

Методические рекомендации по расчету плоской (профильной) установившейся фильтрации

МИНИСТЕРСТВО ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ СССР
СОЮЗРУДА

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

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО РАСЧЕТУ ПЛОСКОЙ (ПРОФИЛЬНОЙ)
УСТАНОВИВШЕЙСЯ ФИЛЬТРАЦИИ

Белгород 1979

В настоящих рекомендациях приводится методика, позволяющая решать плоские профильные задачи фильтрации при одновременном наличии анизотропии и неоднородности фильтрационных свойств. Из программы с автоматической разбивкой области, используя индивидуальный подход, можно решать практически все инженерные задачи.

Рекомендации могут быть использованы специалистами, работающими в области исследования и проектирования гидротехнических сооружений.

Работа выполнена в лаборатории устойчивости хвостохранилищ гидротехнического отдела ВИОГЕМ канд.техн. наук С.Г.Аксеновым, инженерами В.И.Истоминим и О.Н.Полищук. В разработке методики принимали участие канд.техн. наук А.С.Смирнов, инженер А.Ф.Контримавичус. Утверждена секцией НТС института 22 февраля 1979 г. в качестве методических рекомендаций.

Все замечания просим направлять по адресу: 308007, Белгород, В.Хмельницкого, 86, институт ВИОГЕМ.

В В Е Д Е Н И Е

Современные обогатительные фабрики предприятий черной металлургии и других отраслей промышленности строят и эксплуатируют, так называемые, хвостохранилища, емкость которых иногда достигает 400 и более млн.м³, для складирования отходов обогащения и осветления воды с целью повторного ее использования в производственном цикле [1]. Ложа хвостохранилищ и ограждающие их сооружения практически всегда сложены водопроницаемыми грунтами. В связи с этим при проектировании хвостохранилищ должны, как правило, выполняться фильтрационные расчеты, в результате которых в общем случае определяют следующие параметры фильтрационного потока:

гидродинамические сетки фильтрации;

градиенты напоров и скорости фильтрации;

фильтрационные расходы (удельные и полные) для заданной области или ее части;

поверхность депрессии и участки высачивания для безнапорной фильтрации.

Хотя в большинстве случаев фильтрационный поток на участке хвостохранилищ имеет пространственный характер, на достаточном удалении от него — плановый и только на отдельных участках ограждающих сооружений — плоский, во многих случаях удается путем достаточно обоснованной схематизации свести задачи двух первых видов к плоской задаче фильтрации.

Следует отметить, что плоская задача фильтрации решается наиболее часто при проектировании гидротехнических сооружений в гидроэнергетическом и мелиоративном строительстве.

За полувековую историю развития теории фильтрации в СССР и за рубежом разработано много методов решения задач плоской установившейся фильтрации как теоретических (точных и приближенных), так и экспериментальных [1]. С помощью их решены достаточно сложные задачи, имеющие народнохозяйственное значение. В то же время необходимо отметить известную ограниченность ранее разработанных методов решения плоской задачи фильтрации, которая состоит в следующем.

Теоретические методы решения ввиду несовершенства математического аппарата разработаны для узкого круга задач, т.е. для частных случаев плоской задачи фильтрации, экспериментальные же методы, с

одной стороны, сопряжены с трудностями технического порядка, особенно для сложных областей фильтрации, а с другой - недостаточно точны. Та и другая группа методов расчета не позволяют решать задачи фильтрации с учетом анизотропии и неоднородности фильтрационных свойств и практически применимы лишь для решения частных случаев анизотропии или неоднородности.

В связи с изложенным авторами разработана методика приближенного расчета плоской установившейся фильтрации с использованием ЭВМ, по которой можно учитывать любую геометрию области, неоднородность и анизотропию фильтрационных свойств при заданных граничных условиях, в том числе с неизвестными границами.

В основу методики положена программа расчета плоской установившейся фильтрации, составленная в лаборатории устойчивости хвостохранилищ гидротехнического отдела. Программа составлена на языке АЛГОЛ-60, ТА-2М*. В качестве метода решения задач использован метод конечных элементов. В процессе работы над методикой решения плоских (профильных) задач фильтрации с применением ЭЦВМ были составлены программы с ручной и автоматической разбивкой на конечные элементы расчетной области. Эффективность программ была проверена на решении однотипных задач. При этом особое внимание было обращено на работу программ с областями, имеющими зоны неоднородности. Анализ результатов счета даже для самых сложных областей показал, что точность расчетов по обеим программам существенно не отличается. Так как подготовка исходных данных в программе с ручной разбивкой более трудоемка (примерно в 40 раз) по сравнению с программой с автоматической разбивкой, в дальнейшем велась работа над программой с автоматической разбивкой расчетной области.

Авторы признательны главному специалисту ОМИРа В.А.Васильеву, а также начальнику гидрогеологического отдела Ю.И.Ляпину и руководителю группы того же отдела Э.И.Письмененковой за предложения и замечания, сделанные ими в процессе подготовки работы к публикации. Авторы будут признательны организациям, использующим методику при расчете фильтрации, за замечания и предложения по улучшению настоящих рекомендаций, а также за сообщения об объемах и результатах их внедрения.

* Распечатка программы в "Методических рекомендациях по расчету плоской (профильной) установившейся фильтрации" не приведена из-за ограниченного объема работы. Желающие ознакомиться с программой могут получить ее распечатку на языке АЛГОЛ-60 или в кодах машины БЭСМ-4М в институте ВИОГЕМ.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДИКИ

В качестве расчетной физической модели принимается пористая недеформируемая среда, в которой происходит фильтрация несжимаемой жидкости.

Принимая ось x горизонтальной и направляя ось y вертикально вверх в соответствии с законом Дарси, имеем следующие уравнения установившейся фильтрации:

$$V_x = -K_x \frac{dh}{dx}, \quad V_y = -K_y \frac{dh}{dy},$$

где $h = \frac{p}{\gamma} + y$ - пьезометрический напор, м; p - давление в жидкости, т / м²; γ - удельный вес жидкости, т / м³; y - расстояние от данной точки до плоскости сравнения, м; K_x и K_y - коэффициенты фильтрации для неоднородной анизотропной среды соответственно в направлении осей x и y , м/сут.

Уравнения, связывающие вектор скорости фильтрационного потока с пьезометрическим напором и коэффициентом фильтрации, не позволяют решать конкретные задачи, если неизвестно дифференциальное уравнение в частных производных, записанных для области фильтрации с определенными граничными условиями. Такое уравнение получают из закона неразрывности фильтрационного потока, с учетом закона Дарси оно преобразуется в линейное дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка [2]

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{dh}{dx}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{dh}{dy}) = 0.$$

Решение плоской установившейся фильтрации заключается в решении уравнения при следующих граничных условиях:

на водопроницаемых границах, находящихся под уровнем воды, h равен пьезометрическому напору;

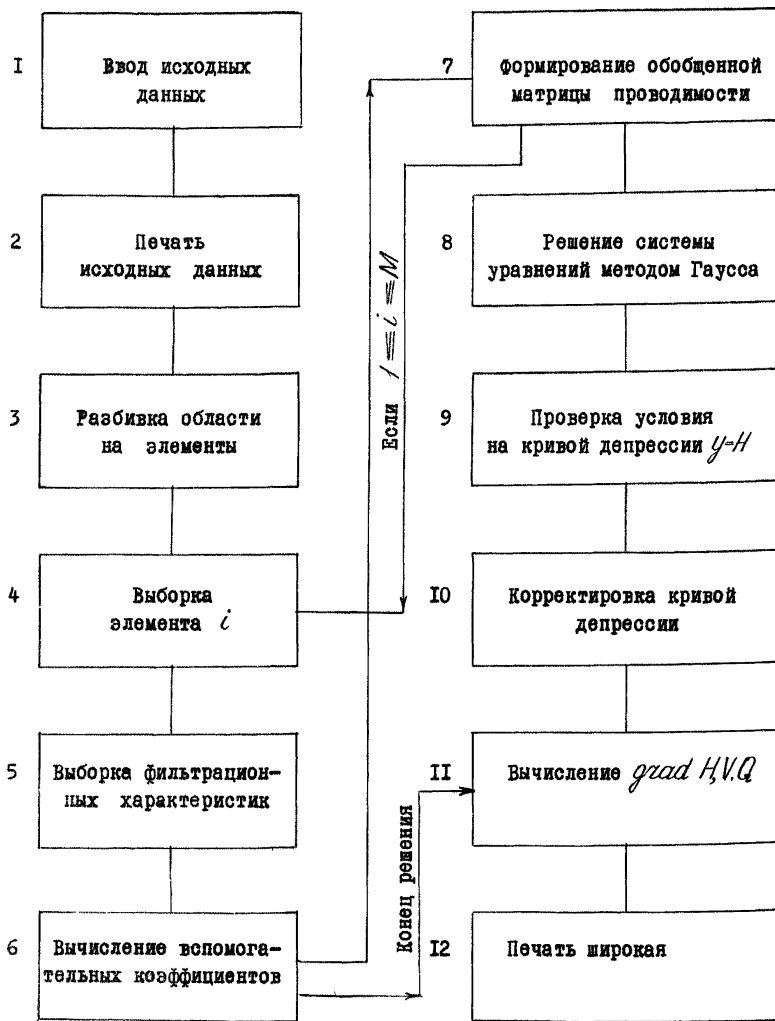
на водонепроницаемых участках производная по нормали к границе $\frac{dh}{dn} = 0$;

на промежутке высачивания $h = y$;

на свободной поверхности $\frac{dh}{dn}$ и $h = y$.

2. АЛГОРИТМ И ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

2.1. Блок-схема программы



Номер блока	Выполняемые операции и действия
I	Описание простых переменных целого и вещественного типа. Описание массивов. Ввод исходных данных
2	Печать исходных данных ($K_y, K_x, Z, Z1, Ed, MXVZ, MПH, GP$) на узкую печать
3	Происходит разбивка расчетной области на прямоугольные треугольники согласно K_x и K_y . Описание этих элементов по номерам узлов, массив ИНФ. Деформация сетки согласно массиву GP. Присвоение узлам граничных условий согласно массиву GP
4	Согласно нумерации элементов происходит выборка номеров узлов i -го элемента, координат узлов для этого элемента
5	Согласно местоположению i -го элемента относительно зон неоднородностей происходит выборка фильтрационных характеристик K_{p2}, K_{p3}, d
6	Вычисляются вспомогательные коэффициенты A, B
7	Вычисляются коэффициенты матрицы проводимости для i -го элемента, которые тут же заносятся в обобщенную матрицу проводимости
8	Решение системы производится методом Гаусса, т.е. матрица MG приводится к треугольному виду, затем обратным ходом определяются неизвестные напоры
9	Проверка условия на кривой депрессии сводится к установлению разности между напором H на кривой депрессии и координатой y узла, в котором берется напор
10	Корректировка координат сетки осуществляется в случае несовпадения H и $y / H - y \leq 3\%$
11	По известным узловым напорам происходит расчет градиентов напоров, скоростей V_x, V_y , расходов Q
12	Печать конечных результатов, таблицы напоров, градиентов скоростей и расходов для каждого элемента

2.2. Подготовка исходной информации

1. Примерно, но заведомо выше своего вероятного положения на чертеже проводится кривая депрессии в виде ломаной линии. Все, что ниже кривой депрессии, называется расчетной областью. Вся работа в дальнейшем ведется с этой областью. При этом, чем ближе проведена начальная кривая депрессии к ее действительному положению, тем быстрее решится задача.

2. Расчетная область фильтрации, включающая зоны неоднородности, описанные ломаными линиями, наносится на миллиметровку.

3. Привязка расчетной области к определенной системе координат производится в следующем порядке. На край расчетной области со стороны большего напора прикладывается ось y так, чтобы она проходила через самую крайнюю точку этой области. Ось x накладывается так, чтобы она проходила через самую низкую точку области.

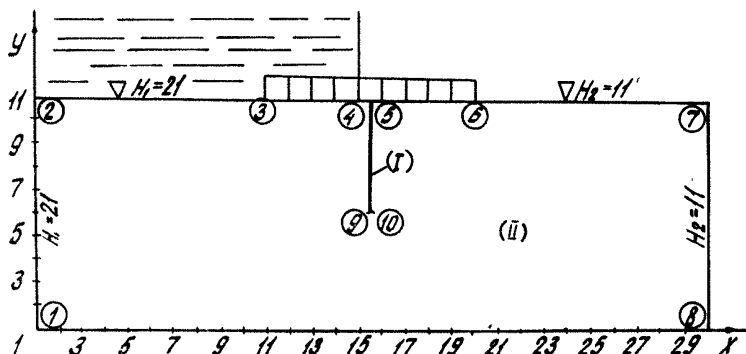


Рис. I. Расчетная схема напорной фильтрации под плоским флотбетом со шпунтом: (I), (II) - зоны неоднородности.

Направление оси y всегда вверх, направление оси x - от оси y в сторону области. Точка пересечения координатных осей имеет координаты $x = 1$, $y = 1$. Характерные точки расчетной области привязываем к принятой системе координат. Так, например, на рис. I приведена расчетная схема фильтрации под плоским флотбетом со шпунтом. В этой схеме вся область - область фильтрации, поэтому весь контур 1, 2, 7, 8, 1 является расчетной областью, шпунт 4, 9, 10, 5, 4 - выделен как зона неоднородности. На рис. 2 расчетная область не совпадает с общей областью, так как, приняв за первоначальное положение кривой депрессии положение 2, 3, 4, мы отсеки от всей об-

ласти часть I,2,3,5,I, которая и является расчетной областью.

После привязки расчетной области к системе координат происходит запись числовой информации на бланках для последующей набивки на перфокарты.

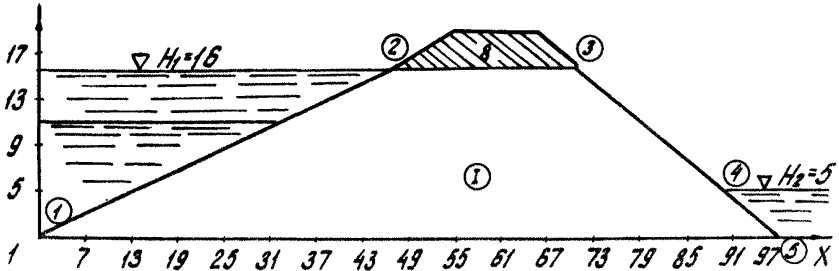


Рис.2. Расчетная схема безнапорной фильтрации в теле плотины.

Числовая информация представляет собой числа и массивы, расположенные в следующем порядке:

- K_y - количество шагов сетки по оси y ;
- K_x - количество шагов сетки по оси x ;
- Z - количество зон неоднородности в расчетной области;
- ZI - количество чисел в массиве $MXYZ [I:ZI]$;
- Ed - количество чисел в массиве $GP [I:Ed]$;
- $MXYZ [I:ZI]$ - массив, описывающий зоны неоднородности;
- $MPI [I:Z, I:Z]$ - массив, описывающий коэффициенты фильтрации;
- $GP [I:Ed]$ - массив, описывающий граничные условия.

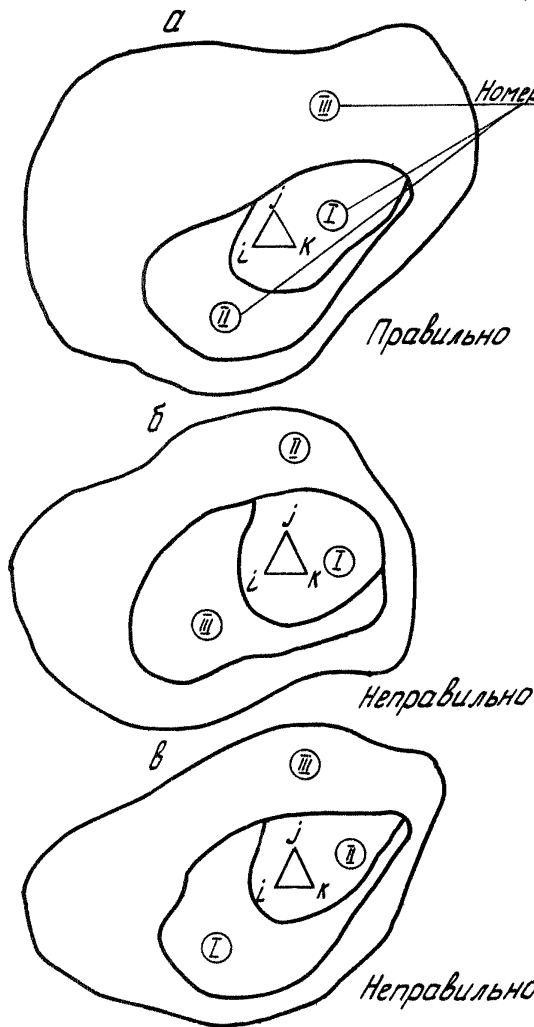
После каждого числа K_y, K_x, Z, ZI, Ed и массивов $MXYZ, MPI, GP$ ставится OKC - "нулевая контрольная сумма" и две чистые перфокарты. OKC - это специальная перфокарта, показывающая конец массива.

2.3. Работа с расчетной областью

I. Все характерные точки расчетной области нумеруются в произвольном порядке. Под характерными точками подразумеваются точки перегиба ломаных линий, описывающих как контур области, так и зоны неоднородности.

Так, например, на рис.1 отрезки 1,2; 2,7; 7,8; 1,8 ограничивают область. На отрезках 2,3; 6,7 задается напор, отрезки 3,4;

5,6 - части флотбета, 4,5,Ю,9 - шпунт, представлен как зона неоднородности с коэффициентом фильтрации $K_{\phi} = 0$;



На рис.2
 точки 4,5;
 I,2 - от -
 резки кон-
 тура, где применен на-
 пор; 2,3; 3,4 - кри-
 вая депрессии.

2. Пронумеруем зо-
 ны неоднородности, т.е.
 зоны с различными ко-
 эффициентами фильтра-
 ции, при этом следует
 придерживаться следу-
 ющего правила. Первы-
 ми нумеруются те, в
 которых нет других зон.

Так, на рис.3 при-
 веден пример нумера-
 ции зон неоднородно-
 сти. Такой порядок ну-
 мерации связан с ал-
 горитмом определения
 местонахождения эле-
 мента относительно о
 этих зон. Для опреде-
 ления местоположения
 координат центра тя-
 жести элемента прове-
 ряется их местонахож-
 дение в первой зоне.
 Если элемент не нахо-
 дится там, то он про-
 веряется во второй
 зоне и т.д. Как толь-
 ко элемент "находит
 свою зону", дальнейший
 поиск прекращается, и

Рис.3. Примеры нумерации зон неоднородности. происходит выбор ка

коэффициентов фильтрации из массива МПІ. Так, элемент (i, j, k) для программы в случаях а, б и в находится в первой зоне, так как его местонахождение проверяется сначала относительно первой зоны (см. рис.3). Вторая зона сама находится в первой, поэтому и элемент, лежащий в ней, тоже будет для программы находиться в первой зоне.

2.4. Подготовка числовой информации для ЭВМ

1. Определяем K_y, K_x . На выбор K_y, K_x накладываются следующие условия: $(K_y + 1)(K_x + 1) \leq 500, K_y \leq 30$. С учетом значений K_y, K_x в расчетной области происходит (при работе программы) выборка наибольшей ординаты y_{max} и абсциссы x_{max} . По этим координатам строится прямоугольник со сторонами $A = y_{max} - 1; B = x_{max} - 1$, который разбивается на K_y полос по вертикали и K_x полос по горизонтали, т.е. на $(K_y K_x)$ прямоугольных элементов со сторонами $a = \frac{y_{max} - 1}{K_y}; b = \frac{x_{max} - 1}{K_x}$, которые в свою очередь разбиваются на два прямоугольных треугольника - основные элементы сетки. В принципе, чем гуще разбивка, т.е. чем больше K_y и K_x , тем точнее результат счета. Для простых областей при ограничении машинного времени можно количество элементов уменьшить, но тогда величина элемента увеличится, что приводит к более приближенному описанию зон неоднородности.

2. Z - число, равное количеству зон неоднородности, так, для расчетной схемы рис.1 $Z = 2$, для расчетной схемы рис.2 $Z = 1$.

3. ZI - число, равное количеству чисел в массиве $MXYZ$, определяется после того, как сформирован массив $MXYZ$.

Так, например, в расчетной схеме рис.1, прил.1 массив имеет 20 чисел, $ZI = 20$.

4. L - число, равное количеству чисел в массиве IP , так, например, в расчетной схеме (см. рис.1, прил.1) массив имеет 36 чисел, $L = 36$.

5. После того, как были пронумерованы зоны неоднородности и их характерные точки, описывающие данные зоны, формируется массив $MXYZ$:

а) в порядке нумерации зон по характерным точкам обходятся зоны неоднородности. Обход может осуществляться как по часовой, так и против часовой стрелки, но выбранное направление обязательно сохранять для описываемой зоны.

Для тестовой задачи (см. рис.1, прил.1) зоны можно обойти по следующему маршруту: I зона - 9,4,5,10,9; II зона - 1,2,7,8,1. При

этом обязательно замыкать зоны той же точкой из которой вышли. Так, в нашем примере I зону замкнули 9-й точкой, II - I-й точкой;

б) после того, как маршруты установлены, номера точек заменяются их координатами x, y , и это записывается на специальных бланках (см. рис.1, прил.1; рис.2, прил.2).

6. Массивом МПІ задаются фильтрационные характеристики зонам неоднородности. В соответствии с нумерацией зон каждой присваивается три характеристики:

а) коэффициент фильтрации $K_{фx}$ по оси x ;

б) коэффициент фильтрации $K_{фy}$ по оси y ;

в) угол анизотропии α в радианах;

Для изотропного грунта $K_{фx} = K_{фy}$; $\alpha = 0$.

Если расчетная область состоит из n зон неоднородности, то фильтрационные характеристики записываются в следующем порядке на бланках:

$K_{фx(1)}, K_{фy(1)}, \alpha_{(1)}, K_{фx(2)}, K_{фy(2)}, \alpha_{(2)}, \dots, K_{фx(n)}, K_{фy(n)}, \alpha_{(n)}$,
в кружочках - номер зоны неоднородности (см. приложения).

7. Массив ГР [I : Ed] используется для задания граничных условий расчетной области и изменения первоначального регулярного деления области на окончательное.

Задание граничных условий производится по следующим правилам:

а) отрезки, на которых заданы равные расходы или равные напоры, нумеруются в произвольном порядке;

б) в порядке нумерации на отрезках записываются условия по форме

$$\begin{array}{cccccc} \overbrace{\pm X \quad \pm Y}^i & \overbrace{\pm X \quad \pm Y}^j & & & & \\ \text{I} & \text{2} & \text{3} & \text{4} & \text{5} & \text{6} \end{array} \quad Q/H \quad 0,$$

где x, y - координаты концов отрезка; i - номер точки одного конца отрезка; j - номер точки второго конца отрезка; знак + перед x_i означает, что задан расход; знак - перед x_i означает, что задан напор; пятое число - значение расхода или напора, шестое число 0;

в) точка с граничными условиями рассматривается как отрезок с нулевой длиной и записывается так, как указано в п. б. В этом случае $x_i y_i = x_j y_j$.

Для простого смещения узлов запись отрезка, на котором должны находиться узлы, производится аналогично указанной в п. б, только знаки при x и y - положительные, а пятое и шестое числа всегда равны 0.

Любой отрезок массива ГР с крайними условиями или для простого смещения является местоположением ближайших к нему узлов.

С помощью массива ГР можно так описывать зоны неоднородности, чтобы на сторонах лежали узловые сетки. Этот прием был использован и в тестовой задаче (см. рис. 1, прил. 1), где в массиве ГР был описан шпунт.

В этом случае смещается ближайший к описываемому отрезку узел, о чем всегда надо помнить, т.е. узел, у которого расстояние по горизонтали до описываемого отрезка $< 0,5B$ или по вертикали $l < 0,5A$, где B, A - величины соответственно элемента по осям x и y ;

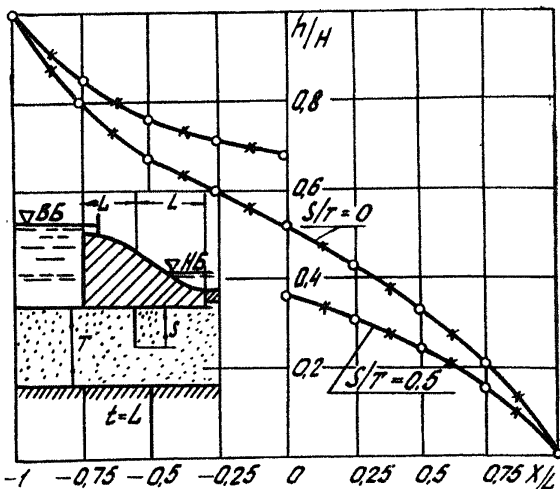
г) знак - перед координатой y_c означает, что данный отрезок (точка) принадлежит кривой депрессии (см. рис. 2, прил. 2). При этом вначале лучше задать кривую депрессии, а потом другие граничные условия. В напорных задачах, где нет кривой депрессии, условия кривой депрессии не задаются (см. рис. 1, прил. 1; рис. 2, прил. 2).

3. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ПЛОСКИХ ПРОФИЛЬНЫХ ЗАДАЧ ФИЛЬТРАЦИИ

По данной программе был решен ряд задач (часть из них приведена в настоящих рекомендациях), для контроля результаты расчетов на ЭВМ были сравнены с результатами расчетов методом ЭГДА, которые проводились Харьковским отделением ВОДГЕО. Задачи 5, 6, 7 были решены только с помощью программы с целью определения гра-

Рис. 4. Расчетная схема фильтрации через основан и е бетонной плотны со шпунтом:

—○— аналитическое решение;
—x— решение МКЭ.



ниц применения данной программы к решению аналогичных задач. Решение фильтрационной задачи по программе в сравнении с точным аналитическим решением приведено на рис.4.

Задачи, приведенные в настоящей работе можно привести к пяти типам:

1. Фильтрация через основание бетонной плотины со шпунтом [3].
2. Фильтрация в земляной плотине с каменно-набросной дренажной призмой.
3. Фильтрация через земляную плотину с экраном.
4. Фильтрация через земляную плотину с трубчатым дренажем.
5. Фильтрация в земляной плотине с ленточным дренажем.

Рассмотрим подробнее подготовку исходных данных для приведенных и аналогичных фильтрационных задач.

3.1. Фильтрация через основание бетонной плотины со шпунтом, напорная фильтрация

В этом типе задач благодаря тому, что все крайевые условия известны, решение происходит за один цикл (в понятие "цикл" входит формирование и решение системы уравнений). Расчетные области задач такого типа могут иметь практически любую геометрию, самые причудливые зоны неоднородности с различными коэффициентами фильтрации. Так, на рис.4 приведена расчетная схема фильтрации через основание бетонной плотины со шпунтом. Задача была решена при $\frac{S}{T} = 0$ и $\frac{S}{T} = 0,5$, где S - длина шпунта, м; T - мощность подстилающего слоя, м; лежащего на водонепроницаемом основании. Шпунт был представлен как зона неоднородности с коэффициентом фильтрации $K_S = K_0$ и $K_S = 0$, где K_S - коэффициент фильтрации шпунта; K_0 - коэффициент фильтрации подстилающего слоя (см.прил. I к рис. I). Расхождение с точным аналитическим решением менее 1%.

3.2. Фильтрация в земляной плотине с каменно-набросной призмой

В задачах такого типа каменная наброска задается как зона неоднородности с большим коэффициентом фильтрации. Полученные решения позволяют сделать вывод о том, что при коэффициенте фильтрации призмы K_{np} более 1,5 K_n (K_n - коэффициент фильтрации плотины) влияние призмы на положение кривой депрессии в теле плотины не наблюдается (рис.5).

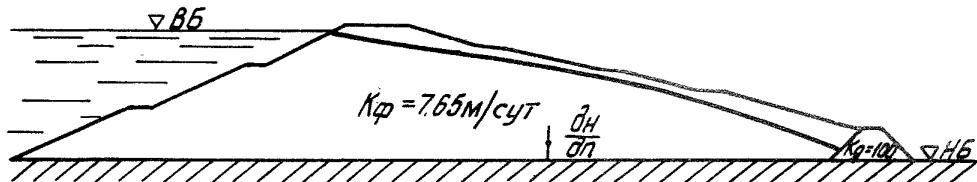


Рис.5. Расчетная схема земляной плотины с каменно-набросной дренажной призмой.

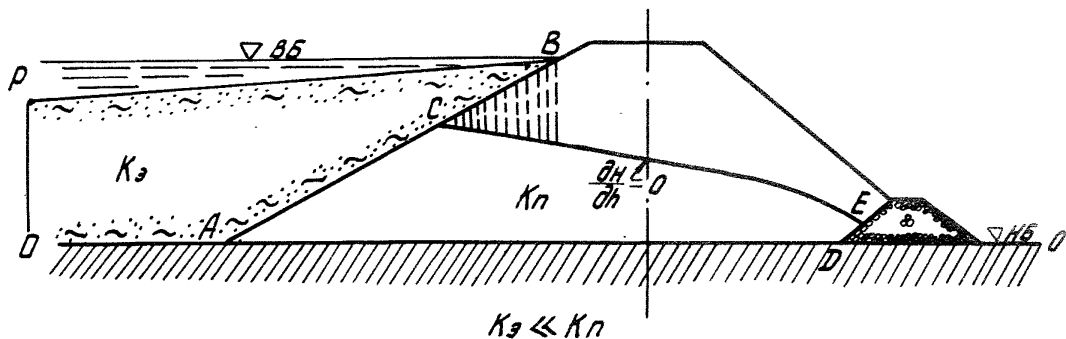


Рис.6. Расчетная схема фильтрации плотины с экраном:

AB - линия раздела зон неоднородности; BC - участок высачивания;
 AC - линия равных напоров; CE - кривая депрессии; AD - водоупор.

3.3. Безнапорная фильтрация в земляной плотине с экраном

Сущность решения заключается в следующем. Поскольку при переходе из среды с малым коэффициентом фильтрации в среду со значительно большим коэффициентом фильтрации нарушается неразрывность потока, приходится решать такую задачу в несколько этапов.

Задается расчетная область ОРВСЕДО с приближенным положением кривой депрессии (рис.6). На участке высачивания СВ задается напор в точках пересечения горизонтальных линий сетки и отрезка СВ. В каждой такой точке с координатами x_i, y_i задается напор $H=y_i$. Эта запись осуществляется в массив ГР по правилам, изложенным выше. Происходит первое решение.

Зная напоры по узлам сетки и расходы по элементам из первого решения, вручную определяется расход через участок СВ. При этом считаем, что этот расход в виде инфильтрации попадает в зону фильтрации АСЕДА. В нескольких узлах под кривой депрессии СВ заданы инфильтрационные расходы. Добавляя в исходные данные эти расходы задачу решаем вторично.

Если вновь полученное положение кривой депрессии не будет отличаться по координатам y от предыдущего положения в каких-то узлах, то в этих узлах требуется начальное положение кривой депрессии поднять и сосчитать вновь. По полученным данным определяем вручную расход через сечение АВ. Если этот расход равен расходу через сечение плотины, то расчет заканчивается, если есть расхождение, то точку С надо скорректировать.

3.4. Фильтрация через земляную плотину с трубчатым дренажем

В этом типе задач дренаж задавался точкой с напором, равным ординате y этой точки (рис.7). Исходная информация приведена на бланке (см.прил.3). Задача решена за 18 циклов. Границы применения данного подхода к решению аналогичных задач не выявлялись. Исходя из физических соображений можно порекомендовать следующий подход к решению таких задач. Если при задании напора в дренаже, в результате расчета вокруг дренажа появляются большие градиенты напора или большие скорости фильтрации, т.е. если в этой области может произойти разрыв сплошности потока, представление дренажа в виде напорной точки неправомерно, правильнее будет в дренажной точке задать расход, который может быть определен из ка-

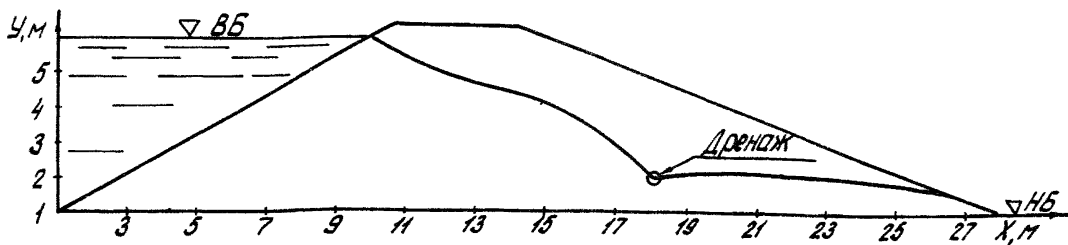
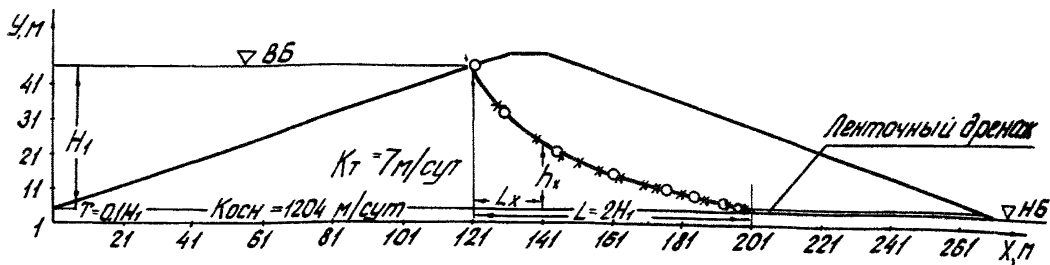


Рис.7. Плотина с трубчатым дренажем.



Сравнение положений кривых депрессии

Метод	$\frac{H}{H_1}$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9	0,95
ЭГДА	$\frac{h}{H_1}$	0,55	0,401	0,268	0,158	0,108	0,058	0,031
МКЭ	$\frac{h}{H_1}$	0,72	0,44	0,27	0,16	0,10	0,05	0,03

Рис.8. Однородная земляная плотина на однородном основании:

—○— метод ЭГДА; —×— метод МКЭ.

ких-то источников или изменить коэффициент фильтрации в зоне, прилегающей к дренажу в сторону уменьшения.

3.5. Фильтрация в земляной плотине с ленточным дренажем

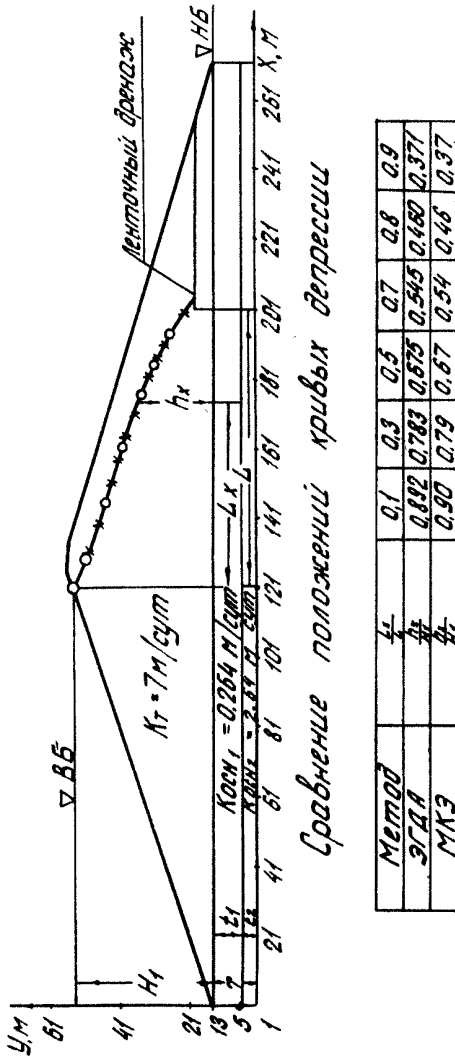


Рис.9. Однородная земляная плотина на двухслойном основании:
—o—o— метод ЭГДА; —x—x— метод МКЭ.

Задачи такого типа были решены с однослойным (рис.8, прил.4), двухслойным (рис.9, прил.5) и трехслойным (рис.10, прил.6) основаниями. При этом количество слоев может быть более трех, а их геометрия не правильной формы.

Задача "Однородная плотина на однородном основании" (рис.8). Общая толщина основания $T = 0,1\frac{1}{2}$ соотношению коэффициентов фильтрации $K_{осн} = 17,2$; исходная информация для решения задачи приведена на бланке (прил.4). Дренаж задан напором. Задача решается за II циклов. Положение кривых депрессии приведено в таблице на рис.8. Расход, определенным методом ЭГДА, равен $1070 \text{ м}^3/\text{сут.}$, по МКЭ $1085 \text{ м}^3/\text{сут.}$ Расхождение 1,4%.

Задача "Земляная

плотина на двух -
 слойном основании"
 (рис. 9). Общая
 толщина основания
 $T = 0,3H_p \frac{1}{\lambda} =$
 $= 0,667$, соотно -
 шение коэффициен -
 тов фильтраци и
 $K_{ф1} = 26,6$; $\frac{K_{ф2}}{K_{ф1}} =$
 $= 10$. Исходная ин -
 формация для ре -
 шения задачи при -
 ведена на блан -
 ке (см. прил.3).
 Дренаж задан на -
 пором. Задача ре -
 шается за 5 цик -
 лов. Положение
 кривых депрессий,
 определенных ме -
 тодами ЭГДА и МКЭ,
 приведено в таб -
 лице на рис. 9.
 Расход через плот -
 ину, определенный
 по методу ЭГДА,
 равен $57,82 \text{ м}^3/\text{сут}$,
 по МКЭ - $57,2 \text{ м}^3/\text{сут}$.
 Расхождение $\leq 1,5\%$.

Задача "Земля -
 ная плотина на
 трехслойном осно -
 вании" (рис. 10).
 Общая толщина осно -
 вания $T = H_1$,
 $\frac{L_1}{T} = 0,5$, $\frac{L_2}{T} =$
 $= 0,25$, соотно -
 шение коэффици -
 ентов фильтрации
 $\frac{K_{ф1}}{K_{ф3}} = 0,045$, $\frac{K_{ф2}}{K_{ф3}} =$

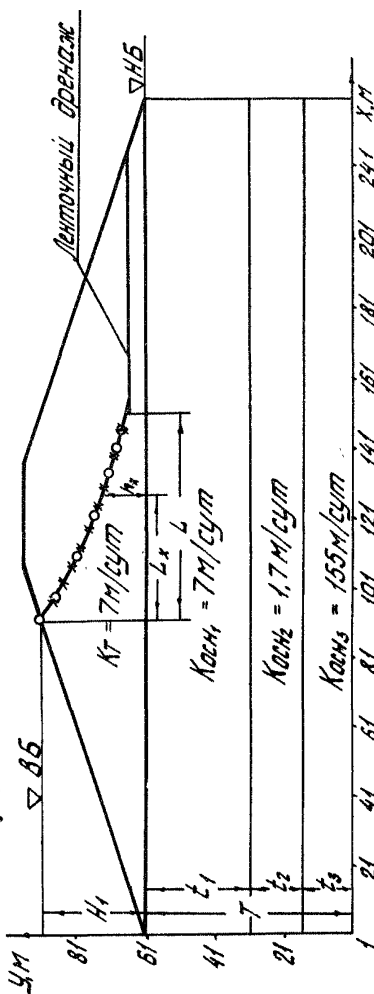


Рис. 10.

Однородная
 земляная
 плотина на
 трехслой -
 ном осно -
 вании:

—○— МКЭ -
 год ЭГДА;
 —×— МКЭ -
 год МКЭ.

Сравнение положений кривых депрессий

Метод	$\frac{L_1}{T}$	$\frac{L_2}{T}$	$\frac{L_3}{T}$	$\frac{K_{ф1}}{K_{ф3}}$	$\frac{K_{ф2}}{K_{ф3}}$	$\frac{Q_{ЭГДА}}{Q_{МКЭ}}$
ЭГДА	0,1	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9
МКЭ	0,20	0,74	0,65	0,43	0,36	0,28

= 0,011. Исходная информация для решения задачи приведена на бланке (см. прил. 6). Дренаж задан напором. Задача решается за 18 циклов. Положение кривых депрессий, определенных методом ЭГДА и МКЭ, приведено в таблице на рис. 10. Расход через плотину, определенный по методу ЭГДА, равен $235,5 \text{ м}^3/\text{сут}$, расхождение менее 1%.

Расходы, полученные при решении задач с помощью программы, достаточно хорошо совпадают с расходами, полученными методом ЭГДА для аналогичных задач. Расходы в программе определяются через вертикальные, а не живые сечения. При этом наблюдаются некоторые скачки в значениях расхода для разных сечений одной расчетной области. Это объясняется не совсем удачным выбором алгоритма определения расхода. Было отдано предпочтение краткости алгоритма в ущерб его точности, так как транслятор TA-2M плохо работает с большими программами. Значения расходов из результатов счета предпочтительно выбирать для сечений, проходящих через наиболее полные участки кривой депрессии. Для определения ошибки, которая может возникнуть из-за не совсем точного подхода к расчету расходов в расчетной области, были определены расходы через живые сечения. Так, расход, полученный через живое сечение, равен $143 \text{ м}^3/\text{сут}$, расход, полученный по программе, равен $138 \text{ м}^3/\text{сут}$. Таким образом, расхождение составляет 4%.

3.6. Сопоставление решения задач, полученных по методике с ручной и автоматической разбивкой области фильтрации

При работе над методикой решения плоских (профильных) задач фильтрации были составлены программы с ручной и автоматической разбивкой области. Анализ методики подготовки исходных данных и результатов решения показал, что подготовка исходных данных по программе с ручной разбивкой расчетной области более трудоемкая (примерно в 40 раз). При этом если все критерии автоматической разбивки расчетной области (п. 3) выполнены, то существенного различия при решении аналогичных задач фильтрации не наблюдается (рис. 11).

Информационное ограничение программы: K_y - количество шагов деления по вертикали ≤ 30 ; K_x - количество шагов деления по горизонтали $(K_y + 1)(K_x + 1) \leq 500$; Z - количество зон неоднородности $Z \leq 20$; $Z1$ - количество чисел в массиве зон неоднородности $Z1 \leq 100$; Ed - количество чисел в массиве граничных условий ≤ 100 .

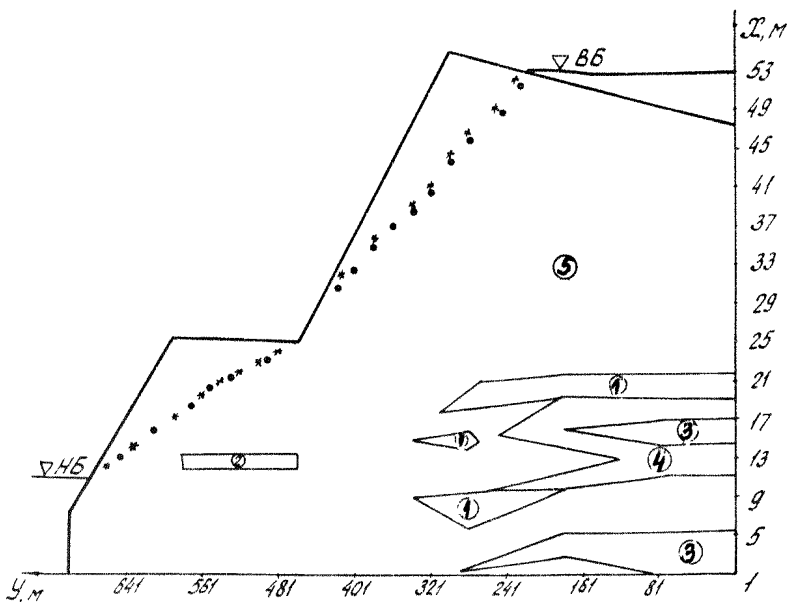


Рис. II. Положение кривой депрессии при ручной и автоматической разбивке в дамбе Качканарского хвостохранилища:

* ручная разбивка; • автоматическая разбивка;

① - $K_{\varphi} = 0$ м/сут; ② - $K_{\varphi} = 0,1$ м/сут; ③ - $K_{\varphi} = 1,9$ м/сут;

④ - $K_{\varphi} = 1,6$ м/сут; ⑤ - $K_{\varphi} = 9,3$ м/сут; ⑥ - $K_{\varphi} = 1,6$ м/сут.

При этом надо знать особенности транслятора ТА-2М. Если в одном из массивов имеется больше 60 чисел, то после каждых 60 чисел (5 заполненных перфокарт) вставляется нулевая контрольная сумма и две чистые перфокарты.

Время счета заранее рассчитать трудно, все зависит от количества циклов, за которые решение выйдет на заданную точность, но время одного цикла приблизительно можно определить из эмпирической формулы $t_{\text{цикл}} = NK_y / 1500$ (мин), где $N = (K_y + 1)(K_x + 1)$.

В ы в о д ы

1. Существующие аналоговые, теоретические и экспериментальные методы решения задач плоской (профильной) установившейся фильтрации недостаточно эффективны при решении задач со сложными инженерно-геологическими условиями.

2. Работа с программой с ручной разбивкой расчетной области фильтрации показала, что трудозатраты при решении сложных инженерных задач МКЭ и ЭГДА (аналоговое моделирование) сопоставимы.

3. Методика подготовки исходных данных по программе с ручной разбивкой расчетной области по трудозатратам примерно в 40 раз более трудоемкая, чем в программе с автоматической разбивкой области фильтрации.

4. Расчеты в реальных сооружениях показали, что по методике с автоматической разбивкой области, используя индивидуальный подход, можно решать практически все инженерные задачи плоской (профильной) установившейся фильтрации.

5. Разработанная методика может быть использована в различных отраслях народного хозяйства для решения задач плоской (профильной) установившейся фильтрации.

Л и т е р а т у р а

1. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР. М., "Наука", 1964, 247 с.

2. Аравин В.И., Нумеров С.Н. Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений. М., Гостехиздат, 1955, 292 с.

3. Труды координационных совещаний по гидротехнике. Л., "Энергия", 1977, вып. II3, с.43-47.

Шифр:												Стр. N										
карта N1,2,3,4,5	02	100										Ку	-	01	100							
	02	290										Kx		01	100							
	01	200										Z		01	100							
	02	200										Z1		02	110							
	02	360										Ed		02	210							
															00	000						
карта N6	02	154										MXYZ	-	02	200							
	01	600												02	110							
	02	154												02	300							
	02	110												02	110							
	02	158												02	110							
	02	110												00	000							
	02	136											-	02	300							
	01	600											02	110								
	02	134											02	300								
	01	600											01	100								
	01	100											02	110								
	карта N7	01	100									массив	00	000								
02		110											02	154								
02		300											02	110								
02		110											02	154								
02		300											01	600								
01		100											00	000								
01		100											00	000								
														02	156							
														02	110							
														02	158							
карта N8	00	000									массив	01	600									
	00	000											00	000								
	00	000											00	000								
	01	100											00	000								
	01	100											00	000								
	00	000												00	000							
карта N9											карта N10											
													-	02	200							
														02	110							
														02	300							
														02	110							
														02	110							
														02	210							
														00	000							
														-	01	100						
														02	110							
														02	110							
														02	210							
карта N11											карта N12											
													02	154								
														02	110							
														02	154							
														01	600							
														00	000							
														00	000							
														02	156							
														02	110							
														02	158							
														01	600							
														00	000							

Шифр:										Стр. №								
Карта N1,2,3,4,5		01	500						Ку		-	01	100					
		02	390						Кх			01	100					
		01	100						З			02	470					
		02	100						З1			02	160					
		02	240						Ed			02	160					
												00	000					
Карта N6		01	100						Массив МХУЗ			-	02	980				
		01	100										01	100				
		02	470										02	898				
		02	160										01	500				
		02	713										01	500				
		02	140										00	000				
		02	980															
		01	100															
		01	100															
		01	100															
Карта N7		00	260						Массив МП1									
		00	260															
		00	000															
Карта N8		02	470						Массив ГР									
		02	160															
		02	713															
		02	140															
		00	000															
		00	000															
		02	713															
		02	140															
		02	890															
		01	500															
	00	000																
	00	000																

Шифр				Стр N					
Карта N 1, 2, 4, 5, 3	01	500		Ку	-	01	100		Массив ГР
	02	200		Кх		01	100		
	01	100		Z		02	100		
	02	100		ZH		01	500		
	02	300		Ed		01	500		
						00	000		
					-	02	300		
						01	100		
						02	300		
						01	100		
						02	300		
						01	100		
						00	000		
						-	02	180	
						01	200		
						02	180		
						01	200		
						01	200		
						00	000		
Карта N 6	01	100		Массив МХУЗ	Карта N 10	Z			
	01	100							
	02	100							
	01	500							
	02	150							
	01	500							
	02	300							
	01	100							
	01	100							
	01	100							
Карта N 7	01	100		Массив МП1	Карта N				
	01	100							
	00	000							
Карта N 8	02	100			Карта N				
	01	500							
	02	150							
	01	500							
	00	000							
	00	000							
	02	150							
	01	500							
	02	300							
	01	100							
00	000								
00	000								

Шифр:										стр. N											
Карта N1,2,3,4,5	02	100								KV	03	121									
	02	440								Kx	-	02	450								
	01	200								Z		03	151								
	02	200								Z1		02	450								
	02	360								Ed		00	000								
Карта N6	01	100								МАССУВ МХУЗ	00	000									
	01	100																			
	01	100																			
	01	500																			
	03	271																			
	01	500																			
	03	271																			
	01	100																			
	01	100																			
	01	100																			
	01	100																			
	01	500																			
Карта N7	03	121								МАССУВ ГР	-	01	100								
	02	450																			
	03	151																			
	02	450																			
	03	271																			
	01	500																			
	01	100																			
	01	500																			
	Карта N8	04	1204									МАССУВ МП1	01	100							
		04	1204																		
00		000																			
01		700																			
01		700																			
00		000																			
Карта N9		03	121								МАССУВ ГР		-	01	100						
		02	450																		
		03	151																		
		02	450																		
	00	000																			
	03	151																			
	-	02	450																		
	03	271																			
	01	500																			
	00	000																			
	00	000																			
	Карта N10	03	201									МАССУВ ГР	-	01	100						
01		500																			
03		271																			
01		500																			
01		500																			
00		000																			
-		01	100																		
01		100																			
01		100																			
01		500																			
02		450																			
00		000																			
Карта N11	01	100								МАССУВ ГР	-	01	100								
	01	500																			
	03	121																			
	02	450																			
	02	450																			
	00	000																			
	-	03	271																		
	01	100																			
	03	271																			
	01	500																			
01	500																				
00	000																				
Карта N	04	1204								МАССУВ МП1											
	04	1204																			
	00	000																			
	01	700																			
	01	700																			
	00	000																			

ШЛЧФР:				Стр N			
Карта N 1,2,3,4,5	02	100		Ky	01	264	
	02	440		Kx	01	264	
	01	300		Z	00	000	
	02	300		Z1	00	264	
	02	360		Ed	00	264	
						00	000
Карта N 6	01	100	Массив МХУЗ	Карта N 9	03	700	
	01	100			00	000	
	01	100			00	700	
	01	500			00	000	
	03	271			01	700	
	01	500			00	000	
	03	271			01	700	
	01	100			00	000	
	01	100			03	121	
	01	100			02	530	
Карта N 7	01	100	Массив ГР	Карта N 10	03	151	
	02	130			02	530	
	03	271			00	000	
	02	130			00	000	
	03	271			03	151	
	01	500			02	530	
	01	100			03	271	
	01	500			02	180	
	02	130			00	000	
	03	121			00	000	
Карта N 8	02	530	Карта N 11	Карта N	03	204	
	03	151			02	155	
	02	530			03	263	
	03	271			02	155	
	02	130			02	155	
	01	100			00	000	
	02	130					
	02	130					

Шифр					Стр. N			
Карта N 1.2.3.4.5	02	100		Ку	03	241		
	02	440		К*	02	610		
	01	400		Е	01	100		
	02	400		21	02	610		
	02	360		Ед				
Карта N6	01	100		Массив МХУЗ	03	155		Массив МП1
	01	100			03	155		
	01	100			00	000		
	02	160			01	170		
	03	241			01	170		
	02	160			00	000		
	03	241			01	700		
	01	100			01	700		
	01	100			00	000		
	01	100			01	700		
	01	100			01	700		
	02	160			00	000		
Карта N7	01	100		Массив МХУЗ	02	910		ГР
	02	310			02	910		
	03	241			03	151		
	02	310			02	910		
	03	241			00	000		
	02	160			00	000		
	01	100			03	151		
	02	160			02	910		
	01	100			03	241		
	02	310			02	610		
	01	100			00	000		
	02	610			00	000		
Карта N8	03	241		Массив	03	153		Массив
	02	610			02	630		
	03	241			03	235		
	02	310			02	630		
	01	100			02	630		
	02	310			00	000		
	01	100			01	100		
	02	610			01	100		
	02	910			01	180		
	02	910			02	610		
	03	151			02	610		
	02	910			00	000		
Карта N9				Массив	01	100		Массив
					02	610		
					02	910		
					02	910		
					02	910		
					00	000		
					03	241		
					01	100		
					03	241		
					02	610		
					02	610		
					00	000		
Карта N10				Массив	01	100		Массив
					02	610		
					02	910		
					02	910		
					02	910		
					00	000		
					03	241		
					01	100		
					03	241		
					02	610		
					02	610		
					00	000		
Карта N11				Массив	01	100		Массив
					02	610		
					02	910		
					02	910		
					02	910		
					00	000		
					03	241		
					01	100		
					03	241		
					02	610		
					02	610		
					00	000		
Карта N12				Массив	01	100		Массив
					02	610		
					02	910		
					02	910		
					02	910		
					00	000		
					03	241		
					01	100		
					03	241		
					02	610		
					02	610		
					00	000		
Карта N13				Массив	01	100		Массив
					02	610		
					02	910		
					02	910		
					02	910		
					00	000		
					03	241		
					01	100		
					03	241		
					02	610		
					02	610		
					00	000		

СО Д Е Р Ж А Н И Е

Введение	3
1. Теоретические основы методики	5
2. Алгоритм и описание программы решения задач . .	6
2.1. Блок-схема программы	6
2.2. Подготовка исходной информации	8
2.3. Работа с расчетной областью	9
2.4. Подготовка числовой информации для ЭВМ	11
3. Примеры решения плоских профильных задач фильтрации	13
3.1. Фильтрация через основание бетонной плотины со шпунтом, напорная фильтрация	14
3.2. Фильтрация в земляной плотине с каменно- набросной призмой	14
3.3. Безнапорная фильтрация в земляной плотине с экраном	16
3.4. Фильтрация через земляную плотину с трубчатым дренажем	16
3.5. Фильтрация в земляной плотине с ленточным дренажем	18
3.6. Сопоставление решения задач, полученных по методике с ручной и автоматической разбивкой области фильтрации	20
Выводы	22
Литература	22
Приложения	23

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ ПЛОСКОЙ (ПРОФИЛЬНОЙ) УСТАНОВИВШЕЙСЯ ФИЛЬТРАЦИИ

Научный редактор канд. физ.-мат. наук В.А. Васильев

Литературный редактор Л.А. Порубай

Технический редактор А.Г. Воронцова

Корректор И.А. Соляр. Художник Б.М. Попов

Подписано к печати 24 сентября 1979 г.

Объем 1,6 уч.-изд. л. Тираж 200 экз. Заказ № 84.

Ротапринт ВПОГЕМ, Белгород, Б.Хмельницкого, 86.

Цена 23 коп.