

менение крепи с повышенной несущей способностью, уменьшение шага крепи, тампонаж закрепного пространства и др.) и безопасности проходческих работ (использование предохранительных крепей, регулярный подробный инструктаж, строгий контроль за соблюдением правил безопасности и др.).

4. Также, на основании полученных результатов, можно сделать предварительный вывод о целесообразности проведения выработки, с точки зрения повышения её устойчивости, со стороны всячего бока дизъюнктива. В этом случае требуются менее значительные затраты на мероприятия по повышению устойчивости проводимой выработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. Под ред. Н. В. Мельникова, В. В. Ржевского, М. М. Протодьяконова. М., "Недра", 1975. 279 с.
2. Шашенко А. Н., Пустовойтенко В. П. Механика горных пород: Підручник для ВУЗів. – К.: Новий друк, 2004. – 400 с.
3. Шашенко А. Н., Сдвижкова Е. А., Кужель С. В. Масштабный эффект в горных породах: Монография. – Д.: АРТ-ПРЕСС, 2004. – 132 с.

УДК 622.02:551.345:536.2

Ю.И. Кияшко, д-р техн. наук,
В.В. Круковская, канд. техн. наук,
ИГТМ НАН Украины

К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ТЕПЛОВОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ СЫПУЧЕСТИ СМЕРЗШИХСЯ СРЕД МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Використання методу кінцевих елементів для розв'язання задачі визначення часу розморожування середовищ, які змерзлись, із застосуванням різних засобів розморожування. Як приклад наведені розподіли температурних полів у поперечному перетині залізничного вагону з вугіллям при різних джерелах тепла протягом часу нагрівання.

TO THE PROBLEM OF THERMAL RESTORE OF THE FROZEN ENVIRONMENTS FLOWABILITY BY THE FINITE ELEMENT METHOD

Use of a finite element method for the finding time of frozen environments defrosting. As an example distributions of temperature fields in the cross-section of the railway wagon with coal are resulted at various sources of heat during time of heating.

Восстановление сыпучести грузов, в частности для разгрузки железнодорожных вагонов со смерзшимся углем – весьма трудоемкий процесс. Для этого применяются различные способы: механические, в том числе вибрационные, тепловые, комбинированные. ИГТМ НАН Украины предложил новый способ комбинированного восстановления сыпучести смерзшихся грузов с использованием контактных нагревателей различных конструкций. Нами рассчитано время размораживания смерзшейся угольно-породной массы при использовании традиционного и предлагаемого способов.

Предположим, что рассматриваемое тело изотропно, температурные де-

формации элементарного объема пренебрежимо малы по сравнению с объемом тела. Основное уравнение теплопроводности имеет вид [1]:

$$c\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) + q_v,$$

где c – удельная теплоемкость; ρ – плотность материала; θ – температура; t – время; k – коэффициент теплопроводности; q_v – теплота внутренних источников.

Задача решена с помощью метода конечных элементов [1, 2]. Разобьем исследуемую плоскость на N треугольных конечных элементов с узлами $x_i, y_i, x_j, y_j, x_k, y_k$, где i, j, k изменяются в пределах от 0 до N и будем считать, что температура θ в узлах i, j, k аппроксимируется линейной функцией. Подробно алгоритм расчета представлен в работе [3].

Коэффициент теплопроводности твердых тел заметно изменяется в зависимости от температуры, влажности, объемной плотности и других свойств материала. В узком интервале температур зависимость коэффициента теплопроводности от температуры можно аппроксимировать линейной функцией $k = k_0(1 + \beta\theta)$, где k_0 – коэффициент теплопроводности при 0°C ; β – коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально.

Для решения задачи неустановившегося теплового потока необходимо ввести понятие матрицы теплоемкости, вывод которой представлен в [4].

Если в пределах элемента теплоемкость постоянна, т.е. $c_i = c_j = c_k = c$, то матрица теплоемкости имеет вид:

$$[c] = \frac{1}{48} \Delta \rho c \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}.$$

В [4] вводится понятие матрицы теплообмена. Пусть элемент i, j, k всей своей площадью соприкасается с некоторой внешней средой, закон изменения температуры которой во времени и пространстве задан:

$$\theta^{6H} = \theta^{6H}(t, x, y).$$

Таким образом, в районе узлов внешняя среда будет иметь температуры $\theta_i^{6H}, \theta_j^{6H}, \theta_k^{6H}$. Теплообмен элемента i, j, k с внешней средой происходит по закону:

$$q^{об} = \lambda(\theta^{6H} - \theta),$$

где q^{ob} – теплота, протекающая через единицу площади контакта в единицу времени; λ – коэффициент теплообмена; θ^{6H} – температура внешней среды; θ – температура элемента.

Авторами [4, 5] показано, что

$$\{q^{ob}\} = [\lambda]\{\theta^{6H} - \theta\},$$

где $\{q^{ob}\} = \begin{Bmatrix} q_i^{ob} \\ q_j^{ob} \\ q_k^{ob} \end{Bmatrix}$; $[\lambda] = \frac{1}{12} \Delta \lambda \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$ – матрица теплообмена;

$$\{\theta^{6H} - \theta\} = \begin{Bmatrix} \theta_i^{6H} - \theta_i \\ \theta_j^{6H} - \theta_j \\ \theta_k^{6H} - \theta_k \end{Bmatrix}; \lambda - \text{коэффициент теплообмена поверхности элемента с}$$

окружающей средой.

Подобно тому, как матрицы теплопроводности элементов объединяются в матрицу теплопроводности всей системы элементов, так и матрицы теплоемкости и теплообмена элементов объединяются в одноименные матрицы системы, которые связывают между собой следующие параметры:

$$\{Q\} = [c]\{\theta\},$$

$$\{q^{ob}\} = [\Lambda]\{\theta^{6H} - \theta\},$$

где $\{Q\} = \begin{Bmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_N \end{Bmatrix}$ – вектор теплоты в узлах; $[C] = \sum_{n=1}^N [C]_n$ – матрица теплоемко-

сти системы; $\{\theta\} = \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_N \end{Bmatrix}$ – вектор узловых температур; $\{q^{ob}\} = \begin{Bmatrix} q_1^{ob} \\ \vdots \\ q_N^{ob} \end{Bmatrix}$ – вектор

теплообменных потоков; $[\Lambda]$ – матрица теплообмена системы;

$$\{\theta^{6H} - \theta\} = \begin{Bmatrix} \theta_1^{6H} - \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_N^{6H} - \theta_N \end{Bmatrix}; N - \text{число узлов системы; } M - \text{число элементов.}$$

При решении задач неустановившейся теплопроводности учитывается изменение температуры элементов во времени и соответственное изменение количества теплоты в узлах и теплообменных потоков.

Расчет параметров теплового состояния системы проводится пошагово малыми интервалами времени Δt . При помощи конечно-разностного метода после преобразований получим:

$$\left([C] + \frac{\Delta t}{2} [H] - \frac{\Delta t}{2} [\Lambda] \right) \{Q\}_{t+\Delta t} = \left([C] - \frac{\Delta t}{2} [H] + \frac{\Delta t}{2} [\Lambda] \right) \{\theta\}_t - \frac{\Delta t}{2} [\Lambda] \{\theta_t^{BH} + \theta_{t+\Delta t}^{BH} \}. \quad (1)$$

Уравнение (1) можно представить в виде:

$$[\bar{P}] \{\theta\}_{t+\Delta t} = \{\bar{q}\}, \quad (2)$$

где $[\bar{P}] = [C] + \frac{\Delta t}{2} [H] - \frac{\Delta t}{2} [\Lambda]$;

$$\{\bar{q}\} = \left([C] - \frac{\Delta t}{2} [H] + \frac{\Delta t}{2} [\Lambda] \right) \{\theta\}_t - \frac{\Delta t}{2} [\Lambda] \{\theta_t^{BH} + \theta_{t+\Delta t}^{BH} \}.$$

Полагая, что на момент времени t тепловое состояние системы задано и считая вектор $\{\theta\}_{t+\Delta t}$ неизвестным, из решения системы уравнений (2) получаем распределение температур на момент времени $t + \Delta t$. Этот процесс продолжается от исходного состояния до любого текущего момента времени.

Изложенная процедура решения является устойчивой.

В качестве примера рассмотрим два способа теплового восстановления сыпучести смерзшегося в вагоне угля. Первый – вагон с грузом помещается в гараж-размораживатель, температура воздуха в котором поддерживается на уровне 80°C . Второй – к боковым стенкам вагона прижимаются контактные тепловые элементы, покрытые теплоизолирующим материалом, температура которых может быть повышена до 200°C .

Так как длина вагона и гаража-размораживателя намного превышает их ширину и высоту, будем решать задачу в плоской постановке. Исследуемая область разбивается на треугольные конечные элементы первого порядка.

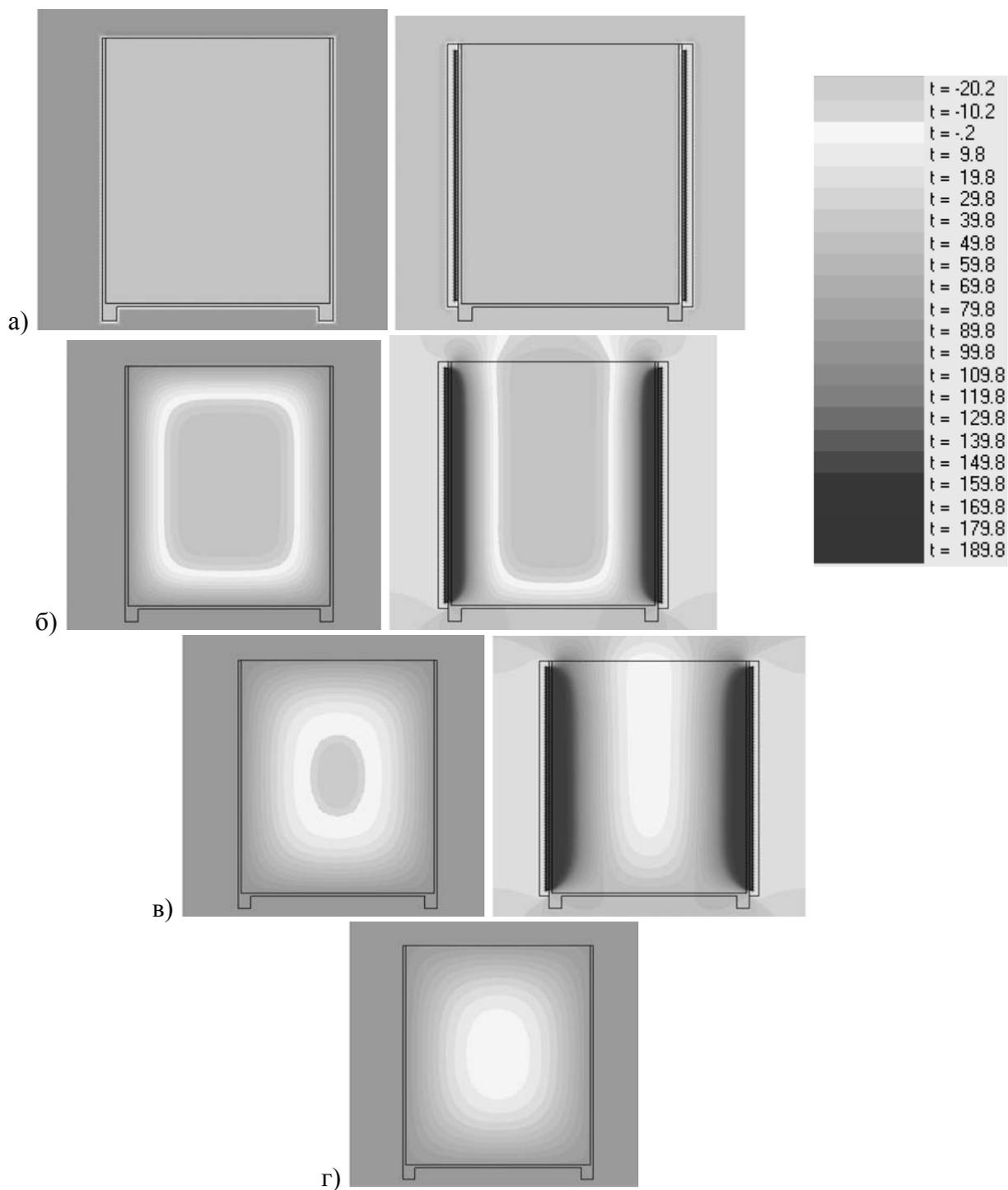
Поперечное сечение камеры – 4.0×4.5 м, вагона – 2.6×3.0 м. Вагон стальной, его боковые стенки полые.

Таблица 1 – Теплофизические характеристики материалов

Материал	Теплоемкость, c , $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	Теплопроводность, k , $\frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}}$	Удельный вес, ρ , $\frac{\text{кг}}{\text{дм}^3}$
Сталь	0,12	52,0	7,85
Уголь	0,2	0,3	1,25
Воздух	0,27	0,03	0,0013

На рис. 1 показано распределение температур в исследуемой области в

различные моменты времени для двух рассматриваемых случаев. Видно, что время размораживания в первом случае составляет 27 ч. 42 мин., во втором – 17 ч. 37 мин. То есть для принятых условий нагревание вагона с углем происходит в 1,57 раза быстрее.



а) $t = 1$ мин; б) $t = 2$ ч 31 мин; в) $t = 17$ ч 37 мин; г) $t = 27$ ч 42 мин

Рис. 1 – Особенности распространения во времени температурных полей в исследуемой области: слева – теплоносителем является воздух в гараже-размораживателе, справа – контактные нагревательные элементы

На физических моделях железнодорожного вагона со смерзшимся углем нами подтверждены расчеты того, что действие контактных нагревателей более эффективно, чем традиционных воздушных теплоносителей.

Предлагаемый метод с достаточной для практических целей точностью позволяет определять основной критерий восстановления сыпучести – продолжительность доведения груза до такого состояния, при котором разгрузка железнодорожных вагонов большого объема осуществляется без дополнительных трудо- и энергозатрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The finite element method. – Butterworth-Heinemann, 2000. – 690 p.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. Пер.с англ. Под ред. Победри Б.Е. – М. Мир, 1975. – 542.
3. Круковская В.В. К решению задач неустановившейся теплопроводности методом конечных элементов. // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / НАН Украины ИГТМ. – Днепропетровск. – 2007. – № 67. – С. 207-214.
4. Амусин Б.З., Фадеев А.Б. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики. – М. Недра, 1975. – 144 с.
5. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М. Недра, 1987. – 224 с.
6. Wilson E.L., Nickell R.E. Application of the finite element method to heat conduction analysis. Nuclear Engng. and Design, 4, №3, 1966.
7. Справочник горного инженера. – Под ред. В.К. Бучнева. – М. Государственное научно-техническое издательство литературы по горному делу, 1960. – 792 с.