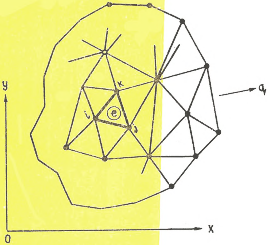

Методические указания по расчету на ЭЦВМ температурных полей при замораживании горных пород

Белгород 1980

МИНИСТЕРСТВО ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ СССР
Управление горного производства
Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по осушению месторождений полезных ископаемых, специальным горным работам, рудничной геологии и маркшейдерскому делу
ВИОГЕМ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО РАСЧЕТУ НА ЭЦВМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ЗАМОРАЖИВАНИИ ГОРНЫХ ПОРОД

Белгород 1980

УДК (622.001.57:51):622.253.3

Настоящие методические указания предназначены для численного моделирования методом конечных элементов (МКЭ) двумерных задач нестационарной теплопроводности на ЭЦВМ. Приведена инструкция по эксплуатации программы ХОЛОД I, написанной на языке ФОРТРАН-2 канд.физ.-мат.наук Васильевым В.А. и канд.техн.наук Селезневым Н.А. При отладке и апробации программы принимали участие Осадчий И.Ф., Муравьева Т.И. и Беняш Т.Е.

Работа утверждена секцией научно-технического совета института ВИОГЕМ 19 июня 1980 г. в качестве методических указаний.

ВВЕДЕНИЕ

Искусственное замораживание грунтов находит широкое применение при проходке горных выработок в сложных гидрогеологических условиях, а также при сооружении промышленных объектов глубокого заложения. Решение инженерных задач при этом требует знания распределения температуры в промерзающих грунтах для расчета скорости промерзания и оценки толщины формируемой ледопородной стенки. Задача теплопроводности с учетом фазового перехода, характерная для промерзающих грунтов, при произвольном размещении замораживающих колонок и теплофизической неоднородности горных пород, не имеет аналитического решения. Сложность проблемы и в то же время ее исключительная важность обусловили широкое применение методов математического моделирования теплофизических процессов.

Среди различных методов моделирования в настоящее время получает наибольшее развитие метод вычислительного эксперимента, основанный на использовании вычислительной математики и средств вычислительной техники, причем для сложных задач наиболее эффективным оказывается метод конечных элементов (МКЭ) [I, 2].

Алгоритм теплофизического процесса и разработанная на его основе программа для ЭЦВМ фигурируют в качестве постоянно действующей математической модели, которую несложно приспособить для конкретного объекта. Как показала практика использования МКЭ в институте ВИОГЕМ [I], постоянно действующие модели нестационарного температурного поля позволяют успешно решать сложные теплофизические задачи замораживания. Цель настоящей работы - изложить методику использования МКЭ в двумерных задачах промерзания горных пород.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Метод конечных элементов успешно применяется при моделировании на ЭЦВМ процесса двумерной нестационарной теплопроводности. Распространение тепла в промерзающих или протаивающих грунтах описывается дифференциальным уравнением пораболического типа

$$C_э \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right), \tag{I}$$

где T - температура; τ - время; x, y - координаты; $C_э$ - эффективная теплоемкость; λ - коэффициент теплопроводности.

В общем случае теплоемкость и коэффициент теплопроводности являются функциями координат и температуры, следовательно, уравнение (I) - нелинейное. Для решения уравнения задают краевые условия:

I. Начальное распределение температуры внутри рассматриваемой плоской области

$$T(x, y, 0) = T_0(x, y), \tag{2}$$

где $T_0(x, y)$ - известная функция координат.

2. Граничное условие первого рода, состоящее в задании температуры на некоторой части границы области в любой момент времени

$$T(x, y, \tau) = T_n(x, y, \tau), \tag{3}$$

где T_n - температура на границе S_1.

3. Если на границе области S_2 задан поток тепла q (условие II рода) или конвективный теплообмен (условие III рода), то граничное условие записывается в следующем виде [2]:

$$\lambda(\mathrm{grad}\, T, \vec{n}) + q + \alpha(T - T_c) = 0, \tag{4}$$

где α - коэффициент теплообмена; T - температура на границе (неизвестная); T_c - температура окружающей среды или теплоносителя в колонках; $\vec{n}$ - внешняя нормаль к поверхности.

Поток тепла q считается положительным, если тепло теряется телом, причем q и конвективная потеря тепла $\alpha(T - T_c)$ не задаются на одном участке границы одновременно. Если задано условие III рода, то $q = 0$, если задано q, то на этом участке $\alpha = 0$. Если одновременно $q = 0$ и $\alpha = 0$, то условие (4) сводится к соотношению

$$\lambda(\text{grad}\ T, \vec{n}) = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \ , \tag{5}$$

которое выражает условие теплоизоляции.

Объединение S_1, и S_2 образует полную границу рассматриваемой области. При решении задачи методом конечных элементов изучаемая область разбивается на конечное число ММ треугольных элементов произвольной формы. Все треугольники области нумеруются от I до ММ, а все вершины их (узлы) – от I до NN (рисунок). Для произвольного элемента с номерами вершин i, j, k основное уравнение метода конечных элементов имеет вид [I]

$$[g] \times \{T\} + [m] \times \frac{\partial}{\partial \tau}\{T\} = \{f\} \ , \tag{6}$$

причем элементы матриц определяются выражениями

$$g_{ij} = \int_{\Delta} \lambda \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) dx\,dy + \int_{S_2} \alpha N_i N_j \,ds \ ; \tag{7}$$

$$m_{ij} = \int_{\Delta} c_э N_i N_j \,dx\,dy \ ; \tag{8}$$

$$f_i = \int_{S_2} q N_i \,ds - \int_{S_2} \alpha T_c N_i \,ds \ , \tag{9}$$

где $$N_n = \frac{1}{2\Delta}(a_n + b_n x + c_n y), \quad n = i, j, k \ . \tag{10}$$

Функции N_n называются функциями формы [2]

$$a_i = x_j y_k - x_k y_j; \quad a_j = x_k y_i - x_i y_k; \quad a_k = x_i y_j - x_j y_i;$$
$$b_i = y_i - y_k; \quad b_j = y_k - y_i; \quad b_k = y_i - y_j;$$
$$c_i = x_k - x_j; \quad c_j = x_i - x_k; \quad c_k = x_j - x_i;$$
$$\Delta = \frac{1}{2}\left[(x_i - x_j)(y_i - y_k) - (x_i - x_k)(y_i - y_j)\right].$$

Система (6) предотавляет собой систему трех обыкновенных дифференциальных уравнений. Рассматривая расчетный интервал времени

$$0 \leqslant \tau\ \Delta \tau$$

и заменяя производную от температуры по времени конечно-разностным отношением, с помощью метода Галеркина получим следующую систему линейных алгебраических уравнений:

$$\left(\frac{1}{\Delta\tau}[m] + \frac{2}{3}[g]\right) \times \{T\}_{\Delta\tau} = \left(\frac{1}{\Delta\tau}[m] - \frac{1}{3}[g]\right) \times \{T\}_0 + \tag{II}$$

$$+ \frac{1}{3}\left(\{f\}_0 + \{f\}_{\Delta\tau}\right) \ ,$$

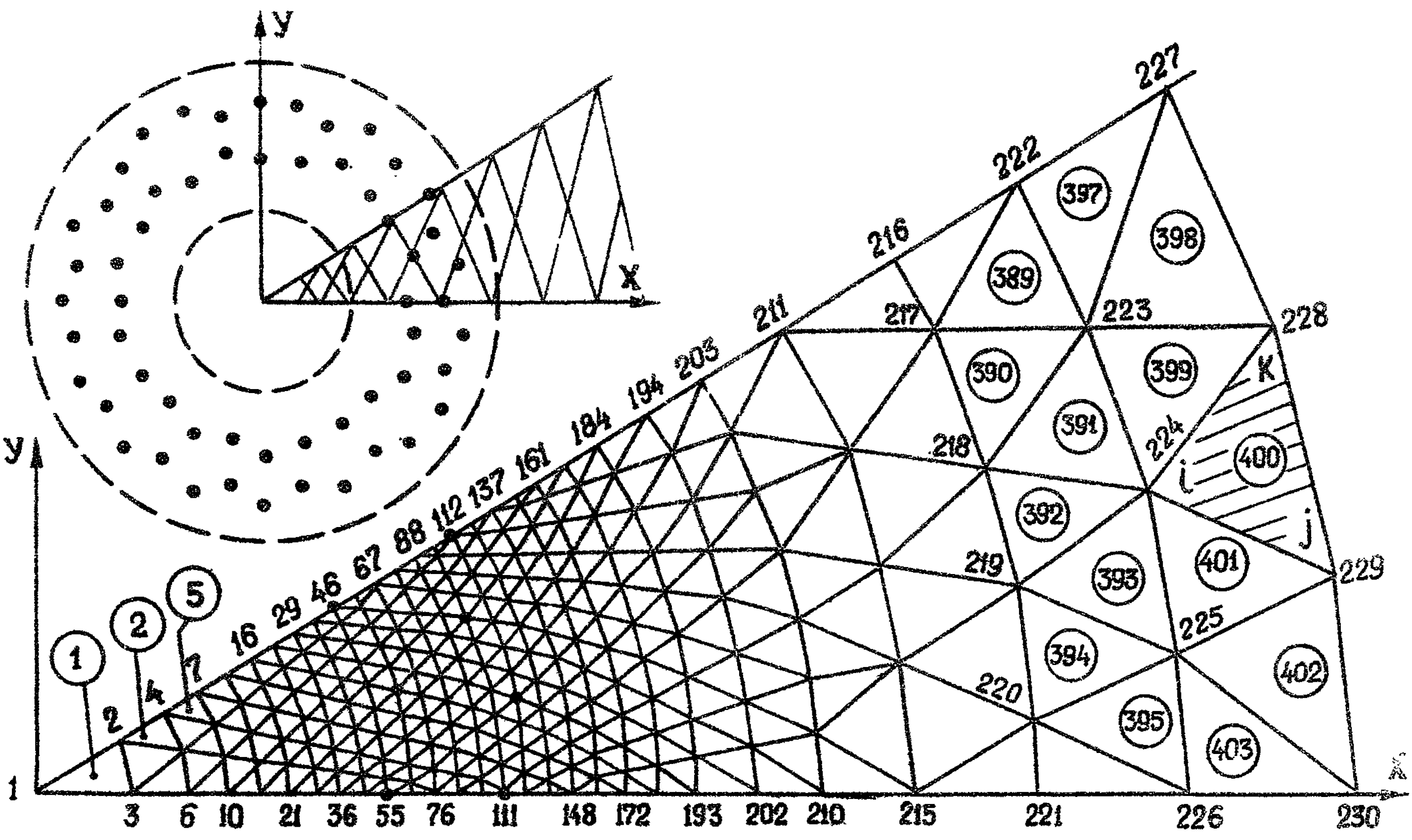

Рис. Пример триангуляции области:
I, 2, 3, ... – номера узлов; (I), (2), (3), ... – номера элементов;
● – замораживающие колонки.

где векторы $\{T\}_{\Delta\tau}$ и $\{T\}_0$ – значения температуры в вершинах элемента на моменты времени $\tau = \Delta\tau$ и $\tau = 0$ соответственно.

Матрица теплоемкости $[m]$ в развернутом виде имеет структуру

$$[m_{ij}] = \frac{C_э \Delta}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

Суммируя уравнения (II) по всем элементам области, получим результирующую систему, которая имеет вид:

$$[A] \times \{T\}_{нов} = [B] \times \{T\}_{стар} + \{\mathcal{F}\} \cdot \qquad (13)$$

Матрица $[A]$ является комбинацией матриц $[g]$ и $[m]$, зависит от шага по времени $\Delta\tau$. Система линейных алгебраических уравнений обладает свойствами, которые делают ее весьма удобной для решения, а именно, матрица системы $[A]$ симметрична и положительно определенная, причем имеет ленточную структуру. Последнее обстоятельство позволяет значительно сократить объем памяти ЭЦВМ.

Конечно-разностная схема, используемая для временной аппроксимации уравнения (6), является безусловно устойчивой. Безусловная устойчивость означает, что если распределение температуры по времени преобразовать по Фурье в частотную область, то коэффициент усиления для каждой частотной компоненты будет затухать во времени [2]. Однако при этом обычно возникают колебания числовых значений искомых величин температуры. Размах колебаний зависит от теплофизических свойств грунтов, размеров используемых треугольных элементов, величины шага по времени $\Delta\tau$ и значений Фурье-компонента температурного распределения, соответствующих началу . Поскольку теплофизические свойства грунтов обычно заданы (в прямой задаче), переменными, которыми можно варьировать, будут только размеры элемента и шаг по времени $\Delta\tau$. Одновременное уменьшение размеров элемента и $\Delta\tau$ существенно снижает размах колебаний, тогда как изменение только одной из этих величин при фиксированном значении другой не всегда уменьшает колебания. Не рекомендуется сочетание грубой разбивки области на элементы и малого шага по времени. Опыт показывает, что такая комбинация может привести к результатам, противоречащим физическому смыслу задачи. Алгоритм решения системы (13) прост и заключается в следующем: при известном тепловом состоянии грунта в рассматриваемой области на момент $\tau = 0$ вычисляются матрицы $[A]$ и $[B]$, а затем вектор правой части.

После этого, зная начальное распределение температуры $\{T\}_{стар}$ путем решения системы (13), вычисляется распределение температуры на расчетный промежуток времени $\{T\}_{нов}$. Этот процесс продолжается от исходного состояния до любого заданного момента времени. При учете фазового перехода, следует иметь в виду то обстоятельство, что когда температура приближается к температуре фазового перехода, эквивалентная теплоемкость $C_э$ претерпевает резкое импульсное изменение, подобно дельта-функции. Вследствии этого при задании эффективной объемной теплоемкости широко применяется метод усреднения, согласно которому распределение теплоты фазового перехода $Q_ф$ задается на некотором интервале температур [3]

$$C_э = C_м + Q_ф f(T) , \qquad (14)$$

где $C_м$ – объемная теплоемкость замороженного грунта; $f(T)$– некоторая функция температуры.

Для талого грунта эффективная теплоемкость принимается равной объемной теплоемкости талого грунта

$$C_э = C_т$$

Функцию $f(T)$ обычно подбирают так, чтобы распределение теплоты фазового перехода происходило в небольшом интервале температур. Однако при малых ΔT появляется опасность проскоков пиковых значений эффективной теплоемкости, что при численном решении задачи на ЭЦВМ приводит к осложнениям. Этот недостаток устраняется, если теплота фазового перехода распределяется по интервалу $T_з \leq T \leq T_п$, где $T_з$ – температура замерзания воды, а $T_п$ – температура на границе (на стенках замораживающих колонок) на конечный момент времени. При этом функция $f(T)$ должна удовлетворять условию

$$\varphi \int_{T_з}^{T_п} f(T)\, dT = 1 , \qquad (15)$$

где φ – некоторый коэффициент, зависящий от вида функции $f(T)$ и температуры $T_п$. Очевидно, можно подобрать много функций, удовлетворяющих условию (15).

Как показала практическая реализация такого подхода, удобна такая функция

$$f(T) = \frac{\varphi}{(1 + T_з - T)^2} , \qquad (16)$$

где

$$\varphi = 1 + \frac{1}{T_з - T_п} . \qquad (17)$$

При указанном методе определения эффективной теплоемкости, уравнение (I) можно решать на ЭЦВМ численным методом как обычное уравнение теплопроводности с переменными коэффициентами.

На основании описанного алгоритма составлена для ЭЦВМ программа ХОЛОД I.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОГРАММЫ

Программа ХОЛОД I предназначена для моделирования нестационарного температурного поля в горных породах и состоит из основной программы и шести подпрограмм. Весь пакет написан и отлажен на алгоритмическом языке ФОРТРАН, транслятор Ф-20 для ЭЦВМ БЭСМ-4М. Оригинал хранится на перфокартах (ГОСТ 6198-75) в фонде алгоритмов и программ отдела осушения института ВИОГЕМ. Транслированная программа записана на магнитной ленте.

Максимальное число узловых точек NN = 500, максимальное число элементов-треугольников – 800.

Ввод исходной информации осуществляется подпрограммой ВВОДТ.

В результате расчета по программе печатается:

I) номер варианта;

2) число узловых точек области;

3) число элементов;

4) максимальная разность номеров узлов в треугольниках (ширина полосы матрицы теплопроводности);

5) начальное распределение температуры;

6) расчетное время;

7) значение температуры на расчетный момент времени для каждого узла.

Выдача информации по пп. 6) и 7) повторяется.

Предусмотрена промежуточная выдача результата расчета значений узловых температур на перфокарты. При продолжении расчета полученный массив данных используется в качестве начального распределения температур.

3. ИНСТРУКЦИЯ ПО ПОДГОТОВКЕ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Для расчетов по программе ХОЛОД I готовится следующая информация.

I. Информационная карта состоит из следующей информации:

TN – расчетный интервал времени, ч;

TMAX - шаг по времени для выдачи на печать результатов расчета (TMAX = K*TN, где K - целое число шагов по времени, K = I, 2, ... n), ч;

TKOH - полное время расчета, ч;

NN - число узлов;

MM - число элементов;

TT - температура фазового перехода, ^0C;

TФT = φ $Q_{ф}$ - теплота фазового перехода, ккал/$м^3$;

NB - номер варианта.

Пример подготовки информационной карты.

TN = I0 ч; TMAX= 20 ч; TKOH= 500 ч; NN = 230; MM= 403; TT= 0^0C; TФП= 25000 ккал/$м^3$; NB = I.

+	+	2	I	0	
+	+	2	2	0	
+	+	3	5	0	0
+	+	3	23	0	0
+	+	3	403	0	0
+	+	0	0		
+	+	5	25	0	0
+	+	I	I		

2. Массивы XX(NN), YY(NN) - массивы прямоугольных координат x и y рассматриваемой области. Количество данных в каждом массиве равно количеству узлов NN. Массивы данных записываются на бланке для передачи на ВЦ в нормализованной форме.

3. Массив PP(NN) - значение граничных условий, формируется по узлам сетки, причем если в узле задана температура, то PP(i) = T(i), в противном случае - PP(i) = q(i), где q(i) - тепловой поток.

4. Массив YH(NN) - начальное распределение температуры (по узлам сетки).

5. Массив TTГ(MM) - теплоемкость талого грунта, формируется по числу элементов .

6. Массив TMГ(MM) - теплоемкость мерзлого грунта, формируется по элементам.

7. Массив ЛT(MM) - теплопроводность талого грунта, готовится по элементам.

8. Массив Л3 (MM) - теплопроводность мерзлого грунта, готовится по элементам.

9. Массив NP(NN) – признаки граничных условий, вводится форматным вводом по формату I1. При подготовке исходных данных записывается на бланках ФОРТРАН. При NP(i) = 0 в узел с номером i задается тепловой поток величиной PP(i), а при NP(i) = I в этот узел задается значение температуры PP(i).

10. Массив NM(3, MM) – номера узлов, окружающих данный треугольный элемент. Массив записывается на бланках ФОРТРАН по формату I9.

Для расчета по программе ХОЛОД I комплектуется колода перфокарт с директивами ОС-M220, которые вызывают программу, записанную на магнитной ленте. После вызова программы вводятся исходные данные. Для выдачи узловых значений температуры на перфокарты необходимо на КЗУ1 ЭЦВМ БЭСМ-4М набрать произвольный код, отличный от нуля. Выданная колода перфокарт ставится в читающее устройство и нажатием клавиши "Пуск" производится фиктивный ввод с контрольным суммированием. При несовпадении контрольной суммы нажатием "Пуск" ввод повторяется. Массивы 2. – 8. записываются на бланках в нормализованной форме. Ниже приводится распечатка программы ХОЛОД I.

```
      PROGRAM ХОЛОД1
      DIMENSION XX,УУ,VH(500)
  333 FORMAT(10X,'ШИРИНА ПОЛОСЫ РАВНА',I10)
      EXTERNAL ЧТЗУ,ЗПЗУ,УПЕРФ
      PP=2HPP;VQ=2HVQ;NM=2HNM;NP=2HNP;ЛТ=2HЛТ;ЛЗ=2HЛЗ;ТТГ=3HТТГ;
     *ТМГ=3HТМГ;SM=2HSM
      CALL LOADGO(2,2,9,PP,1,500,VQ,1,500,NM,1,800,NP,1,500,ЛТ,1,
      800,ЛЗ,
     *1,800,ТТГ,1,800,ТМГ,1,800,SM,1,15000,5HRMOZУ)
      CALL LOADGO(XX,УУ,NP,PP,VH,NM,TN,TMAX,ТКОН,NN,MM,TT,ТТГ,
      ТМГ,ТФП,ЛТ
     *,ЛЗ,ТП,NB,ЧТЗУ,ЗПЗУ,5HВВОДТ)
      T=TN
      CALL LOADGO(NM,MM,NN,KW,ЧТЗУ,6HPOLOSA)
      ТП=TMAX;T=TN
      KK=0
      GOTO 10078
10086 CONTINUE
      CALL LOADGO(XX,УУ,VQ,VH,SM,TN,KW,NN,MM,TT,ТТГ,ТМГ,ТФП,ЛТ,
      ЛЗ,ЧТЗ
     *У,ЗПЗУ,6HMATRIX)
      DO 10150 I=1,NN
      IF(ЧТЗУ(NP,I))10150,10149,10150
10149 R=ЧТЗУ(PP,I);CALL ЗПЗУ(ЧТЗУ(VQ,I)+R,VQ,I)
10150 CONTINUE
      CALL LOADGO(SM,NN,VQ,KW,PP,NP,ЧТЗУ,ЗПЗУ,6HМОДИФ1)
      CALL LOADGO(VQ,SM,KW,NN,VH,ЧТЗУ,ЗПЗУ,5HГАУСС)
      KK=KK+1;T=T+TN
      IF(I-TMAX)10086,10086,10087
10087 T=T-TN
10078 CALL LOADGO(KK,T,VH,NN,УПЕРФ,6HПЕЧ001)
      IF(KK)10099,10086,10099
10099 TMAX=TMAX+ТП
      T=T+TN
      IF(TMAX-ТКОН)10086,10086,10088
10088 STOP
      END
```

```
      SUBROUTINE ВВОДТ(XX,УУ,NP,PP,УН,NM,TN,TMAX,TKOH,NN,MM,TT
      TTГ,TMГ,T
     *ФП,ЛТ,ЛЭ,ТП,NB,ЧТЗУ,ЗПЗУ)
      DIMENSION XX,УУ,УН(1),ФФ(60),NR(12)
10006 FORMAT(56X,'ВАРИАНТ',3X,I4///)
10009 FORMAT('ШАГ СЧЕТА ПО ВРЕМЕНИ',F8.1/'ШАГ ПЕЧАТИ ПО ВРЕМЕНИ
      F8.1/'К
     *ОНЕЧНОЕ РАСЧЕТ. ВРЕМЯ',F8.1/'ЧИСЛО УЗЛОВ',I5/'ЧИСЛО ТРЕУ
      ГОЛЬНИКОВ'
     *,I5/'ТЕМПЕРАТУРА  ТАЯНИЯ ГРУНТА,ГРАД С',F7.2/'ТЕПЛОТА ФАЗ
      ВОГО ПЕР
     *ЕХОДА',F10.1/)
  770 FORMAT(I1)
  771 FORMAT(I9)
  772 FORMAT (I10)
      CALL ВВОД1(TN,TMAX,TKOH,NN,MM,TT,TФП,NB)
      PRINT 10009,TN,TMAX,TKOH,NN,TT,TФП
      CALL ВВОДМ(XX,NN)
      CALL ВВОДМ(УУ,NN)
      CALL ВВОДМ(УН,NN)
      DO 222I=1,NN
  222 CALL ЗПЗУ(УН(I),PP,I)
      CALL ВВОДМ(УН,NN)
      IПЕ=1
   39 IF(IПЕ-5)38,63,63
   38 IF(MM-60)40,41,41
   40 KФ=MM;GO TO 42
   41 KФ=60
   42 I=1
   13 CALL ВВОДМ(ФФ,KФ);GO TO(60,61,611,62),IПЕ
   60 DO 6 J=1,KФ
    6 CALL ЗПЗУ(ФФ(J),TTГ,I+J-1)
    7 IF(I+60-MM)11,11,12
   11 IF(I+120-MM)15,15,16
   15 I=I+60;GO TO 13
   16 I=I+60;KФ=MM-I+1
      GO TO 13
```

```
12    IПE=IПE+1;GO TO 39
61    DO 53 J=1,KΦ
53    CALL ЗПЗУ(ΦΦ(J),TMГ,I+J-1)
      GO TO 7
611   DO 533 J=1,KΦ
533   CALL ЗПЗУ(ΦΦ(J),ЛT,I+J-1)
      GO TO 7
62    DO 54J=1,KΦ
54    CALL ЗПЗУ(ΦΦ(J),ЛЗ,I+J-1)
      GO TO 7
63    I=1
47    READ 770,(NR(J),J=1,72)
      PRINT 772,(NR(L1),L1=1,72)
      DO 44 J=1,72
44    CALL ЗПЗУ(NR(J),NP,I+J-1)
      IF(I+72-NN) 45,45,46
45    I=I+72;GO TO 47
46    I=1
51    READ 771,(NR(J),J=1,8)
      DO 48 J=1,8
48    CALL ЗПЗУ(NR(J),NM,I+J-1)
      IF(I+8-MM) 49,49,50
49    I=I+8;GO TO 51
50    PRINT 10006,NB
      RETURN
      END
```

```
      SUBROUTINE МОДИФ1(SM,NN,VQ,KW,PP,NP,ЧТЗУ,ЗПЗУ)
      DIMENSION PP(1)
      DO 1 I=1,NN
      IF(ЧТЗУ(NP,I))1,1,2
2     L=(I-1)*KW+1
      CALL ЗПЗУ(ЧТЗУ(SM,L)*10**10,SM,L)
      CALL ЗПЗУ(ЧТЗУ(SM,L)*PP(I),VQ,I)
1     CONTINUE
      RETURN;  END
```

```
      SUBROUTINE MATRIX(XX,УУ,VQ,VH,SM,TN,KW,NN,NM,MM,TT,TTГ,TMГ
      TФП,ЛТ,
     *ЛЗ,ЧТЗУ,ЗПЗУ)
      DIMENSION X,У,H,NR(3),A,AA,B(3,3),NP,PP,XX,УУ,VH(1)
10002 FORMAT(1X,'ПЛОЩАДЬ ЭЛЕМЕНТА',2X,I4,'РАВНА НУЛЮ'///)
      KV=KW*NN
10086 DO 11125 I=1,NN
11125 CALL ЗПЗУ(0.,VQ,I)
      DO 10027 I=1,KV
10027 CALL ЗПЗУ(0.,SM,I)
      DO 10148 I=1,MM
10085 NM1=ЧТЗУ(NM,I)
      NR(1)=NM1/1000000
      NR1=NM1-NR(1)*1000000
      NR(2)=NR1/1000
      NR(3)=NR1-NR(2)*1000
      DO 10028 J=1,3
      NPN=NR(J)
      H(J)=VH(NPN)
      X(J)=XX(NPN)
10028 У(J)=УУ(NPN)
      X21=X(2)-X(1);X13=X(1)-X(3);X32=X(3)-X(2);У12=У(1)-У(2)
      У23=У(2)-У(3);У31=У(3)-У(1)
      S=(X21*У31-X13*У12)*2
      IF(S)10029,10030,10129
10029 S=-S
      GO TO 10129
10030 PRINT 10002,I
      STOP
10129 HCP=(H(1)+H(2)+H(3))/3
      IF(HCP-TT)1978,1978,1977
1977  QT=ЧТЗУ(TTГ,I);ЛТ1=ЧТЗУ(ЛТ,I)
      ФK1=ЛТ1*2/3;D=QT*S/144/TN
      GO TO 1979
1978  QM=ЧТЗУ(TMГ,I);ЛЗ1=ЧТЗУ(ЛЗ,I)
      ФK1=ЛЗ1*2/3;D=(QM+TФП/(1+(TT-HCP))**2)*S/144/TN
1979  CONTINUE
```

```
      A(1,2)=ФК1*(У23*У31+X32*X13)/S
      A(1,3)=ФК1*(У23*У12+X32*X21)/S
      A(1,1)=-A(1,2)-A(1,3)
      A(2,3)=ФК1*(У31*У12+X13*X21)/S
      A(2,1)=A(1,2)
      A(2,2)=-(A(2,1)+A(2,3))
      A(3,1)=A(1,3)
      A(3,2)=A(2,3)
      A(3,3)=-(A(3,1)+A(3,2))
      AA(1,1)=A(1,1)+14*D
      AA(2,2)=A(2,2)+14*D
      AA(3,3)=A(3,3)+14*D
      AA(1,2)=AA(2,1)=A(1,2)+5*D
      AA(1,3)=AA(3,1)=A(1,3)+5*D
      AA(2,3)=AA(3,2)=A(2,3)+5*D
      B(1,1)=14*D-A(1,1)/2
      B(2,2)=14*D-A(2,2)/2
      B(3,3)=14*D-A(3,3)/2
      B(1,2)=B(2,1)=5*D-A(1,2)/2
      B(1,3)=B(3,1)=5*D-A(1,3)/2
      B(2,3)=B(3,2)=5*D-A(2,3)/2
      DO 10042 J=1,3
      NPN=NR(J)
      DO 10042 K=1,3
      MPM=NR(K)
10042 CALL ЗПЗУ(ЧТЗУ(VQ,NPN)+B(J,K)*VH(MPM),VQ,NPN)
10043 DO 10148 J=1,3
      N1=NR(J)
      DO 10148 K=J,3
      N2=NR(K)
      IF(N1-N2)10044,10044,10045
10044 L=(N1-1)*KW+N2-N1+1
      GOTO 10046
10045 L=(N2-1)*KW+N1-N2+1
10046 S1=ЧТЗУ(SM,L)
10148 CALL ЗПЗУ(S1+AA(J,K),SM,L)
      RETURN;  END
```

```
      SUBROUTINE ГАУСС(VQ,SM,KW,NN,VH,ЧТЗУ,ЗПЗУ)
      DIMENSION VH(1)
      DIMENSION DM(496),DMM,VVQ(32)
      L=M=L2=L3=0
      DO 32 I=1,KW
      VVQ(1)=ЧТЗУ(VQ,I)
      L2=(KW-I+1)*L3+L2
      DO 33 J=I,KW
      JJ=J+(KW-1)*(I-1)
33    DM(L2+J)=ЧТЗУ(SM,JJ)
32    L3=1
100   VVQ(1)=VVQ(1)/DM(1)
      CALL ЗПЗУ(VVQ(1),VQ,1+L)
      DO 40 J=1,KW-M
      DMM(J)=DM(J)/DM(1)
      JJ=J+KW*L
40    CALL ЗПЗУ(DMM(J),SM,JJ)
      L2=0
      DO 41 I=2,KW-M
      VVQ(I)=VVQ(I)-VVQ(1)*DM(I)
      L2=L2+KW-I+1
      DO 41 J=I,KW-M
41    DM(L2+J)=DM(L2+J)-DM(I)*DMM(J)
      L2=L3=0
      DO 50 I=1,KW-1-M
      VVQ(I)=VVQ(I+1)
      L2=(KW-I+1)*L3+L2
      DO 56 J=I,KW-1-M
56    DM(L2+J)=DM(L2+KW+J-I+1)
50    L3=1
      IF(NN-KW-L)101,101,60
101   M=M+1;L=L+1
      IF(KW-M-2)200,100,100
60    L=L+1
      VVQ(KW)=ЧТЗУ(VQ,KW+L)
      L2=0
      DO 51 I=1,KW
```

```
       L1=KW-I+1
       L2=L2+L1;JJ=L*KW+(KW-1)*I+1
51     DM(L2)=ЧТЗУ(SM,JJ)
       GOTO 100
200    LR=1
       YH(NN)=YYQ(1)/DM(1)
       DO 202 I=1,NN-1
       Y1H=ЧТЗУ(YQ,NN-I)
       DO 203 J=1,LR
       JJ=KW*(NN-I-1)+1+J
203    Y1H=Y1H-ЧТЗУ(SM,JJ)*YH(J-I+NN)
       YH(NN-I)=Y1H
       IF(KW-LR-1)202,202,204
204    LR=LR+1
202    CONTINUE
       RETURN
       END
```

```
       SUBROUTINE POLOSA(NM,MM,NN,KW,ЧТЗУ)
       DIMENSION NR(3)
       KW=0
       DO 10124 I=1,MM
       MAX=0;MIN=1000;NM1=ЧТЗУ(NM,I);NR(1)=NM1/1000000
       NR1=NM1-NR(1)*1000000
       NR(2)=NR1/1000;NR(3)=NR1-NR(2)*1000
       DO 10021 J=1,3
       NA=NR(J)
       IF(NA-MIN)10019,10020,10020
10019  MIN=NA
10020  IF(NA-MAX)10022,10022,10021
10021  MAX=NA
10022  IF(MAX-MIN-KW)10024,10023,10023
10023  KW=MAX-MIN+1
10124  CONTINUE
       RETURN
       END
```

```
      SUBROUTINE ПЕЧ001(КК,Т,VН,NN,УПЕРФ)
      DIMENSION VН(1)
11008 FORMAT(1X,'РАСЧЕТ НА ВРЕМЯ Т=',F10.2,' ЧАСОВ'///)
10008 FORMAT(40X,'НАЧАЛЬНОЕ ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ')
10003 FORMAT(1X,5(I5,4X,F13.2,1X))
10000 FORMAT(1H1,118(1H=)///1X,5(23H:  УЗЕЛ  : ТЕМПЕРАТУРА ),
      3X,1H:///1I
     *9(1H=))
      IF(КК)10079,10078,10079
10078 PRINT 10008;GOTO10108
10079 PRINT 11008,Т
10108 PRINT 10000
      I=1
10081 H1=VН(I);H2=VН(I+1);H3=VН(I+2);H4=VН(I+3);H5=VН(I+4)
      I1=I+1;I2=I+2;I3=I+3;I4=I+4
      PRINT 10003,I,H1,I1,H2,I2,H3,I3,H4,I4,H5
      I=I+5;IF(I-NN)10081,10081,10082
10082 CONTINUE
      CALL УПЕРФ(КЭУ)
      IF(КЭУ)1,2,1
1     CALL ПЕРФ(VН(1),VН(NN))
2     RETURN
      END
```

Литература

1. Методические указания по применению метода конечных элементов для решения плановых задач фильтрации подземных вод на ЭЦВМ. Белгород, ВИОГЕМ, 1979, 50 с.

2. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. "Мир", М., 1979, 392 с.

3. Тиханов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М., "Наука", 1972, 736 с.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО РАСЧЕТУ НА ЭЦВМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ
ПРИ ЗАМОРАЖИВАНИИ ГОРНЫХ ПОРОД

Научный редактор канд.техн.наук С.Г.Аксенов

Литературный редактор Л.А.Порубай
Технический редактор А.Г.Воронцова
Корректор И.А.Соляр

Подписано к печати 27 июня 1980 г.
Объем 1,1 уч.-изд.л. Тираж 150 экз. Заказ № 589.
Ротапринт ВИОГЕМ, г.Белгород, ул.Б.Хмельницкого, 86.
Цена 16 коп.