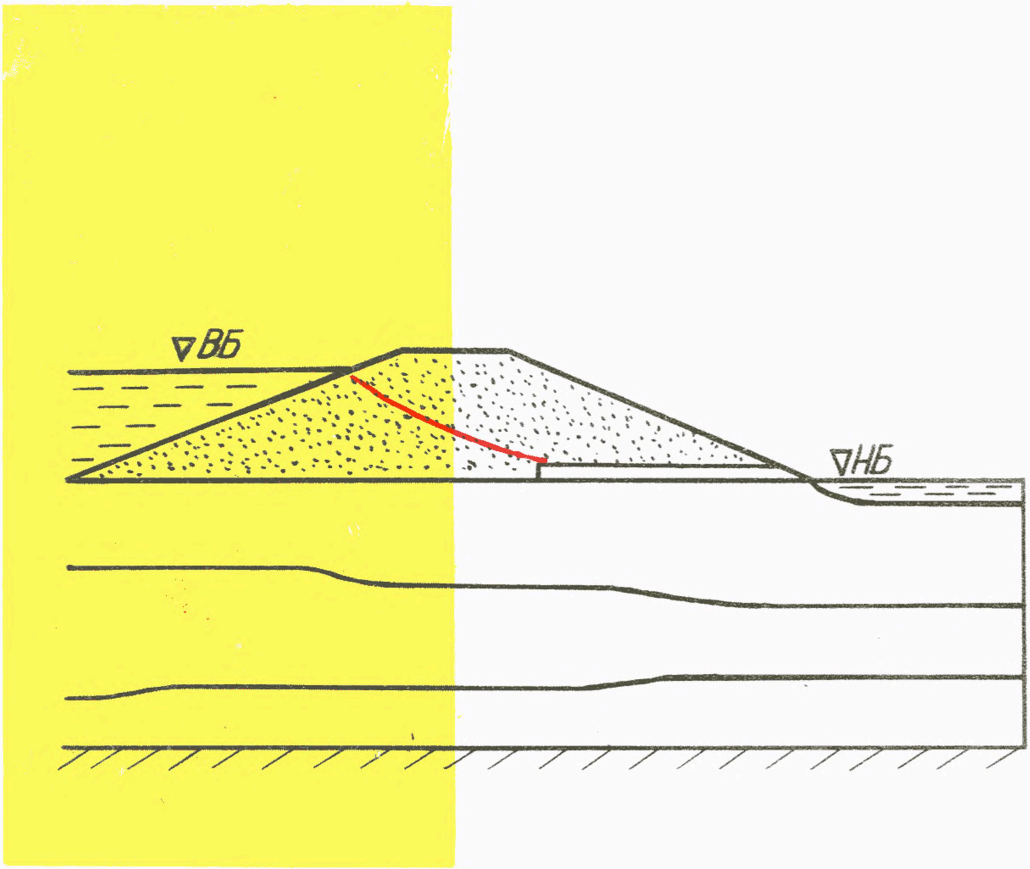


Методические рекомендации по расчету плоской (профильной) установившейся фильтрации

Белгород 1979

gost.e-ecolog.ru

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

УДК 626.001.2

В настоящих рекомендациях приводится методика, позволяющая решать плоские профильные задачи фильтрации при одновременном наличии анизотропии и неоднородности фильтрационных свойств. По программе 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 хвосто-хранилищ гидротехнического отдела ВИОГЕМ канд.техн. наук С.Г.Аксеновым, инженерами В.И.Истоминым 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.

©Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по осушению месторождений полезных ископаемых, специальным горным работам, рудничной геологии и маркшейдерскому делу (ВИОГЕМ), 1979.

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.м^3, для складирования отходов обогащения и осветления воды с целью повторного ее использования в производственном цикле [I]. 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 определяются 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 [I]. 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 З.И.Письменецкой 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.

I. 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:

$$V_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}, \qquad V_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y},$$

где $h = \frac{p}{\gamma} + y$ – пьезометрический напор, м; p – давление в жидкости, т / м^2; γ – удельный вес жидкости, т/м^3; 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]

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) = 0.$$

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

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

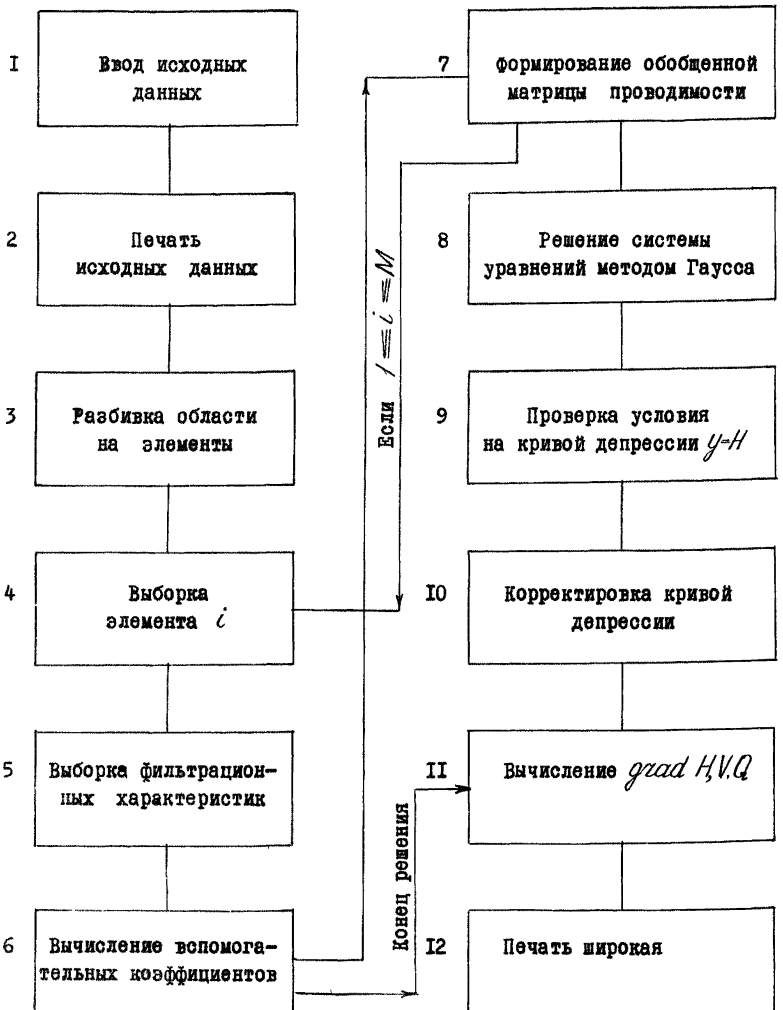
на водонепроницаемых участках производная по нормали к границе $\frac{\partial h}{\partial n} = 0$;

на промежутке высачивания $h = y$;

на свободной поверхности $\frac{\partial h}{\partial n}$ и $h = y$.

2. АЛГОРИТМ И ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

2.I. 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 ($K_y, K_x, Z, Z1, E\alpha, MXYZ, MП1, ГР$) 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 ГР. Присвоение узлам граничных условий согласно массиву ГР
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 $K_{фx}, K_{фy}\alpha$
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
I0	Корректировка координат сетки осуществляется в случае несовпадения H и y $\lvert H-y \rvert \leq 3\%$
II	По известным узловым напорам происходит расчет градиентов напоров, скоростей V_x, V_y, расходов Q
I2	Печать конечных результатов, таблицы напоров, градиентов скоростей и расходов для каждого элемента

2.2. Подготовка исходной информации

I. 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.

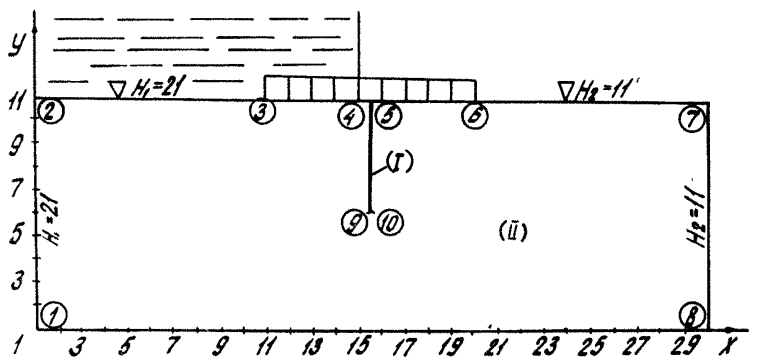


Рис.I. Расчетная схема напорной фильтрации под плоским флютбетом со шпунтом: (I), (II) - зоны неоднородности.

Направление оси y всегда вверх. направление оси x - от оси в сторону области. Точка пересечения координатных осей имеет координаты $x = I$, $y = I$. Характерные точки расчетной области привязываем к принятой системе координат. Так, например, на рис.I приведена расчетная схема фильтрации под плоским флютбетом со шпунтом. В этой схеме вся область - область фильтрации, поэтому весь контур I,2,7,8,I является расчетной областью, шпунт 4,9,I0,5,4 - 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 отсекли 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.

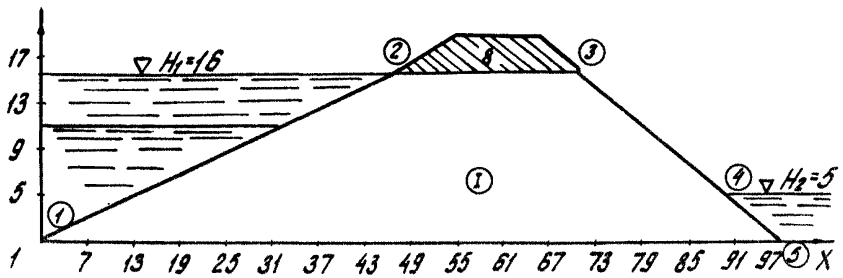


Рис.2. Расчетная схема безнапорной фильтрации в теле плотины.

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;
$Z1$ - количество чисел в массиве $MXYZ[1:Z1]$;
Ed - количество чисел в массиве $GP[1:Ed]$;
$MXYZ[1:Z1]$ - массив, описывающий зоны неоднородности;
$MP1[1:Z,1:3]$ - массив, описывающий коэффициенты фильтрации;
$GP[1:Ed]$ - массив, описывающий граничные условия.

После каждого числа $K_y, K_x, Z, Z1, Ed$ и массивов $MXYZ$, МПI, ГР ставится $OK\Sigma$ - "нулевая контрольная сумма" и две чистые перфокарты. $OK\Sigma$ - 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.I отрезки I,2; 2,7; 7,8; I,8 ограничивают область. На отрезках 2,3; 6,7 задается напор, отрезки 3,4;

5,6 - части флютбета, 4,5,10,9 - шпунт, представлен как зона неоднородности с коэффициентом фильтрации $K_ф = 0$;

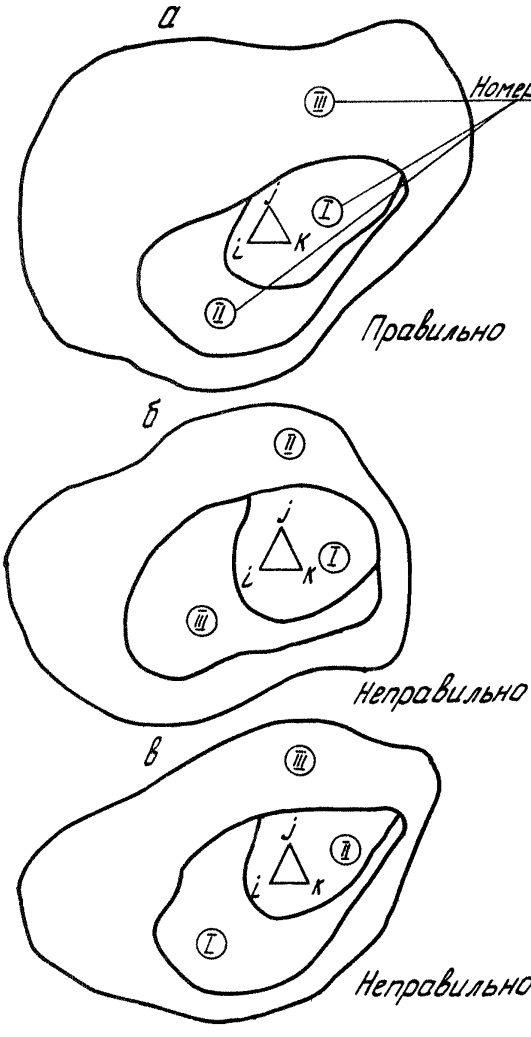


Рис.3.Примеры нумерации зон неоднородности.

На рис.2 точки 4,5; 1,2 - отрезки контура, где приложен напор; 2,3; 3,4 - кривая депрессии.

2. Пронумеруем зоны неоднородности, т.е. зоны с различными коэффициентами фильтрации, при этом следует придерживаться следующего правила. Первыми нумеруются те, в которых нет других зон.

Так, на рис.3 приведен пример нумерации зон неоднородности. Такой порядок нумерации связан с алгоритмом определения местонахождения элемента относительно этих зон. Для определения местоположения координат центра тяжести элемента проверяется их местонахождение в первой зоне. Если элемент не находится там, то он проверяется во второй зоне и т.д. Как только элемент "находит свою зону", дальнейший поиск прекращается, и происходит выбор ка

коэффициентов фильтрации из массива МПI. 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

I. 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.I $Z=2$, 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.I, прил.I массив имеет 20 чисел, $ZI=20$.

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

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.I, прил.I) зоны можно обойти по следующему маршруту: I зона - 9,4,5,I0,9; II зона - I,2,7,8,I. 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.I, прил.I; рис.2, прил.2).

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

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

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

в) угол анизотропии α в радианах;

Для изотропного грунта $K_{\phi x} = K_{\phi y}$; $\alpha = 0$.

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

$$K_{\phi x①}, K_{\phi y①}, \alpha_①, K_{\phi x②}, K_{\phi y②}, \alpha_②, \ldots K_{\phi xⓝ}, K_{\phi yⓝ}, \alpha_ⓝ,$$

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

$$\underbrace{\pm X \quad \pm Y}_{i} \quad \underbrace{+X \quad +Y}_{j} \quad Q/H \quad 0,$$

I 2 3 4 5 6

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 краевыми 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 использо - ван и в тестовой задаче (см.рис.I, прил.I), 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 $< 0{,}5A$, где B, A - величины соответственно элемента по осям x и y;

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

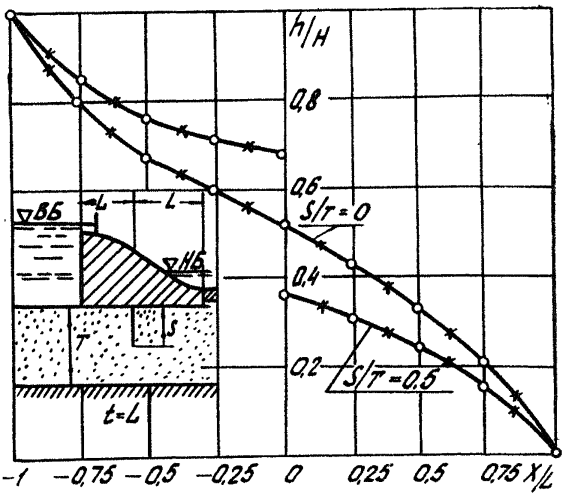


Рис.4. Расчетная схема фильтрации через основание бетонной плотины со шпунтом: —o— - аналитическое решение; —x— - решение МКЭ.

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:

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

В этом типе задач благодаря тому, что все краевые 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 I%).

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 $K_{пр}$ более I,5 $K_п$ ($K_п$ - коэффициент фильтрации плотины) влияние призмы на положение кривой депрессии в теле плотины не наблюдается (рис.5).

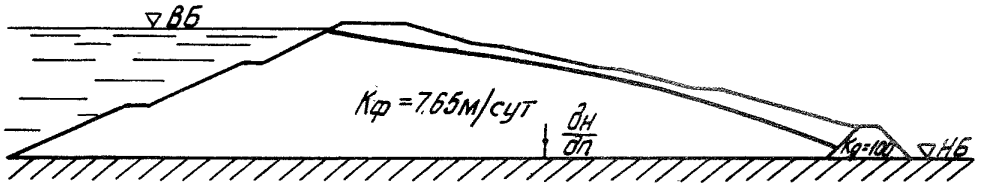


Рис.5. Расчетная схема земляной плотины с каменно-набросной дренажной призмой.

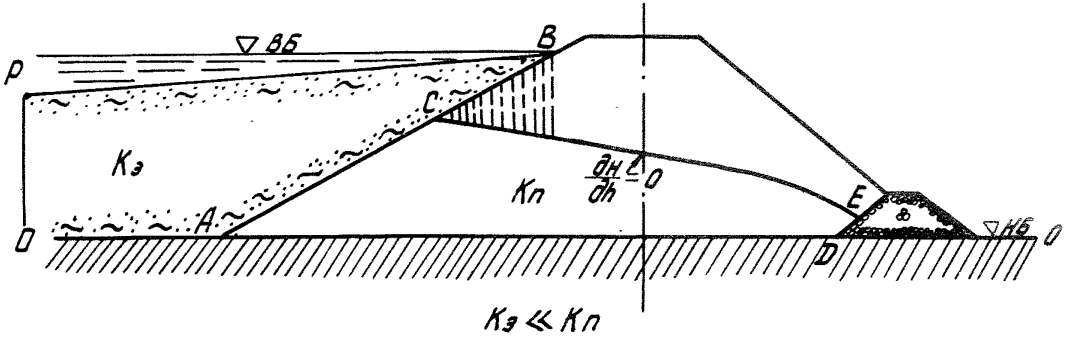


Рис.6. Расчетная схема фильтрации плотины с экраном:
АВ – линия раздела зон неоднородности; ВС – участок высачивания; АС – линия равных напоров; СЕ – кривая депрессии; АД – водоупор.

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 СЕ задаются 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 C 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 неправомочно, правильнее будет в дренажной точке задать расход, который может быть определен из ка-

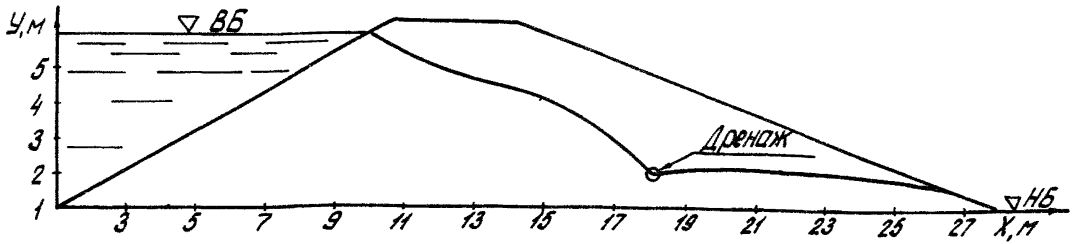
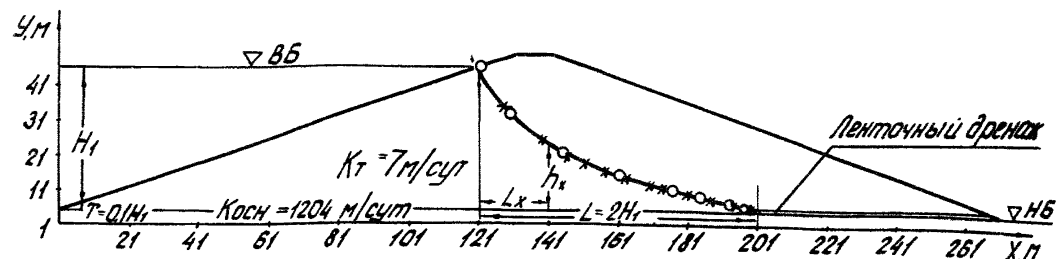


Рис.7. Плотина с трубчатым дренажем.



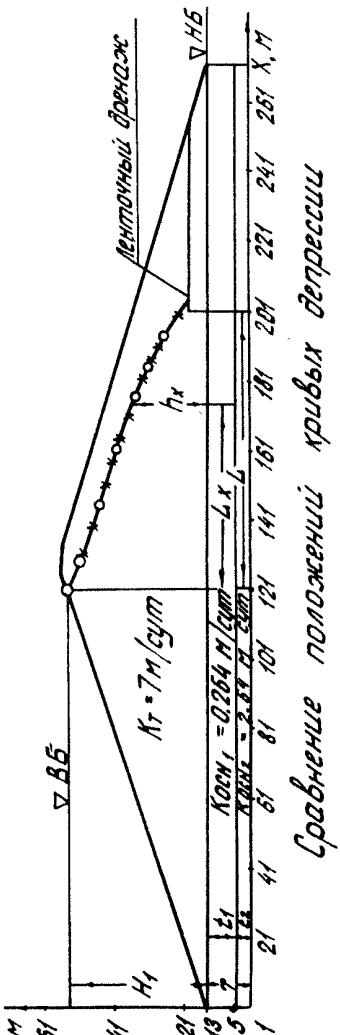
Сравнение положений кривых депрессии

Метод	$\frac{y}{H_1}$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9	0,95
ЭГДА	$\frac{h_x}{H_1}$	0,66	0,401	0,268	0,158	0,108	0,058	0,031
МКЭ	$\frac{h_x}{H_1}$	0,72	0,44	0,27	0,16	0,10	0,05	0,03

Рис.8. Однородная земляная плотина на однородном основании:
—o—o— метод ЭГДА; —x—x— метод МКЭ.

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

3.5. Фильтрация в земляной плотине с ленточным дренажем



Метод	$\frac{L_1}{L}$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9
ЭГДА	$\frac{L_2}{L}$	0,812	0,783	0,675	0,545	0,480	0,377
МКЭ	$\frac{L_2}{L}$	0,90	0,79	0,67	0,54	0,46	0,37

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

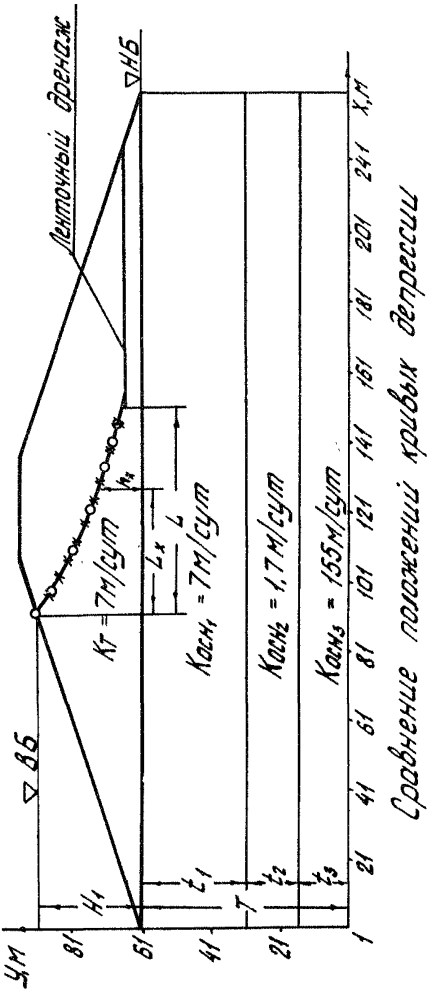
Задачи такого типа были решены с однослойным (рис.8, прил.4), двухслойным (рис.9, прил.5) и трехслойным (рис. 10, прил.6) основаниями. При этом количество слоев может быть более трех, а их геометрия неправильной формы.

Задача "Однородная плотина на однородном основании" (рис.8). Общая толщина основания T = = 0,1H_1; соотношение коэффициентов фильтрации $\frac{K_{осн.}}{K_T}$ = 17,2; исходная информация для решения задачи приведена на бланке (прил.4). Дренаж задан напором. Задача решается за 11 циклов. Положение кривых депрессий приведено в таблице на рис.8. Расход, определенный методом ЭГДА, равен 1070 м^3/сут, по МКЭ 1085 м^3/сут. Расхождение 1,4%.

Задача "Земляная

плотина на двухслойном основании" (рис. 9). Общая толщина основания $T = 0{,}3H_1$, $\frac{t_1}{T} = 0{,}667$, соотношение коэффициентов фильтрац и и $\frac{K_T}{K_{\Phi_1}} = 26{,}6$; $\frac{K_{\Phi_2}}{K_{\Phi_1}} = 10$. Исходная информация для решения задачи приведена на бланке (см. прил.3). Дренаж задан напором. Задача решается за 5 циклов. Положение кривых депрессий, определенных методами ЭГДА и МКЭ, приведено в таблице на рис. 9. Расход через плотину, определенный по методу ЭГДА, равен 57,82 м^3/сут, по МКЭ-57,2 м^3/сут. Расхождение $\leq$ 1,5%.

Задача "Земляная плотина на трехслойном основании" (рис. 10). Общая толщина основания $T = H_1$, $\frac{t_1}{T} = 0{,}5$. $\frac{t_2}{T} = 0{,}25$, соотношение коэффициентов фильтрации $\frac{K_{\Phi_1}}{K_{\Phi_3}} = 0{,}045$, $\frac{K_{\Phi_2}}{K_{\Phi_3}} =$



Сравнение положений кривых депрессии

Метод	$\frac{L_x}{L}$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9
ЭГДА	$\frac{h_x}{H_1}$	0,845	0,685	0,555	0,422	0,346	0,265
МКЭ	$\frac{h_x}{H_1}$	0,90	0,74	0,65	0,43	0,36	0,28

Рис.10. Однородная земляная плотина на трехслойном основании: —o—o— метод ЭГДА; —x—x— метод МКЭ.

= 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 $м^3$/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 ТА-2М плохо работает с большими программами. Значения расходов из результатов счета предпочтительно выбирать для сечений, проходящих через наиболее пологие 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 $м^3$/сут,расход, полученный по программе, равен 138 $м^3$/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) ≤ 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.

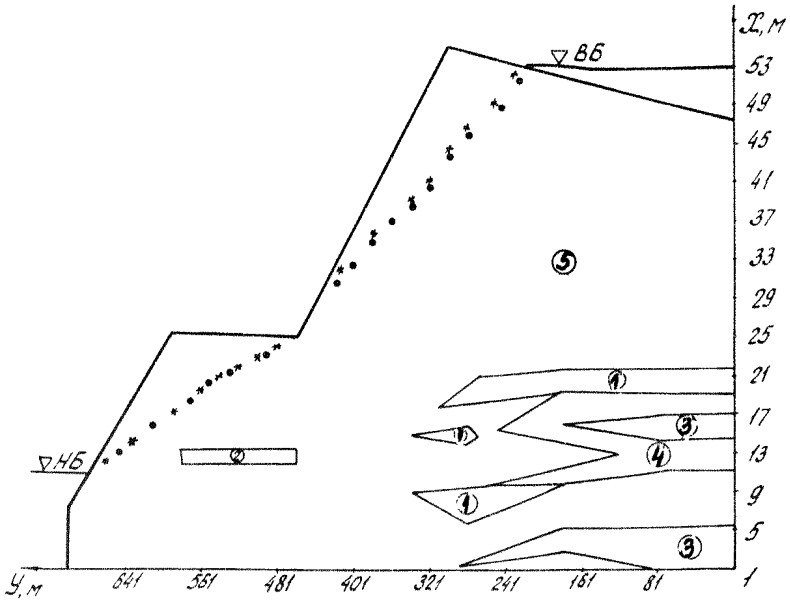


Рис.II. Положение кривой депрессии при ручной и автоматической разбивке в дамбе Качканарского хвостохранилища:

* ручная разбивка; • автоматическая разбивка;
① - $K_ф$ = 0 м/сут; ② - $K_ф$ =0,I м/сут; ③ - $K_ф$=1,9 м/сут;
④ - $K_ф$=I,6 м/сут; ⑤ - $K_ф$=9,3 м/сут; ~~⑥ - $K_ф$=I,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 эмпиричес - кой формулы $t_{цикл} = NK_y/1500$ (мин), где $N = (K_y + I)(K_x + I)$.

В Ы В О Д Ы

I. 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.

Литература

I. 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.113, с.43-47.

Шифр:

Стр. N

Карта N1,2,3,4,5

| | | |

Шифр:

Стр. №

Карта N1,2,3,4,5

01	500
02	590
01	100
02	100
02	240

Ky
Kx
Z
Z1
Ed

Карта N9

01	100
01	100
02	470
02	160
02	160
00	000
02	980
01	100
02	898
01	500
01	500
00	000

Карта N6

01	100
01	100
02	470
02	160
02	713
02	140
02	980
01	100
01	100
01	100

Масив MXYZ

Карта N

Карта N7

00	260
00	260
00	000

Масив MП1

Карта N

Карта N8

02	470
02	160
02	713
02	140
00	000
00	000
02	713
02	140
02	890
01	500
00	000
00	000

Масив ГР

Карта N

Шифр

стр N

Карта N 1,2,4,5,3						Ky	Карта N 9						Массив ГР
			01	500		Kx		-	01	100			
									01	100			
			02	200		Z			02	100			
									01	600			
			01	100		Z1			01	600			
									00	000			
			02	100		Ed		-	02	300			
									01	100			
			02	300					02	300			
									01	100			
									01	100			
									00	000			
Карта N6						Массив MXYZ	Карта N 10						
			01	100				-	02	180			
			01	100					01	200			
			02	100					02	180			
			01	600					01	200			
			02	150					01	200			
			01	600					00	000			
			02	300									
			01	100									
			01	100									
			01	100									
Карта N7						Массив MN1	Карта N						
			01	100									
			01	100									
			00	000									
Карта N8							Карта N						
			02	100									
		-	01	600									
			02	150									
			01	600									
			00	000									
			00	000									
			02	150									
		-	01	600									
			02	300									
			01	100									
			00	000									
			00	000									

Шифр:

стр. N

Карта N1,2,3,4,5

| | | |

Шифр:

стр N

Карта N 1,2,3,4,5								Ky
			02	100				
			02	440				Kx
			01	300				Z
			02	300				Z1
			02	360				Ed

Карта N 9								Массив ГР
			01	264				
			01	264				
			00	000				
			00	264				
			00	264				
			00	000				
			03	700				
			03	700				
			00	000				
			01	700				
			01	700				
			00	000				

Карта N 6								Массив MXYZ
			01	100				
			01	100				
			01	100				
			01	500				
			03	271				
			01	500				
			03	271				
			01	100				
			01	100				
			01	100				
			01	100				
			01	500				

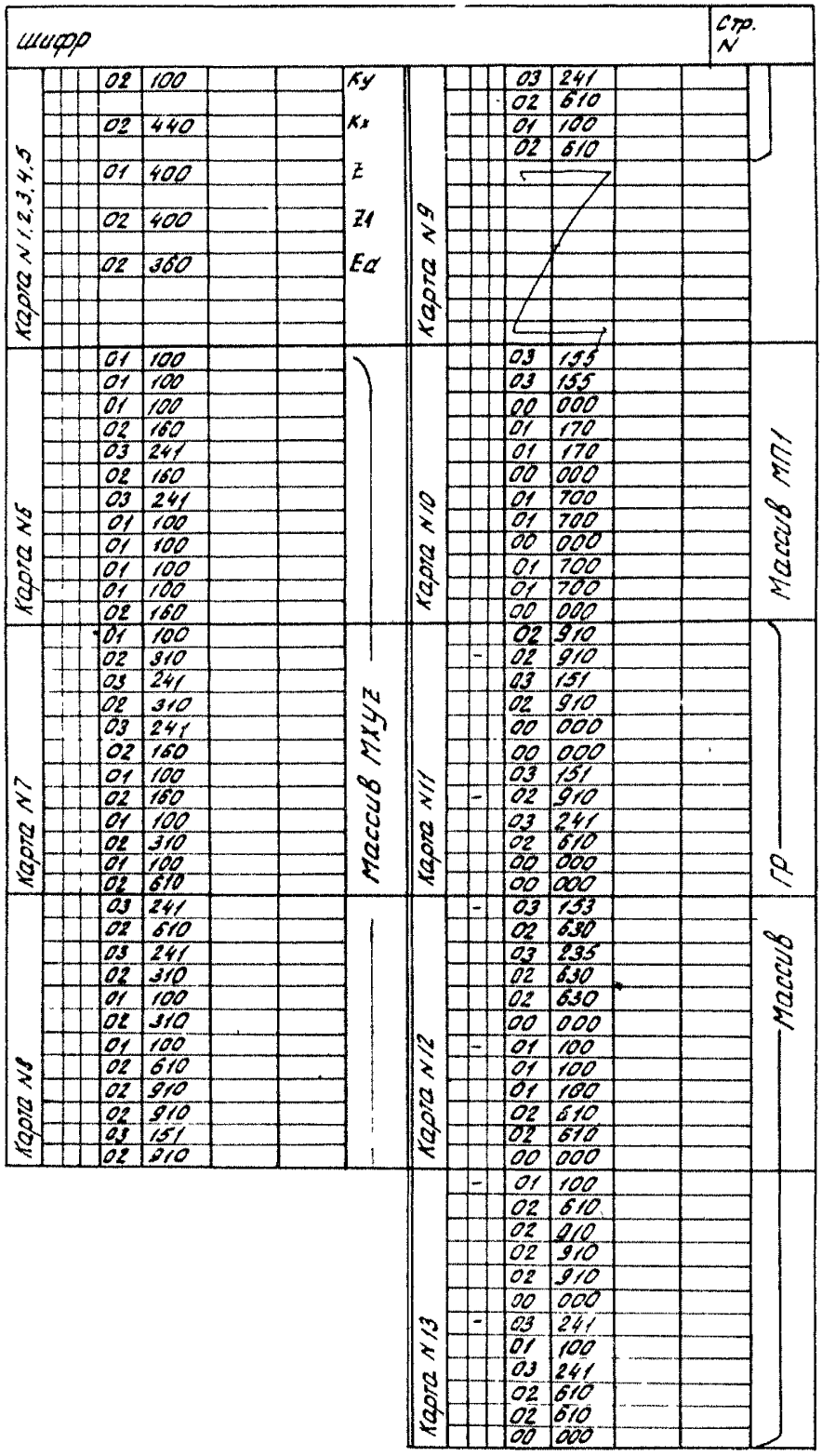
Карта N 10								
			03	121				
	-		02	530				
			03	151				
			02	530				
			00	000				
			00	000				
			03	151				
	-		02	530				
			03	271				
			02	180				
			00	000				
			00	000				

Карта N 7								
			01	100				
			02	130				
			03	271				
			02	130				
			03	271				
			01	500				
			01	100				
			01	500				
			01	100				
			02	130				
			03	121				
			02	530				

Карта N 11								
	-		03	204				
			02	155				
			03	263				
			02	155				
			02	155				
			00	000				

Карта N 8								
			03	151				
			02	530				
			03	271				
			02	130				
			01	100				
			02	130				

Карта N								


Шифр
Стр. N
Карта N 1, 2, 3, 4, 5
02 100 Ку
02 440 Кл
01 400 Е
02 400 Z1
02 360 Ed
Карта N6
01 100
01 100
01 100
02 160
03 241
02 160
03 241
01 100
01 100
01 100
01 100
02 160
Карта N7
01 100
02 310
03 241
02 310
03 241
02 160
01 100
02 160
01 100
02 310
01 100
02 610
Карта N8
03 241
02 610
03 241
02 310
01 100
02 310
01 100
02 610
02 910
02 910
03 151
02 210
Массив МХУ2
Карта N9
03 241
02 610
01 100
02 610
Карта N10
03 155
03 155
00 000
01 170
01 170
00 000
01 700
01 700
00 000
01 700
01 700
00 000
Карта N11
02 910
02 910
03 151
02 910
00 000
00 000
03 151
02 910
03 241
02 610
00 000
00 000
Карта N12
03 153
02 630
03 235
02 630
02 630
00 000
01 100
01 100
01 180
02 610
02 610
00 000
Карта N13
01 100
02 610
02 910
02 910
02 910
00 000
03 241
01 100
03 241
02 610
02 610
00 000
Массив МП1
ГР
Массив

С О Д Е Р Ж А Н И Е

Введение 3

I. Теоретические основы методики 5

2. Алгоритм и описание программы решения задач . . 6

2.I. Блок-схема программы 6
2.2. Подготовка исходной информации 8
2.3. Работа с расчетной областью 9
2.4. Подготовка числовой информации для ЭВМ . . . II

3. Примеры решения плоских профильных задач фильтрации. I3

3.I. Фильтрация через основание бетонной плотины со шпунтом, напорная фильтрация I4
3.2. Фильтрация в земляной плотине с каменно-наброской призмой I4
3.3. Безнапорная фильтрация в земляной плотине с экраном I6
3.4. Фильтрация через земляную плотину с трубчатым дренажем I6
3.5. Фильтрация в земляной плотине с ленточным дренажем I8
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 I,6 уч.-изд.л. Тираж 200 экз. Заказ № 84.
Ротапринт ВИОГЕМ, Белгород, Б.Хмельницкого, 86.
Цена 23 коп.

gost.e-ecolog.ru