

# Моделирование теплопереноса в горном массиве на интеграторе БУСЭ-70

Authors Ш.И. Ониани, О.А. Ланчава, Б.З. Гвретишвили

Publication date 1987

Journal Процессы горных работ (Научные труды)

Volume 319

Issue 7

Pages 33-37

## REFERENCES

1. Л.А. Коздоба. Электрическое моделирование явлений тепло- и массопереноса. М., 1972.
2. А.В. Лыков. Теория теплопроводности. М., Высшая школа, 1967.

ISSN 0201—7164

საქართველოს სსრ უმაღლესი და საშუალო სპეციალური განათლების სამინისტრო

საქ. ზ. ი. ლენინის სახელობის უმაღლესი სპეციალური ინსტიტუტი

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ ГССР

ГРУЗИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. В. И. ЛЕНИНА

V. I. LENIN GEORGIAN POLYTECHNIC INSTITUTE

სამთრ სამუშაოთა პროცესები

ПРОЦЕССЫ ГОРНЫХ РАБОТ

MINING PROCESSES

საბუნებისმეტყველების მეცნიერებათა

НАУЧНЫЕ ТРУДЫ

TRANSACTIONS

№7 (319)

თბილისი—ТБИЛИСИ—TBILISI

1987

ПРОЦЕССЫ ГОРНЫХ РАБОТ

Процессы горных работ.

Сборник научных трудов — Тбилиси,

Изд. ГПИИ им. В. И. Ленина, 1987, № 7 (319), с. 94.

Ил. 29, табл. 14, библиогр. 47 назв.

В сборнике исследуются технологические модели отработки выемочных полей, вопросы оптимизации основных параметров горных работ, эффективности применения частичной закладки, мероприятия по предупреждению подземных эндогенных пожаров, напряженно-деформированного состояния и управления массива в связи с ведением горных работ, разрушения горных пород и др.

Редакционная коллегия: Э. И. Цискаришвили (гл. редактор), В. С. Курцхалия (редактор, ответственный за выпуск), М. Н. Тевзадзе, А. С. Микеладзе, Т. С. Кунчулия, И. К. Гуджабидзе.

© Грузинский политехнический институт  
им. В. И. Ленина, 1987

Св. план 1987, поз. 30

Редактор М. А. Преображенская  
Технический редактор Н. Т. Цирекидзе  
Корректор Н. Ч. Долидзе

Сдано в производство 18.06.87. Подписано в печать 16.06.87.  
Формат бумаги 70×100 1/16. Печатных листов 5,8. Учетно-издательских листов 7. Тираж 500 экз. Заказ № 1021. УЭ 06319.

Цена 70 коп.

---

სპე-ს სტამბა, თბილისი, ლეონის ქ. № 77  
Типография ГПИ, Тбилиси, ул. Ленина, № 77

уровня извлечения полезного ископаемого из недр в зависимости от соотношения возмещения на I т извлеченных балансовых запасов к ценности I т потерянных балансовых запасов.

Институт горной механики  
АН СССР

Поступила в редакцию  
10.10.1986

Ш.И.Ошани, О.А.Ланчава,  
Б.З.Гвритшвили

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ГОРНОМ МАССИВЕ  
НА ИНТЕГРАТОРЕ БУСЗ-70

При решении инженерных задач по теплообмену в горных выработках часто возникает практически неразрешимые математические трудности. Поэтому в подобных случаях прибегают к методам моделирования. Как известно, моделированием на интеграторе БУСЗ-70 можно решать нелинейные дифференциальные уравнения второго порядка с частными производными  $\frac{\partial}{\partial x}$ . В основу решения задач положен конечно-разностный метод, характеризующийся некоторой приближенностью.

Целью настоящей работы является разработка практических рекомендаций по получению заданной степени приближения при моделировании. Путем сопоставления известных точных решений элементарных задач теплопроводности с результатами их моделирования можно выявить признаки, подтверждающие корректность выбора масштаба времени и "разбивки" моделируемой среды на отдельные зоны.

Рассмотрим следующую элементарную задачу: дан неограниченный цилиндр, состоящий из горной породы с равномерной начальной температурой  $t_0 = 0^\circ\text{C}$  и эквивалентным радиусом  $R_0$ . В начальный момент времени он помещен в неограниченную горную среду с равномерной температурой  $t_c = 30^\circ\text{C}$ . Физические свойства цилиндрического горного массива и среды одинаковы ( $\lambda = 2,1 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$ ;  $\rho = 83,3 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $C = 2300 \text{ кДж/м}^3\cdot\text{град}$ ;  $\gamma_0 = 1096 \text{ кг/м}^3$ ). Нагревание цилиндра происходит только за счет тепловой энергии среды, т.е. перенос осуществляется только теплопроводностью. Требуется найти распределение температуры в системе цилиндр-среда в любой момент времени. Задача симметрична относительно оси цилиндра.

Решение поставленной задачи относительно безразмерной температуры имеет вид [2]

$$\theta = \frac{t(r, z) - t_0}{t_c - t_0} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n j_0 \left( \mu_n \frac{z}{R_0} \right) \exp \left( -\mu_n^2 \frac{\alpha z}{R_0^2} \right), \quad (1)$$

где

$$A_n = \frac{2}{\mu_n j_1(\mu_n)}; \quad (2)$$

$t(r, z)$  — текущая температура окружающей среды по радиальному направлению в ортогональной плоскости оси симметрии;

$z$  — цилиндрическая координата в среде;

$j_0, j_1$  — функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков соответственно;

$\mu$  — аргумент фундаментальной функций;  $z$  — время.

Моделирование производится по радиальному направлению в ортогональной плоскости оси симметрии.

Как известно [1], при моделировании на интеграторе БУСЭ-70 задаются интервалами времени, внутри которых искомую величину находят для средних значений физических параметров задачи. В данной работе приводятся результаты 12 контрольных задач для четырех интервалов времени ( $\Delta \tau = 236; 672; 1008; 1344 \tau$ ) в двух вариантах. В обоих вариантах был смоделирован горный массив с одинаковыми физическими свойствами. В первом случае был смоделирован горный массив с радиусом 115 м с 13 узлами на блоках интегратора, а во втором случае радиус равнялся 33,6 м с 8 узлами.

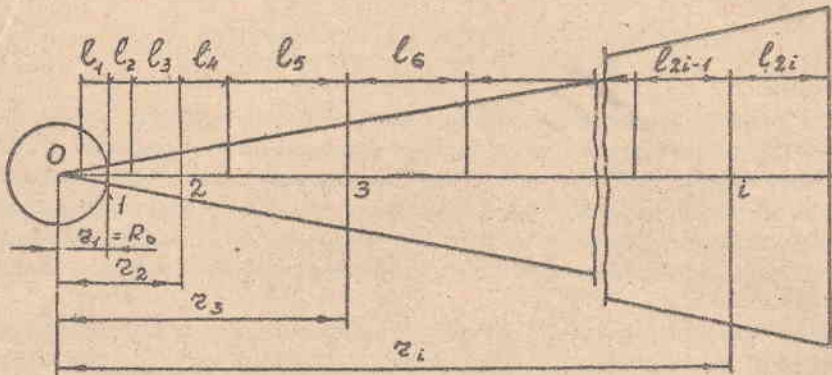


Рис. 1. Принципиальная схема "разбивки" горного массива на отдельные зоны. I вариант:  $i = 13$ ,  $l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = 0,25$ ;  $l_5 = l_6 = 0,75$ ;  $l_7 = l_8 = l_9 = l_{10} = 1,25$ ;  $l_{11} = l_{12} = l_{13} = l_{14} = 1,75$ ;  $r_{13} = 115$ . II вариант:  $i = 8$ ;  $l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = 0,1$ ;  $l_5 = l_6 = 0,75$ ;  $l_7 = l_8 = 2,6$ ;  $l_9 = l_{10} = l_{11} = l_{12} = l_{13} = l_{14} = l_{15} = 3,4$ ;  $r_8 = 33,6$ .

На рис. 1 приведена "разбивка" горного массива на отдельные зоны, которым соответствуют узлы на блоках, где сосредоточены регулируемые электрические сопротивления.

Электрическое сопротивление модели, имитирующее сопротивление переносу тепла в натуре для крайних  $i$ -тых узлов и для узлов, находящихся посередине, соответственно определяется по формулам:

$$R_{\lambda i} = \frac{l_{2i} R_N}{\lambda \tau_i \left(1 + \frac{l_{2i}}{2\tau_i}\right)}; \quad (3)$$

$$R_{\lambda i} = \frac{R_N}{\lambda_m \tau_i} \left[ \frac{l_{2(i-1)}}{1 - \frac{l_{2(i-1)}}{2\tau_i}} + \frac{l_{2i}}{1 + \frac{l_{2i}}{2\tau_i}} \right]; \quad (4)$$

где  $l$  — расстояние между узлами, м;  $R_N$  — масштаб моделирования, Ом, м. град/Вт;  $\tau$  — радиус конечной зоны натуре, м;  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ .

Электрическое сопротивление, имитирующее на модели время протекания процесса в натуре, для первого и  $i$ -того узлов соответственно определяется по формулам:

$$R_{\tau 1} = \frac{\delta_{\tau} R_N}{c \gamma_0 l_2 \varepsilon_1} ; \quad (5) \quad R_{\tau i} = \frac{\delta_{\tau} R_N}{c \gamma_0 [l(\varepsilon_{i-1}) + l_{2i}]} . (6)$$

Электрические сопротивления узлов, рассчитанные по формулам (3) - (6) для каждой зоны смоделированного горного массива (см. рис. I), приведены в таблице. Комбинацией электрических сопротивлений  $R_{\tau 1}$ ,  $R_{\tau 2}$ ,  $R_{\tau 3}$ ,  $R_{\tau 4}$  соответствующими сопротивлениями  $R_{\tau}$  можно восстановить рассмотренные нами контрольные задачи для обоих вариантов.

На рис. 2 и 3 приведено сравнение результатов точного расчета и моделиро-

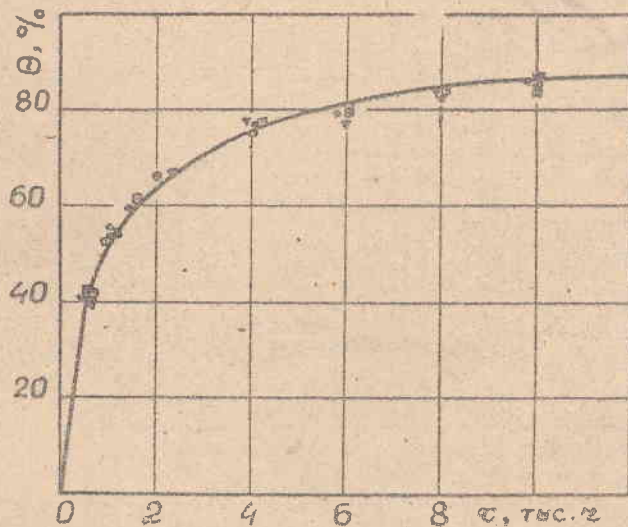


Рис. 2. Динамика безразмерной температуры оси симметрии: — результаты точного расчета; моделирование:  $\square$  -  $\delta_{\tau} = 8$  нед.;  $\square$  -  $\delta_{\tau} = 6$  нед.;  $\dots$  -  $\delta_{\tau} = 4$  нед.;  $\nabla$  -  $\delta_{\tau} = 2$  нед (вариант 2).

вания во времени и в пространстве для оси симметрии и по ее нормали. На рис. 3 группы условных знаков в кругах, обозначенных цифрами 1 и 2, соответствуют результатам моделирования по первому и второму вариантам.

Из рис. 2 следует, что выбранные нами интервалы времени практически не влияют на конечные результаты. Установлено, что погрешность моделирования не превышает 5%, если отношение интервала времени моделирования к максимальному значению промежутка времени (к продолжительности протекания процесса по условиям задачи) варьирует в пределах  $1/6 \div 1/30$ . В случае изменения указанного отношения в пределах  $1/4, 5 \div 1/5, 5$  погрешность доходит до 10%.

В специальной литературе [1] указывается о необходимости постоянного увеличения радиуса последующих зон моделируемого массива. С этой точки зрения "разбивка" массива в первом варианте (см. рис. I) близка к идеальной.

Расчетные значения амметрических сопротивлений в узлах

№ узла Сопротив- ления	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Масштаб сопро- твл. $R, \frac{\text{Ом}\cdot\text{м}\cdot\text{с}}{\text{см}}$	Шаг времени $\delta t, \tau$
$R_{\lambda_1}, \text{кОм}$	190	242	370	305	185	177	128,7	101	125	159,7	119,5	94,5	79,5	1000	-
$R_T, \text{кОм}$	584	146	24,3	7,3	4,4	2,2	1,6	1,26	0,63	0,27	0,20	0,16	0,13	1000	336
$R_Z, \text{кОм}$	1168	292	48,6	14,6	8,8	4,4	3,2	2,5	1,3	0,54	0,40	0,32	0,27	1000	672
$R_{\lambda_2}, \text{кОм}$	1752	438	73	21,8	13,3	7,3	4,8	3,8	1,9	0,80	0,60	0,50	0,40	1000	1008
$R_T, \text{кОм}$	2336	584	97,3	29,1	17,8	8,8	6,4	5,1	2,5	1,10	0,80	0,65	0,54	1000	1344
$R_{\lambda_3}, \text{кОм}$	95	121	185	153	93	89	64,3	51	63	80	50	47,2	40	1000	-
$R_T, \text{кОм}$	584	146	24,3	7,3	4,4	2,2	1,6	1,26	0,63	0,27	0,20	0,16	0,13	1000	336
$R_Z, \text{кОм}$	1168	292	48,6	14,6	8,8	4,4	3,2	2,5	1,3	0,54	0,40	0,32	0,27	1000	672
$R_{\lambda_4}, \text{кОм}$	1752	438	73	21,8	13,3	7,3	4,8	3,8	1,9	0,80	0,60	0,50	0,40	1000	1008
$R_T, \text{кОм}$	2336	584	97,3	29,1	17,8	8,8	6,4	5,1	2,5	1,10	0,80	0,65	0,54	1000	1344
$R_{\lambda_5}, \text{кОм}$	23,2	433	373,7	331	240	153	119	45,9	-	-	-	-	-	1000	-
$R_T, \text{кОм}$	365	166	7,0	1,8	0,78	0,52	0,39	0,32	-	-	-	-	-	1000	336
$R_Z, \text{кОм}$	730	332	14,0	3,6	1,6	1,0	0,78	0,64	-	-	-	-	-	1000	672
$R_{\lambda_6}, \text{кОм}$	1095	498	21,0	5,5	2,3	1,6	1,2	0,96	-	-	-	-	-	1000	1008
$R_T, \text{кОм}$	1460	663	28,2	7,3	3,1	2,1	1,6	1,3	-	-	-	-	-	1000	1344

Например, приращение радиуса второй и четвертой зон соответственно составляет 0,5 и 2 м, чего нельзя сказать о втором варианте; здесь приращение радиусов аналогичных зон соответственно составляет 0,2 и 4 м. В первом варианте радиус увеличился в 4 раза, а во втором - в 20 раз.

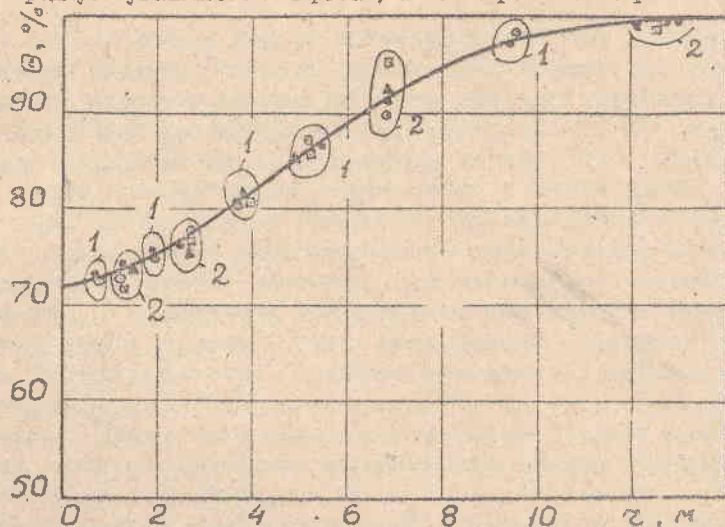


Рис.3. Распределение безразмерной температуры в горном массиве через 3000 ч по нормали оси симметрии: — результаты точного расчета; моделирование:  $\circ$  -  $\delta \tau = 8$  нед.;  $\square$  -  $\delta \tau = 6$  нед.;  $\triangle$  -  $\delta \tau = 4$  нед.;  $\diamond$  -  $\delta \tau = 2$  нед.

Однако, несмотря на такое различие изменения радиуса отдельных элементов разбивки, и в этом случае моделирование дает удовлетворительные результаты, о чем свидетельствует рис.3. Как видно из этого рисунка, приращение радиуса зон смоделированного горного массива не оказывает существенного влияния на результаты моделирования, которые в значительной степени зависят от порядка величин сопротивлений, подключаемых в узлах блока интегратора.

В заключение необходимо отметить, что "разбивку" моделируемого горного массива на отдельные зоны можно производить довольно произвольно. В этом случае достоверность получаемых результатов будет обеспечена при условии, что величины электрических сопротивлений, в узлах блока, имитирующие сопротивление среды переносу тепловой энергии, не отличались друг от друга более чем на порядок.

В отношении интервала времени необходимо отметить, что при наличии срока службы подземного сооружения ( $\tau$ ) и необходимой степени точности определения температуры окружающего горного массива методом моделирования, интервал времени можно определить согласно приведенным выше значениям соотношения  $\delta \tau / \tau$ , не прибегая к довольно сложным и трудоемким вычислениям.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коздoba Л.А. Электрическое моделирование явлений тепло-и массопереноса. М.: Энергия, 1972, 236 с.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967-600 с.

Институт горной  
механики АН СССР

Поступила в редакцию  
7.10.1986