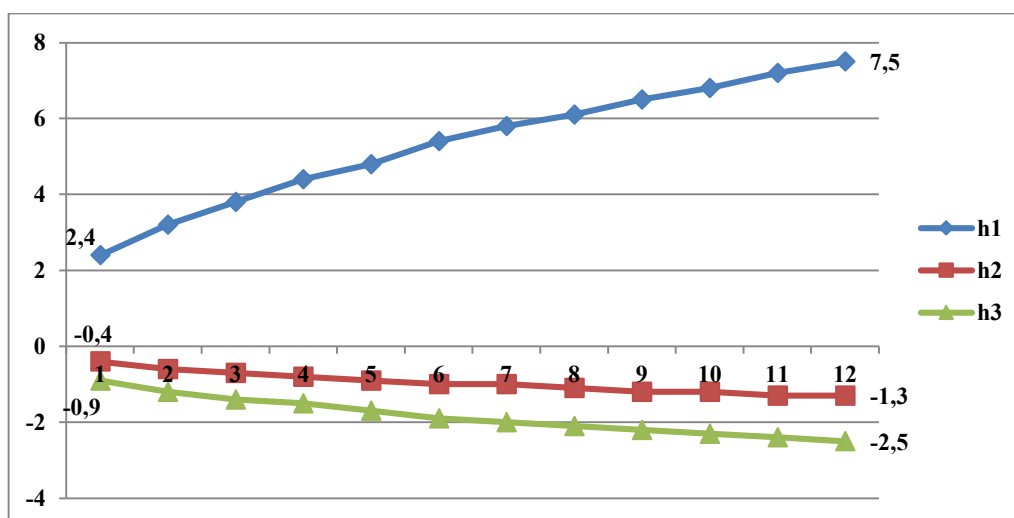


Рис. 4. 2-вариант (h1 → T = 0°C, h2 → T = -2°C, h3 → T = -4°C).

Температурный режим основания хвостохранилища сильно зависит от начального состояния температуры основания хвостохранилища и пульпы. Температуру пульпы можно считать плюсовой, так как при складировании пульпа поступает в виде жидкой массы, а температура воды в потоке плюсовая. Поэтому температурный режим основания сильно зависит от начального состояния температуры основания хвостохранилища. Если начальное значение температуры грунта минусовое, то фронт промерзания будет стягиваться от дневной поверхности, если начальное значение температуры грунта будет плюсовой, то фронт таяния будет углубляться.

**Вывод.** Складирование отходов в хвостохранилище целесообразно начинать при мерзлом состоянии основания для того, чтобы не допустить филь-

трации отходов через основания хвостохранилища.

**Литература:**

1. Крылов Д.А. Математическое моделирование распределения температурных полей в криолитозоне / Д.А. Крылов, Ю.С. Мельникова // Студенческий научный вестник. Сборник статей четвертой научно-технической выставки «Политехника». - Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. - С. 94-97.
2. Джаманбаев М.Дж. Методы решения и идентификация параметров математической модели процессов переноса / М.Дж. Джаманбаев. - Бишкек: Илим, 1996. - 121 с.
3. Бирюлин Г.В. Теплофизические расчеты в конечно-элементном пакете COMSOL/FEMLAB. / Г.В. Бирюлин. - Санкт-Петербург: СПбГУИТМО, 2006. - 98 с.
4. Заручевных И.Ю. Механика грунтов в схемах и таблицах / И.Ю. Заручевных, А.Л. Невзоров. - Москва: Изд. Ассоциации строительных вузов, 2007. - 76 с.