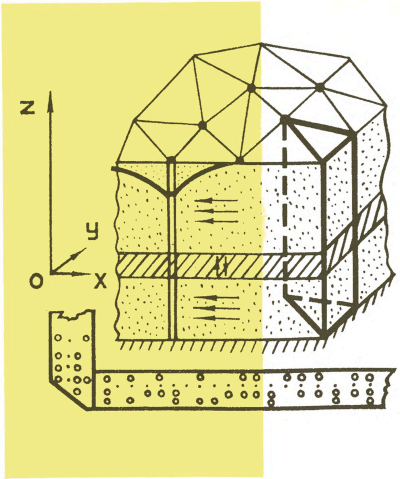

Методические указания по применению метода конечных элементов для решения планово-пространственных задач фильтрации в трехслойной среде на ЭЦВМ

gost.e-ecolog.ru

Белгород 1982

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

В И О Г Е М

УТВЕРЖДАЮ:
Директор института
И.Ф.Оксанич
27 сентября 1982 г.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПЛАНОВО-ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЗАДАЧ ФИЛЬТРАЦИИ В ТРЕХСЛОЙНОЙ СРЕДЕ НА ЭЦВМ

Белгород 1982

УДК (622.001.57:51)+681.3.06

Настоящие методические указания предназначены для численного моделирования на ЭВМ методом конечных элементов (МКЭ) нестационарных планово-пространственных задач фильтрации в трехслойной среде. Программы составлены на алгоритмическом языке ПЛ/I и предназначены для выполнения под управлением операционной системы ОС ЕС на ЭВМ с оперативной памятью не менее 512К. Приведены указания по подготовке исходной информации и работе с программами на ЭВМ ЕС-1022. Указания рассчитаны для использования работниками НИИ, производственных и проектных организаций. Программы составлены В.В.Васильевым. В отладке и апробации программ принимали участие Т.Е.Беняш, Ю.И.Волков, В.М.Орел.

Работа составлена В.В.Васильевым и утверждена НТС 22 июля 1982 г. в качестве методических указаний.

© Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по осушению месторождений полезных ископаемых, специальным горным работам, рудничной геологии и маркшейдерскому делу (ВНИГЕМ), 1982.

ВВЕДЕНИЕ

Повсеместно отмечаемая в настоящее время тенденция усложнения условий эксплуатации месторождений полезных ископаемых приводит к необходимости рассмотрения задач фильтрации в условиях, когда водоносные горизонты разделены слабопроницаемыми прослойками. Аналитического решения таких задач фильтрации для общего случая не существует, а имеющиеся частные решения плохо отражают реально происходящий процесс и поэтому не всегда могут быть применены к решению задач осушения. В связи с этим возникает необходимость решения таких задач на ЭВМ.

Наибольшее распространение в настоящее время получили два численных метода решения краевых задач механики сплошных сред: метод конечных разностей (МКР) и метод конечных элементов (МКЭ). По оценке ряда авторов [5,7,8] МКЭ в случаях, когда процесс описывается сложными системами дифференциальных уравнений, является гораздо эффективнее МКР. Особенно преимущество МКЭ сказывается, когда надо учитывать сложную конфигурацию области решения, что характерно для реальных задач осушения месторождений полезных ископаемых.

Разработанное программное обеспечение позволяет моделировать на ЭЦВМ задачи фильтрации в трехслойном пласте. Практика его использования в институте ВИОГЕМ показала хорошую согласованность получаемых результатов с данными натурных наблюдений.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается задача о движении подземных вод в слоистых водоносных горизонтах с чередующимися хорошо и слабопроницаемыми слоями. При этом считается, что выполняется гипотеза Н.К.Гиринского и А.Н.Мятиева, согласно которой в слабопроницаемых слоях горизонтальные составляющие скорости фильтрации принимаются настолько малыми, что ими можно пренебречь и считать, что фильтрация в них происходит по вертикали. Кроме того, согласно этой же гипотезе движение в хорошо проницаемых слоях принимается горизонтальным. Исходя из этих предположений фильтрационный поток такого вида можно определить как планово-пространственный.

В дальнейшем рассматривается схема движения в двух водоносных горизонтах, разделенных слабопроницаемой прослойкой, представленная на рис.I.

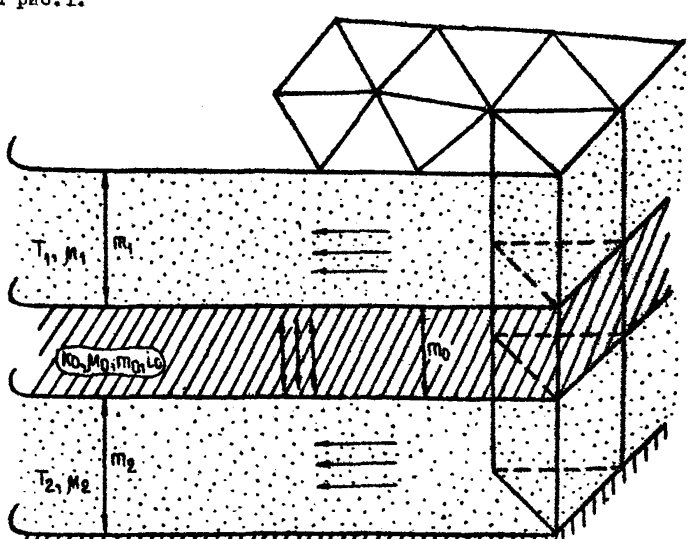

Рис.I. Схема планово-пространственной фильтрации в трехслойной среде

Неустационарный фильтрационный поток в трехслойной среде с учетом начального градиента в прослойке описывается системой дифференциальных уравнений вида

$$\begin{aligned}
\mu_1\frac{\partial h_1}{\partial t}&=\frac{\partial}{\partial x}\left(T_1\frac{\partial h_1}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(T_1\frac{\partial h_1}{\partial y}\right)-k_0\left(\frac{\partial h_0}{\partial z}-i_0\right)\Big|_{z=m_0}+W;\\
\mu_0\frac{\partial h_0}{\partial t}&=\frac{\partial}{\partial z}\left(k_0\left(\frac{\partial h_0}{\partial z}-i_0\right)\right);\\
\mu_2\frac{\partial h_2}{\partial t}&=\frac{\partial}{\partial x}\left(T_2\frac{\partial h_2}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(T_2\frac{\partial h_2}{\partial y}\right)-k_0\left(\frac{\partial h_0}{\partial z}-i_0\right)\Big|_{z=0},
\end{aligned}\qquad (I)$$

где $h\ (x,y,t)$ – напор (уровень) грунтовых вод; W – интенсивность площадного питания (инфильтрации); t – время; μ – коэффициент гравитационной водоотдачи для безнапорного движения или коэффициент упругой водоотдачи для напорного движения; $T=km$ для напорной фильтрации и $T=k(h-h_{под})$ – для безнапорной фильтрации; k – коэффициент фильтрации; m – мощность пласта; $h_{под}$ – отметка подошвы водоносного слоя; i_0 – начальный градиент в прослойке; 0,1,2 –индексы, определяющие слабопроницаемый слой, верхний и нижний слои соответственно.

В общем случае решение системы уравнений (I) должно удовлетворять условиям:

1) начальное условие $h_1(x,y,0)=H_1^0(x,y);\ \ h_2(x,y,0)=H_2^0(x,y)$,

где H_1^0 и H_2^0 – известные функции координат;

2) условие 1-го рода $h_1(x,y,t)\big|_{\Gamma_1}=H_1(x,y,t);\ \ h_2(x,y,t)\big|_{\Gamma_1}=H_2(x,y,t)$;

3) условие 2-го рода $q_1(x,y,t)\big|_{\Gamma_2}=-T_1\frac{\partial h_1}{\partial x}\ell_x-T_1\frac{\partial h_1}{\partial y}\ell_y$;

$$q_2(x,y,t)\big|_{\Gamma_2}=-T_2\frac{\partial h_2}{\partial y}\ell_x-T_2\frac{\partial h_2}{\partial y}\ell_y;$$

где q_1 и q_2 – расход потока на участке границы Γ_2 для верхнего и нижнего слоя соответственно; ℓ_x,ℓ_y – направляющие косинусы внешней нормали границы

Разбивая область фильтрации на конечные элементы – прямые треугольные призмы (см.рис.I) и рассматривая один такой элемент, получим следующую конечноэлементную интерпретацию системы (I) *):

*) Разработка алгоритма и программ по реализации метода конечных элементов для решения планово-пространственных задач движения подземных вод и теплопроводности. Отчет/ВИОГЕМ. Руководитель работы В.В.Васильев. Шифр работы I.5-2(79)-С-9-79-Р, Белгород, 1982, 130 с.

$$\left(\frac{T_1}{4S}[P]+\left(\frac{\mu_1^*}{\Delta t}+\delta_1\frac{K_1}{m_0}\right)\frac{S}{12}[C]\right)\{\psi\}-\delta_1\left(\frac{K_0}{m_0}-\frac{\mu_0^*}{\Delta t}\right)\frac{S}{12}[C]\{\psi\}=$$

$$=\frac{S[C]}{12\Delta t}\left(\delta_1\mu_0^*\{\psi\}_0+\mu_1^*\{\psi\}_0\right)-\delta\delta_1\frac{K_0S}{3}l_0[I]+\{Q_1\};$$

(2)

$$\left(\frac{T_2}{4S}[P]+\left(\frac{\mu_2^*}{\Delta t}+\delta_1\frac{K_0}{m_0}\right)\frac{S}{12}[C]\right)\{\psi\}-\delta_1\left(\frac{K_0}{m_0}-\frac{\mu_0^*}{\Delta t}\right)\frac{S}{12}[C]\{\psi\}=$$

$$=\frac{S}{12\Delta t}[C]\left(\delta_1\mu_0^*\{\varphi\}_0+\mu_2^*\{\psi\}_0\right)+\delta\delta_1\frac{K_0S}{3}l_0[I]+\{Q_2\},$$

где $\mu_1^*=\mu_1+\frac{1}{3}\mu_0$; $\mu_2^*=\mu_2+\frac{1}{3}\mu_0$; $\mu_0^*=\frac{1}{6}\mu_0$;

$S=\frac{1}{2}\left[(x_i-x_j)(y_j-y_k)-(x_i-x_k)(y_i-y_j)\right]$ – площадь треугольника:

$$[C]=\begin{bmatrix}2&1&1\\2&2&1\\1&1&2\end{bmatrix};\quad [P]=\begin{bmatrix}b_ib_i+c_ic_i & b_ib_j+c_ic_j & b_ib_k+c_ic_k\\ b_jb_i+c_jc_i & b_jb_j+c_jc_j & b_jb_k+c_jc_k\\ b_kb_i+c_kc_i & b_kb_j+c_kc_j & b_kb_k+c_kc_k\end{bmatrix};\quad \{I\}=\begin{bmatrix}1\\1\\1\end{bmatrix}$$

$b_i=y_j-y_k$; $b_j=y_k-y_i$; $b_k=y_i-y_j$;

$c_i=x_k-x_j$; $c_j=x_i-x_k$; $c_k=x_j-x_i$,

$\{\varphi\}$ и $\{\psi\}$ – узловые напоры в момент времени t; $\{\varphi\}_0$ и $\{\psi\}_0$ – узловые напоры в момент времени $t-\Delta t$; Δt – шаг расчета по времени; $\{Q_1\}$ и $\{Q_2\}$ – узловые расходы; $\delta_1=\begin{cases}0, & \text{если перетока нет}\\ 1, & \text{если есть переток;}\end{cases}$

$\delta=\begin{cases}1, & \text{если переток снизу вверх,}\\ -1, & \text{если переток сверху вниз.}\end{cases}$

Объединяя (2) по всем элементам разбивки, получим систему, описывающую процесс фильтрации во всей области исследования.

В реальных условиях при фильтрации в трехслойной среде возможны следующие режимы движения:

1) в верхнем и нижнем водоносных горизонтах напорное;

2) в верхнем горизонте безнапорное, а в нижнем – напорное;

3) в верхнем горизонте напорно-безнапорное, а в нижнем – напорное;

4) в верхнем и нижнем горизонтах напорно-безнапорное.

Все эти режимы реализованы в разработанном комплексе программ для решения задач фильтрации в трехслойном пласте.

2. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Программное обеспечение решения задач планово-пространственной фильтрации в трехслойной среде предназначено для эксплуатации под управлением операционной системы ОС ЕС на ЭВМ, имеющих объем оперативной памяти не менее 512К. Все программы написаны на алгоритмическом языке ПЛ/I и объединены по своему функциональному назначению в три независимых модуля: модуль ввода, контроля и записи на магнитный диск исходных данных; модуль печати исходных данных и модуль счета планово-пространственной задачи фильтрации в трехслойной среде. Это сделано для того, чтобы повысить надежность работы всего программного комплекса и предотвратить проведение расчетов с заведомо неверными исходными данными. Пользователь получает возможность исправить ошибки в данных до того, как они будут использоваться в модуле счета, а поскольку основное машинное время расходуется именно при работе модуля счета, тем самым сокращается общее время решения задачи на ЭВМ и, следовательно, стоимость решения.

Таким образом, предусматривается следующий порядок решения на ЭВМ:

I) обработка исходной информации модулем ввода и запись ее на магнитный диск. На этом этапе происходит контроль правильности перфорации и частичный контроль достоверности вводимых данных. Обнаруженные ошибки распечатываются на алфавитно-цифровом печатающем устройстве (АЦПУ), что облегчает их поиск и исправление в массиве исходных данных;

2) распечатка введенных данных на АЦПУ модулем печати исходных данных. Это предусмотрено с целью предоставления пользователю возможности визуального контроля исходных данных и выявления ошибок, которые не были обнаружены на этапе ввода данных;

3) решение задачи планово-пространственной фильтрации в трехслойной среде, осуществляемое модулем счета.

Ниже приводится краткое описание программных модулей. Схема решения задачи планово-пространственной фильтрации в трехслойной среде приведена на рис.2.

I. Модуль ввода, контроля и записи на магнитный диск исходных данных состоит из головной программы FEMIDØ2 и двух вспомогательных подпрограмм INFX и INFL. Для работы этого модуля необхо-

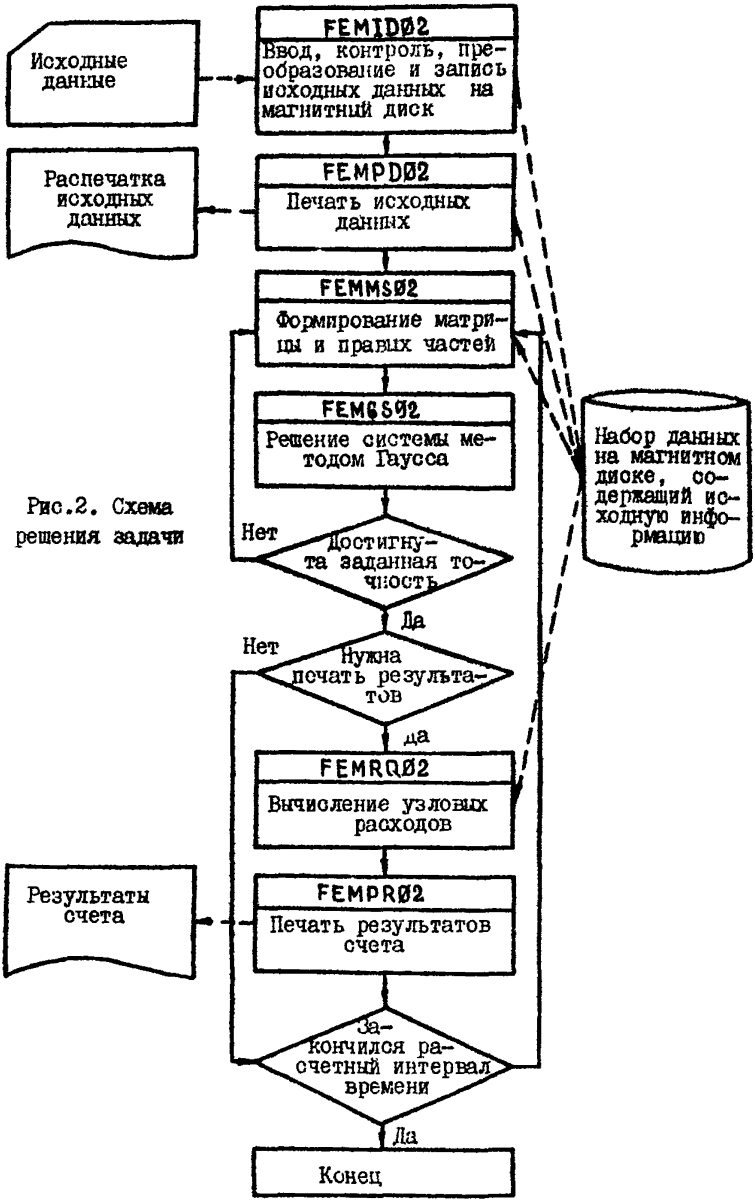

Рис.2. Схема решения задачи

димы следующие ресурсы: устройство ввода с перфокарт (УВК); устройство печати (АЦПУ), устройство прямого доступа (МД); устройство связи с Оператором (ПМ), 130К байтов оперативной памяти.

В результате работы модуля на устройстве прямого доступа (магнитном диске) создается набор данных с исходной информацией для решения задачи фильтрации в трехслойном пласте. Этот набор состоит из записей, содержащих геометрические (координаты узлов, мощность прослойки и т.д.) и фильтрационные (коэффициенты фильтрации и водоотдачи, проводимости слоев и т.д.) характеристики водоносных горизонтов и слабопроницаемого слоя, причем все записи упорядочены по возрастанию номера элемента разбивки области фильтрации. Такая организация хранения исходных данных облегчает процесс построения матрицы системы уравнений, относящейся к элементу разбивки, а следовательно, и процесс построения общей матрицы системы уравнений для всех элементов.

Работа модуля начинается с ввода исходной информации с перфокарт. Параллельно с вводом, как было указано выше, осуществляется частичный контроль вводимой информации. На этом этапе контролируется правильность перфорации цифровой информации (т.е.чтобы не было символов, отличных от "+", "-", ".",0÷9),а также ее полнота (например, чтобы количество введенных координат узлов в точности равнялось числу узлов точек разбивки и т.д.).

В случае обнаружения ошибки на АЦПУ печатается сообщение, неверные данные не принимаются в обработку, а работа модуля на этом заканчивается. При отсутствии ошибок ввода, для каждого треугольного элемента вычисляется его площадь и проверяется ширина ленты матрицы элемента (разница соседних номеров узлов элемента). Тем самым контролируется правильность нумерации узлов разбивки. Если встречается элемент, площадь которого получается равной нулю (это может быть вызвано, например, неверным заданием координат узлов треугольника) или максимальная разность между номерами вершин (включая и вершины треугольника нижнего слоя) окажется больше заданной ширины ленты матрицы системы, то на АЦПУ печатается сообщение об обнаруженной ошибке и работа модуля прекращается. Формирование набора данных на магнитном диске производится только при отсутствии ошибок в исходных данных.

Такая организация процесса ввода позволяет на начальном этапе решения задачи на ЭВМ обнаружить и устранить ошибки в исходных

данных. Следует однако отметить, что она не гарантирует абсолютную достоверность и не освобождает пользователя от необходимости визуального контроля введенных данных. Например, ошибки, когда вместо одной цифры отперфорирована другая, обнаружены быть не могут. Поэтому даже если работа модуля ввода прошла успешно и ошибки обнаружены не были, необходимо прежде, чем переходить к непосредственному решению задачи, распечатать всю введенную исходную информацию и тщательно проверить ее.

2. Модуль печати исходной информации состоит из программы FEMIDØ2 . Для его работы необходимы следующие ресурсы: устройство печати (АЦПУ), устройство прямого доступа (МД), устройство связи с Оператором (ПМ), 10СК байтов оперативной памяти.

Алгоритм работы модуля следующий: исходные данные последовательно считываются из набора на магнитном диске, преобразуются и выводятся на печать в виде таблицы.

На АЦПУ распечатывается следующая информация: шифр решаемой задачи, полное время расчета, шаг расчета по времени, шаг печати результатов, ширина ленты матрицы системы, количество узлов разбивки, количество элементов разбивки, требуемая точность счета.

Кроме того, для каждого элемента разбивки печатается: номер элемента, его площадь, мощность, коэффициент фильтрации, коэффициент влагоемкости и начальный градиент фильтрации слабопроницаемого слоя, коэффициенты фильтрации верхнего и нижнего слоев, коэффициенты упругой водоотдачи верхнего и нижнего слоев, отметки кровли и подошвы верхнего и нижнего слоев, номера узлов, координаты узлов (X и У), начальные условия в узлах, тип граничного условия в узлах, граничные условия в узлах.

3. Модуль решения задачи плансво-пространственной фильтрации в трехслойной среде состоит из головной программы FEMGSØ2 и подпрограмм FEMMSØ2 ,FEMGAØ2 ,FEMRQØ2, FEMPRØ2. Весь процесс решения распределен между программами модуля следующим образом:FEMGSØ2 – общее управление решением; FEMMSØ2 – формирование матрицы системы, учет граничных условий и приведение матрицы к верхнему треугольному виду;FEMGAØ2 – решение системы методом Гаусса; FEMRQØ2 – вычисление расходов; FEMPRØ2 – печать результатов счета.

Для работы модуля необходимы следующие ресурсы: устройство печати (АЦПУ), устройство прямого доступа (МД), устройство связи с Оператором (ПМ), 286К байтов оперативной памяти.

Алгоритм работы модуля следующий:

I) устанавливаются в начальное положение счетчики шага расчета и шага печати результатов;

2) формируется вектор начальных значений напоров и нулевой вектор промежуточных значений напоров;

3) формируется матрица системы;

4) учитываются граничные условия, и матрица приводится к верхнему треугольному виду;

5) производится решение системы методом Гаусса;

6) полученные значения напоров сравниваются со значениями вектора промежуточных значений напоров и если отклонение больше заданного, то вектору промежуточных значений напоров присваивается величина, равная среднему арифметическому между старым и полученным решением системы, и все повторяется с пункта 3;

7) производится анализ – нужна ли печать результатов и если да, то вычисляются значения узлов расходов и печатаются результаты счета;

8) вектору начальных значений напоров присваиваются вычисленные значения напоров, формируется нулевой вектор промежуточных значений напоров;

9) производится анализ на конец расчетного интервала времени и, если он не кончился, то повторяется с пункта 3;

IO) конец счета.

Результаты решения выдаются на печать в виде таблицы, содержащей: шифр решаемой задачи; расчетное время, для которого печатаются результаты; заданное значение точности счета; номер узла и значения напора и расхода в нем.

Все программные модули должны быть оттранслированы, отредактированы и записаны в системную библиотеку загрузочных модулей SYS1.LINKLIB или в личную библиотеку пользователя на магнитном диске. Задание на вызов модулей и выполнение составляется на языке управления заданиями (ЯУЗ) операционной системы ОС ЕС в соответствии с требованиями, предъявляемыми ЯУЗ.

3. ПОДГОТОВКА ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

При решении задач планово-пространственной фильтрации в трехслойной среде на ЭВМ очень важное значение имеет этап подготовки исходной информации. От того, насколько качественно выполнен этот этап, в огромной мере зависит правильность полученных ре-

зультатов. Поэтому готовить исходную информацию необходимо с предельной внимательностью и добросовестью. Не следует спешить, так как одна допущенная ошибка в данных может свести на нет все результаты счета. Опыт работы с программами, реализующими решение задач фильтрации методом конечных элементов на ЭВМ, показал, что большая часть неверных результатов счета получается из-за некачественной подготовки исходных данных.

Весь процесс подготовки задачи к решению на ЭВМ можно подразделить на следующие этапы: гидрогеологическая постановка задачи; конечноэлементная схематизация; запись исходных данных в виде, предназначенном для перфорации; составление пакета перфокарт с данными для счета. Каждый из этих этапов следует выполнить со всей возможной тщательностью, так как от этого зависит успех всей работы в целом. Ниже будет рассмотрен каждый из этапов подготовки данных в отдельности.

3.I. Гидрогеологическая постановка задачи

В большинстве случаев моделированием задач фильтрации на ЭВМ занимается инженер-гидрогеолог, решающий конкретную практическую задачу. Обычно в его распоряжении имеются данные о гидрогеологическом состоянии, полученные в результате натурных наблюдений за интересующей областью фильтрации. К ним относятся сведения о действующих и проектируемых водозаборах, хвостохранилищах и отстойниках, данные в геологической структуре рассматриваемой области, гидрогеологических параметрах и т.д. Задачей инженера-гидрогеолога на этом этапе является систематизация всей имеющейся информации с целью схематизации области фильтрации.

Прежде всего изучаются исходные материалы по каждому водоносному горизонту и слабопроницаемому пласту с тем, чтобы установить для них средние величины мощности пласта, коэффициентов фильтрации, пьезопроводности, водоотдачи и др. При значительной изменчивости этих показателей возможно в пределах площади распространения каждого пласта выделить зоны с установленными для них средними величинами параметров.

Важным этапом схематизации является установление нижней границы области фильтрации, т.е. водоупорного ложа. Как правило, условным водоупорным ложем на модели может быть принят пласт с

коэффициентом фильтрации меньшим, чем у залегающего на нем водоносного горизонта, в 1000 и более раз [4].

Таким образом, природная схема области фильтрации может быть однородной, кусочно-однородной или слоистой, без разделных слоев или с ними.

Установление всех границ (внешних и внутренних) фильтрационной модели и граничных условий на них - заключительный этап схематизации. Расчетная фильтрационная модель должна быть по возможности более простой по сравнению с природной схемой области фильтрации, но она должна функционально соответствовать натурным условиям в сочетании с искусственными сооружениями. Необходимо определить также промежуток времени, для которого будет производиться расчет и выбрать шаг расчета задачи по времени и интервалы, для которых следует выдать результаты на печать.

Для рассматриваемой в данных методических указаниях задачи планово-пространственной фильтрации в трехслойной среде на этапе гидрогеологической постановки необходимо подготовить сведения о следующих геометрических и фильтрационных параметрах исследуемой области:

а) для водоносных горизонтов: отметки кровли и подошвы; коэффициенты фильтрации, упругой и гравитационной водоотдачи; начальные и граничные условия; сведения о режиме уровней подземных вод;

б) для разделяющего слоя: коэффициенты фильтрации и упругой водоотдачи; начальный градиент фильтрации.

Следует отметить, что качество и полнота гидрогеологической постановки задачи решающим образом влияют на конечные результаты, поэтому проводить работу на этом этапе необходимо с максимальной тщательностью и вниманием.

3.2. Конечноэлементная схематизация области исследований

Следующим очень важным этапом подготовки данных является этап конечноэлементной схематизации области исследований. Начинается он с разбивки области на конечные элементы (прямые треугольные призмы). Рекомендуется производить ее на гидрогеологической карте исследуемой области.

При разбивке области на конечные элементы следует руководствоваться следующими общими правилами: число узловых точек разби-

вки по верхнему слою не должно быть более 500, число треугольных элементов не должно быть более 800, построены треугольные элементы не должны иметь тупых углов, так как это приводит к большим погрешностям счета; на участках области, представляющих наиболь - ший интерес, необходимо разбивку области сделать более мелкой, в то время как на участках, не представляющих особого интереса, элементы разбивки можно выбрать достаточно крупными; желательно, чтобы имеющиеся скважины попадали в узловые точки разбивки. В резу - льтате разбивки на карту исследуемой области, будет нанесена сетка конечных элементов. Все полученные треугольные элементы разбивки необходимо пронумеровать в произвольном порядке по возрастанию, начиная с I, без пропусков.

Следующим шагом конечноэлементной схематизации является при - своение номеров узловым точкам (вершинам треугольников) разбивки. Для рассматриваемой задачи фильтрации в трехслойной среде при нумерации узловых точек необходимо руководствоваться следующим: номера присваиваются узлам верхнего слоя, причем нечетными цифрами, начиная с I, без пропусков (номера узлам нижнего слоя присваиваются автоматически, например, узлу I-го верхнего слоя будет соответствовать узел 2-го нижнего слоя и т.д.); при нумерации узлов необходимо стремиться к тому, чтобы максимальная разность между номерами соседних узлов была как можно меньше (так как от нее зависит объем требуемой оперативной памяти и время счета на ЭВМ); предельно допустимое значение этой разности определяется по фор - муле

$$MP = \frac{50000}{N+1} - 2,$$

где N - максимальный номер узла верхнего слоя; номера узловых точек нанести на карту исследуемой области.

Последним шагом конечноэлементной схематизации является зада - ние значений фильтрационных и геометрических параметров исследуемой области, а также узловых значений начальных и граничных условий. При этом необходимо учитывать следующую предпосылку, вытекающую из метода конечных элементов: все фильтрационные и геометри - ческие характеристики области исследования считаются постоянными внутри элемента разбивки, но могут быть разными для верхнего и нижнего слоев.

В результате конечноэлементной схематизации должно быть получено следующее: таблица номеров треугольных элементов и соответствующих им номеров вершин треугольников (только верхнего слоя); таблицы X и Y координат узлов разбивки, таблица признаков грани-

чных условий и значений граничных условий (отдельно для верхнего и нижнего слоя); таблица начальных условий (отдельно для верхнего и нижнего слоя); составленные в порядке возрастания номеров узлов; таблицы коэффициентов фильтрации, коэффициентов упругой и гравитационной водоотдачи, составленные отдельно для верхнего, нижнего и разделяющего слоев, и таблицы отметок кровли и подошвы для верхнего и нижнего слоев, а также таблица начальных градиентов фильтрации слабопроницаемого слоя, составленные по возрастанию номеров элементов разбивки.

3.3. Подготовка исходных данных к перфорации

В результате гидрогеологической постановки задачи и конечноэлементной схематизации получаются таблицы исходных данных, которые надо теперь записать в виде, пригодном для перфорации. При этом следует руководствоваться следующими рекомендациями: для записи исходных данных использовать специальные бланки или бумагу в клеточку; данные писать четко, без помарок, по одному символу в клеточке; числа записывать в десятичной системе счисления; целая часть отделяется от дробной точкой; знак числа ставится перед первой цифрой ("+" можно опускать); данные отделяются друг от друга запятой (например, I,2.5,-3.65,0.24,...); общее количество символов, записываемых в одной строке (включая знаки чисел, точки, отделяющие целые части от дробных, и запятые, разделяющие данные) не должно быть больше 80; переносить данные на новую строку можно только после запятой, разделяющей данные; каждую новую таблицу начинать записывать с новой строки; в конце каждой таблицы данных необходимо (обязательно!) ставить символ "точка с запятой".

При задании исходной информации часто встречаются случаи, когда несколько подряд следующих данных имеют одно и то же значение. При этом допускается следующая запись: в круглых скобках записывается целое число, соответствующее количеству подряд идущих одинаковых данных, а затем значение повторяющегося данного (например, запись (3)-2.5 эквивалента записи - 2.5,-2.5,-2.5).

Бланки с данными, записанными в соответствии с перечисленными выше правилами, отдаются на перфорацию, после которой рекомендуется распечатать их на АЦПУ и проверить визуально правильность перфорации.

После того, как все ошибки перфорации выявлены и исправлены, со-

ставляется пакет данных для ввода их в ЭВМ. Данные в пакете должны располагаться в строго определенной последовательности, показанной на рис.3. Нарушение этой последовательности приводит к ошибкам счета, поэтому надо быть внимательным при формировании пакета. Составлением пакета исходных данных заканчивается процесс подготовки информации для решения задачи на ЭВМ.

4. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НА ЭВМ

Весь процесс решения задачи на ЭВМ можно разбить на следующие три последовательных этапа: подготовку пакета задания для счета, выполнение счета на ЭВМ и анализ полученных результатов. Остановимся на каждом из этих этапов в отдельности.

4.I. Подготовка пакета задания

Программное обеспечение решения задач планово-пространственной фильтрации в трехслойной среде разработано для функционирования под управлением операционной системы ОС ЕС. Поэтому задание на работу должно быть написано на ЯУЗ в соответствии с правилами, принятыми в нем. Подробно с ЯУЗ можно ознакомиться-в работах [3,9] , здесь же остановимся на конкретных примерах составления задания для решения задачи фильтрации в трехслойной среде. В разд. 2 отмечалось, что все программное обеспечение разбито на три независимых модуля, различных по своему функциональному назначению. Для каждого из этих модулей должно быть составлено свое задание на выполнение, при желании может быть составлено общее задание для последовательного выполнения всех модулей.

Задания для выполнения каждого из модулей программного обеспечения имеют одинаковую структуру и состоят из определенной последовательности перфокарт, содержащих операторы ЯУЗ. В общем случае структура оператора ЯУЗ следующая:

// [имя] оператор [операнды] ,

где // - признак начала оператора ЯУЗ; имя - имя оператора; оператор - один из операторов ЯУЗ; операнды - последовательность операндов, необходимых для выполнения оператора ЯУЗ; квадратные скобки означают, что данная структурная единица оператора ЯУЗ может отсутствовать.

Ниже рассмотрены только те операторы ЯУЗ и соответствующие им операнды, которые необходимы для составления задания на выполне -

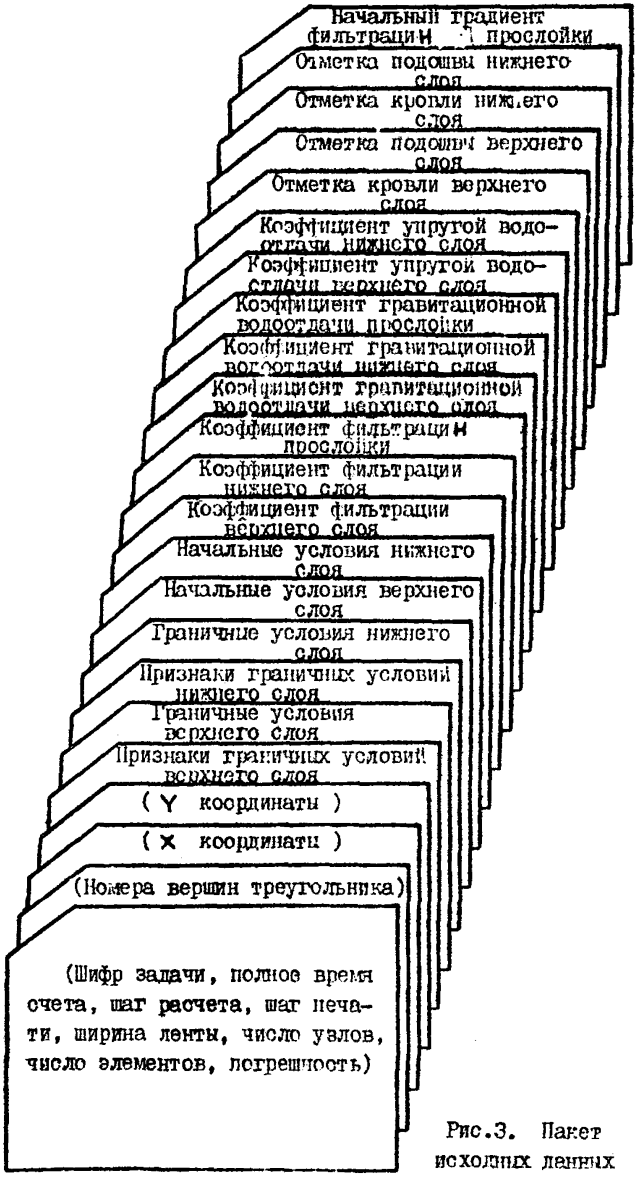

Рис.3. Пакет исходных данных

ние программных модулей задачи фильтрации в трехслойной среде.

I. Оператор JOB должен быть первым в каждом задании. Он указывает на начало задания и содержит информацию об объеме необходимой оперативной памяти и о том каку", служебную информацию надо выдать на печать.

2. Оператор EXEC содержит информацию о том, какая программа должна быть выполнена, какой объем оперативной памяти необходим для ее выполнения, а также значения параметров, передаваемых программе.

3. Оператор DD описывает наборы данных, необходимые для выполнения задания, и содержит данные об устройстве, на котором находится или на которое будет выводиться набор данных и его характеристики.

4.I.I. Задание для выполнения модуля ввода, контроля и записи исходных данных на магнитный диск

Ввод, контроль и запись исходных данных на магнитный диск осуществляется модулем FEMIDØ2 , требующим для своей работы I30 К байтов оперативной памяти и использующим следующие наборы данных: входной набор данных на перфокартах, содержащий исходные данные; выходной набор данных на магнитном диске, содержащий результаты работы модуля; выходной набор на АЦПУ, содержащий информацию об обнаруженных ошибках. Задание для выполнения модуля ввода будет следующим:

```
// VVOD  JOB MSGLEVEL=(1,1),REGION=190K
// ST1 EXEC PGM=FEMIDØ2
// SYSPRINT DD SYSOUT=A
// DSET DD DSN=имя-набора, UNIT=SYSDA, VOL=SER=имя-тома,
// DCB=(RECFM=VB,LRECL=2ØØ, BLKSIZE=36ØØ),SPACE=(36ØØ, 1ØØ,5Ø),
// DISP=(NEW,KEEP)
// SYSIN DD*
ПАКЕТ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ
/*
//
```

Первый оператор означает, что выполняется задание с именем VVOD и для его выполнения отводится I90К байтов оперативной памяти (опе-

ранд REGION). Операнд MSGLEVEL = (I,I) означает, что в процессе выполнения задания на печать выводятся все входные операторы ЯУЗ и все сообщения о распределении устройств ввода-вывода.

Второй оператор с именем ST1 указывает, что будет выполняться программа FEMLDØ2.

Третий оператор с именем SYSPRINT описывает системный выходной набор на АЦПУ.

Четвертый оператор с именем DSET описывает набор данных на магнитном диске и состоит из двух перфокарт. Значения операндов в нем следующие: DSN = имя-набора - определяется имя, которое присваивается набору данных (назначается пользователем и должно быть одинаковым для заданий на выполнение всех модулей решения задач и фильтрации в трехслойной среде); UNIT = SYSDA определяется в качестве устройства для хранения набора магнитные диски; VOL = SER = имя-тома определяет конкретное имя пакета магнитных дисков, на котором размещается набор (определяется пользователем и в большинстве случаев это имя системного рабочего тома); DCB =(RECFM = VB, LRECL = 2ØØ, BLKSIZE = 36ØØ) - характеризуется набор данных и означает, что он состоит из блокированных записей переменной длины (параметр RECFM = VB), максимальная длина записи 200 байт (параметр LRECL = 2ØØ) и что записи объединены в блоки длиной 3600 байт (параметр BLKSIZE = 36ØØ); операнд SPACE = (36ØØ,(IØØ,5Ø)) означает, что память на магнитном диске отводится блоками по 3600 байтов и первоначально резервируется место под I00 блоков, а в случае нехватки этого количества выделяется дополнительно по 50 блоков (но не более I5 раз); операнд DISP = (NEW ,REEP) характеризует состояние набора данных и означает, что он вновь создается (параметр NEW) и должен быть сохранен после окончания задания (параметр REEP).

Пятый оператор с именем SYSIN описывает входной набор данных на перфокартах и означает, что перфокарты с вводимыми исходными данными располагаются следом за этим оператором. Признаком конца исходных данных является перфокарта с отперфорированными в первых двух позициях символами /* .

Перфокарта с символами // в первых двух позициях является признаком конца задания.

4.I.2. Задание для выполнения модуля печати исходных данных

Распечатка на АЦПУ введенных исходных данных осуществляется мо-

дулем FEMPDØ2 , требующим для своей работы 100К байтов оперативной памяти и использующим следующие наборы данных: набор данных на магнитном диске, содержащий исходные данные; набор на АЦПУ для распечатки исходных данных; системный набор на АЦПУ.

Задание на выполнение этого модуля будет следующим:

```
// PRINT JOB MSGLEVEL=(1,1) REGION=1ØØK
//ST1 EXEC PGM=FEMPDØ2
// SYSPRINT DD SYSOUT=A
// PRNT DD SYSOUT=A
// DSET DD DSN=имя-набора,UNIT=SYSDA,VOL=SER=имя-тома,DISP=OLD
//
```

Операторы JOB ,EXEC и DD с именем SYSPRINT рассмотрены в разд. 4.I.I.

Оператор DD с именем PRNT описывает набор данных на АЦПУ для печати исходных данных задачи фильтрации в трехслойной среде.

Оператор DD с именем DSET описывает набор на магнитном диске, содержащий исходные данные, которые будут распечатываться. Операнды DSN ,UNIT и VOL разобраны в разд. 4.I.I. Операнд DISP=OLD означает, что этот набор данных к моменту выполнения задания уже создан и находится на магнитном диске.

4.I.3. Задание для выполнения модуля счета

Решение задачи планово-пространственной фильтрации в трехслойной среде осуществляется модулем FEMGSØ2 , требующим для своей работы максимально 286К байтов оперативной памяти и использующим следующие наборы данных: набор данных на магнитном диске, содержащий исходные данные; набор на АЦПУ для печати результатов счета; системный набор данных на АЦПУ. Количество требуемой оперативной памяти зависит от числа узлов разбивки области фильтрации, ширины ленты матрицы системы и задается для каждой конкретно решаемой задачи свое (например, для случая разбивки на 200 узлов по каждому из слоев и ширины ленты, равной 50, достаточно 180К байтов оперативной памяти).

Задание на выполнение этого модуля имеет следующий вид:

```
// SCHET JOB MSGLEVEL=(1,1), REGION=18ØK
// ST1 EXEC PGM=FEMGSØ2, PARM=Ø
// SYSPRINT DD SYSOUT=A
// PRNT DD SYSOUT=A
```

```
//DSET DD DSN=имя-набора,UNIT=SYSDA,VOL=SER=имя-тома,DISP=OLD
//
```

Все операторы задания подробно рассмотрены в разд. 4.I.I. и 4.I.2.

Количество требуемой оперативной памяти в I90K байтов написано условно. Как отмечалось выше, оно определяется для каждой конкретной задачи.

Операнд PARM в операторе EXEC предназначен для передачи управляющего параметра модулю FEMGSØ2 . Управляющий параметр предусмотрен с целью предоставления пользователю возможности изменить некоторые исходные данные непосредственно на этапе счета, без предварительной перфорации их. Программно предусмотрено изменение следующих исходных данных: общего времени расчета; шага расчета и шага печати результатов; допустимой погрешности счета.

Для того, чтобы Оператор ЭВМ мог изменить значения этих данных с пультовой пишущей машинки, необходимо задать PARM =I, если значения менять не надо – PARM = Ø.

4.2. Выполнение счета на ЭВМ

Выполнение расчетов по программам, разработанным для решения на ЭВМ задач планово-пространственной фильтрации в трехслойной среде, предусматривает стандартные действия Оператора по выполнению заданий под управлением операционной системы ОС ЕС в режиме MVT Нестандартными являются только действия, связанные с ответом на сообщения, выдаваемые на пультовую пишущую машинку модулями FEMIDØ2, FEMPDØ2 и FEMGSØ2.

В табл.I приведены сообщения модулей и ответы Оператора на них.

5. ПРИМЕР ПОДГОТОВКИ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассмотрим подготовку исходной информации на примере конкретной задачи (рис.4). Отметим, что рассматриваемая ниже задача служит только для иллюстрации процесса подготовки данных и не описывает никакого реального объекта.

I. Гидрогеологическая постановка. Пусть исследуемая область фильтрации ограничена с юга, востока и севера изолинией I, на которой поддерживается постоянный напор, равный 50 м в верхнем водоносном горизонте и 60 м – в нижнем. На западе граница проходит

Таблица I

Сообщение	Причина выдачи	Ответ Оператора
t полн , T расч , T печ	Требуется изменить полное время счета, шаг расчета и шаг печати	а) оставить без изменения:'Ц' б) изменить: 'ПППППРРРРЧЧЧЧ', где ПППП – полное время, РРРР – шаг расчета, ЧЧЧЧ – шаг печати
Погрешность	Требуется изменить величину погрешности счета	а) оставить без изменения:'Ц' б) изменить:'ПППППППП', где ПППППППП – новое значение ошибки счета
Расчетное время = ТР Число итераций = ИТ Погрешность: ПТ-ПП Что делать ?	Для расчетного времени ТР сделано итераций ИТ и при этом получена погрешность ПП. (ПТ-заданная погрешность счета)	а) продолжить итерации: 'CO' б) прекратить итерации: 'END'

по реке II с абсолютной отметкой уровня 50 м. Внутри области фильтрации находится карьер Ш и хвостохранилище IУ. На карьере эксплуатируется дренажная система, откачивающая из верхнего водоносного горизонта 6000 м^3/сут воды, а из нижнего – 8000 м^3/сут. На хвостохранилище задана абсолютная отметка уровня воды 50 м. Нулевая отметка принята на уровне подошвы нижнего водоносного горизонта. Фильтрационные и геометрические параметры водоносных горизонтов и разделяющего слабопроницаемого слоя приведены в табл.2.

Полное время счета принимается равным 400 сут, шаг расчета – 50 сут, результаты выдаются на печать через 100 сут. В начальный момент времени значения напоров в верхнем водоносном горизонте принимаются равными 50 м, а в нижнем – 80 м.

2. Конечноэлементная схематизация. Схема разбивки на конечные элементы приведена на рис.4. В узлах I,3,5,7,I9,2I,I5,I3,23 за-

Таблица 2

Параметр	Верхний слой	Нижний слой	Прослойка
Коэффициент фильтрации, м/сут	10	15	0,5
Коэффициент упругой водоотдачи	0,1	0,15	0,005
Коэффициент гравитационной водоотдачи	0,3	0,32	–
Начальный градиент	–	–	5
Отметка подошвы, м	35	0	–
Отметка кровли, м	55	30	–

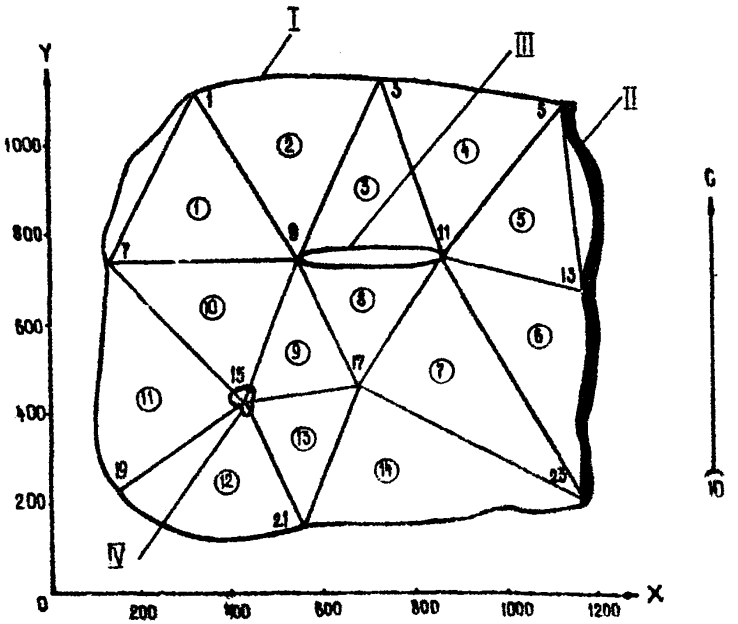

Рис.4. Учебная задача:

I – линия постоянного напора; II – река; III – карьер; IV – хвостохранилище; ① .. ⑭ – номера элементов; 1,3,5 – номера узлов разбивки

дается граничное условие первого рода, т.е. в них поддерживается постоянный напор; в узлах 9,11 задается граничное условие второго рода, т.е. в них поддерживается постоянный расход. По всем

узлам верхнего слоя задается начальный напор 60 м, а по соответствующим им узлам нижнего слоя - начальный напор 80 м (соответствие между узлами верхнего и нижнего слоя следующие: узлу I-го верхнего слоя соответствует узел 2-го нижнего слоя и т.д.).

3. Подготовка исходных данных к перфорации. Исходные данные записываются на стандартных бланках или на бумаге в клеточку в соответствии с правилами, приведенными в разд. 3.3. Рекомендуется записывать данные в той же последовательности, в которой они будут находиться в пакете (см.рис.3). Для рассматриваемой задачи информация, подготовленная для перфорации будет выглядеть следующим образом:

```
I) ПРОБА, 400,50,I00,I4,24,I4,0.0I;
2) I,7,9,I,9,3,3,9,II,3,II,5,5,II,I3,I3,II,23,II,I7,23;
3) 9,I7,II,9,I6,I7,9,7,I5,7,I9,I5,I5,I9,2I,I2,2I,I7,I7,2I,23;
4) 320,750,II50,I30,560,870,II80,460,680,I60,560,II70;
5) II20,II50,II00,740,750,750,680,430,460,220,I50,200;
6) (4)I,(2)0,(2)I,0,(3)I;
7) (4)50,(2)-6000,(2)50,0,(3)50;
8) (4)I,(2)0,(2)I,0(3)I;
9) (2)60,50,60(2)-8000,(2)50,0,(2)60,50;
I0) (I2)50;
II) (I2)80;
I2) (I4)I0;
I3) (I4)I5;
I4) (I4)0.5;
I5) (I4)0.3;
I6) (I4)0.32;
I7) (I4)0.005;
I8) (I4)0.I;
I9) (I4)0.I5;
20) (I4)55;
2I) (I4)35;
22) (I4)30;
23) (I4)0;
24) (I4)5;
```

После перфорации, распечатки на АЦПУ и визуального контроля пра-

вильности перфорации, составляется пакет исходных данных, который для рассматриваемой задачи будет состоять из 24 перфокарт.

Литература

1. Васильев В.В. Метод конечных элементов в задачах планово – пространственной фильтрации в слоистых грунтах. Тезисы доклада на региональной научно-технической конференции КМА. Белгород, ВИОГЕМ, 1982, с.67-68.

2. Васильев В.А., Карачевцев Н.Ф. Сравнение различных конечно-разностных аппроксимаций временной производной при решении нестационарных задач фильтрации методом конечных элементов. Тезисы докладов на областной научно-технической конференции. Белгород, ВИОГЕМ, 1979, с.16-18.

3. Данилочкин В.П. и др. Операционная система ОС ЕС. Справочное пособие. М., Статистика, 1980, 480 с.

4. Жернов И.Е., Шестаков В.М. Моделирование фильтрации подземных вод. М., Недра, 1971, 224 с.

5. Коннор Дж., Бреббиа К. Метод конечных элементов в механике жидкости. М., Судостроение, 1979, 263 с.

6. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. М., Наука, 1977, 644 с.

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

8. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. М., Мир, 1977, 349 с.

9. Эшли Р., Фернандес Д. Язык управления заданиями. М., Мир, 1981, 172 с.

С О Д Е Р Ж А Н И Е

Введение 3
1. Постановка задачи 4
2. Описание программного обеспечения 7
3. Подготовка исходной информации II
3.I. Гидрогеологическая постановка задачи I2
3.2. Конечноэлементная схематизация области исследований I3
3.3. Подготовка исходных данных к перфорации I5
4. Решение задачи на ЭВМ I6
4.I. Подготовка пакета задания I6
4.I.I. Задание для выполнения модуля ввода, контроля и записи исходных данных на магнитный диск I8
4.I.2. Задание для выполнения модуля печати исходных данных I9
4.I.3. Задание для выполнения модуля счета 20
4.2. Выполнение счета на ЭВМ 2I
5. Пример подготовки исходной информации 2I
Литература 25

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПЛАНОВО-ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЗАДАЧ ФИЛЬТРАЦИИ
В ТРЕХСЛОЙНОЙ СРЕДЕ НА ЭЦВМ

Научный редактор канд.геол.-мин.наук И.П.Твердохлебов

Литературный редактор Л.А.Порубай
Технический редактор А.Г.Воронцова
Корректор В.А.Старкова. Художник Б.М.Попов

Подписано к печати 27 сентября 1982 г.
Объем 1,5 уч.-изд.л. Тираж 180 экз. Заказ № 822.
Ротапринт ВИОГЕМ, Белгород, Б.Хмельницкого, 86.

Цена 23 коп.

gost.e-ecolog.ru