

МИНИСТЕРСТВО МЕЛИОРАЦИИ  
И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА СССР

В/О „СОЮЗВОДПРОЕКТ“

ГРУЗИНСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ ГИДРОТЕХНИКИ И МЕЛИОРАЦИИ

(ГрузНИИГим)

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
И АЛГОРИТМЫ РАСЧЁТА  
ОПТИМАЛЬНЫХ  
ПАРАМЕТРОВ ПРИ  
ПОВЕРХНОСТНЫХ  
СПОСОБАХ ПОЛИВА

МОСКВА-1979



МИНИСТЕРСТВО МЕЛИОРАЦИИ  
И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА СССР

В/О „СОЮЗВОДПРОЕКТ“

ГРУЗИНСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ГИДРОТЕХНИКИ И МЕЛИОРАЦИИ  
(ГрузНИИГим)

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
И АЛГОРИТМЫ РАСЧЁТА  
ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
ПРИ ПОВЕРХНОСТНЫХ  
СПОСОБАХ ПОЛИВА

Утверждены начальником В О "Союзводпроект"  
А.М. Воыновым 2 июня 1978 г.



## В В Е Д Е Н И Е

Настоящие Методические указания и алгоритмы для ЭВМ предназначены для проектирования (подбора) оптимальных параметров техники полива в следующих случаях:

полив по бороздам;

полив по полосам;

полив по безуклонной поверхности (затоплением по чекам риса и сопутствующих культур).

Подбор параметров техники полива осуществляется с целью увязки этих параметров с режимом орошения и определения их оптимального сочетания для заданных условий, при котором имеет место наиболее эффективный полив, т.е. наилучшим образом удовлетворяющий предъявляемые к нему требования, а также для выработки агротехнических требований к механизированным способам поверхностных поливов [ I ] .

К числу параметров, влияющих на качество полива и подбираемых оптимальным образом, относятся: поливной расход в борозды и удельный расход на полосы (в чеки), длина борозд и полос (размеры чека), уклон, ширина междурядий и габариты борозд, поливная норма, граничные условия (устройство преграды определенной высоты в конце, полив переменным расходом и др.).



В качестве подбираемых параметров можно рассматривать также водовпитывающие характеристики почвы и шероховатость поверхности, которые можно менять искусственным путем.

Существующие методы расчета и подбора параметров техники полива как отечественные, так и зарубежные основываются на упрощенном рассмотрении явления поверхностного полива и по существу касаются лишь его первой стадии — добегания [2]—[7]. Недостаточная точность и ограниченные возможности этих методов делают их мало пригодными для использования в качестве основы при подборе оптимальных параметров.

В результате анализа обширного материала по полосовому поливу в работе [8] сформулированы цели дальнейших исследований, которые сводятся к необходимости выявления зависимостей фактической поливной нормы от размеров полос, их уклона, водопроницаемости почвогрунта и других факторов.

Сказанное в равной степени относится и к поливу по бороздам и чекам.

В связи с недостаточной теоретической изученностью поверхностных способов полива с позиций неустановившегося движения воды и отсутствием надежного метода определения оптимальных параметров в ГрузНИИГиМе в течение ряда лет проводились теоретические и экспериментальные исследования по данному вопросу.



В результате проведенных исследований разработаны моделирующие алгоритмы, которые для заданного набора входных параметров позволяют достаточно полно воспроизводить на ЭВМ за короткое время реальные поливы по полосам, бороздам и чекам, что, в свою очередь, дает возможность целенаправленного подбора этих параметров для достижения требуемого качества полива.

Основное преимущество теоретической базы разработанных алгоритмов заключается в том, что математическое описание полива здесь является более полным и строгим, что не только повышает точность алгоритмов, но и расширяет их возможности. К числу таких расширенных возможностей (которыми не располагают существующие методы) относятся следующие: полный охват явления полива на всех его стадиях, возможность рассмотрения различных граничных условий (добегание, наличие преграды в конце, полив переменным расходом и др.), учет влияния глубины воды в борозде на отъем расхода вследствие впитывания, учет влияния подпора и стекания воды после прекращения ее подачи на продольную эпюру увлажнения, возможность рассмотрения переменного по длине уклона дна, автоматизация подбора параметров на ЭВМ, возможность стыковки с алгоритмом расчета режимов орошения и др.



Каждый из алгоритмов (полив по бороздам, полосам и чекам) состоит из нескольких блоков, позволяющих в случае выявления лучших решений заменить любой из них. Основными из них являются четыре блока.

Первый блок реализует численный метод решения исходной системы дифференциальных уравнений в частных производных путем использования неявной разностной схемы и метода матричной прогонки.

Второй — осуществляет управление поливом: зануливание расхода после реализации поливной нормы, замену правого граничного условия после добегания, перенос левого граничного условия по мере оголения дна при движении по уклону и др.

Третий — предназначен для автоматической коррекции подбираемых параметров при неудовлетворении обязательных требований к поливу (недобегание, недоувлажнение и др.), после чего счет начинается снова. В настоящем варианте алгоритмов такой автоматической коррекции подвержены лишь два параметра — поливной расход и поливная норма.

Четвертый — предназначен для автоматического изменения какого-либо параметра (после окончания счета для введенного набора параметров) и начала счета для нового набора параметров.



Таким образом, алгоритм предусматривает без останова счета изменение и коррекцию лишь для одной части подбираемых параметров. Другая часть параметров при необходимости изменяется и подбирается методом диалога с ЭВМ.

Алгоритмы оптимизации поверхностных способов полива разработаны и записаны на языке Алгол-60 канд. техн. наук Р.М.Киладзе в Грузинском НИИ гидротехники и мелиорации, на основе чего составлены настоящие Методические указания.

Отладка алгоритмов была осуществлена в Вычислительном центре АН СССР на ЭВМ М-222 с помощью транслятора ТА-2М.

Алгоритмы и программы по моделированию и оптимизации поливов приняты в Госфонд алгоритмов и программ и рекомендованы Минводхозом СССР для внедрения [9] .

При подготовке настоящей редакции Методических указаний были учтены замечания, сделанные специалистами проектных институтов "Кжгипроводхоз", "Волгогипроводхоз", "Средазгипроводхлопок" и В/О "Союзводпроект", а также Техническим советом Московского гидромелиоративного института, за что автор приносит благодарность.

Автор считает своим долгом выразить благодарность также директору ГрузНИИГиМа, академику ВАСХНИЛ Ц.Е.Мирцхулаве за ряд ценных замечаний и помощь в работе.



Методические указания одобрены и рекомендованы для издания Научно-техническим советом В/О "Союзвод-проект" (протокол № II66 от 02.06.78).

Просим все замечания и предложения по методике направлять по адресу: 380030, Тбилиси, просп.И.Чавчавадзе, 60, ГрузНИИГим.



## 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Явление полива и впитывания воды в почву рассматривается как неустановившееся движение воды с отъемом расхода вдоль пути, которое при соответствующих начальных и граничных условиях описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений движения и неразрывности в частных производных [10] .

2. Оптимальными считаются такие параметры техники полива, при которых достигаемое качество полива наилучшим образом соответствует предъявляемым к нему требованиям. Ввиду невозможности одновременного выполнения всех требований степень их выполнимости должна быть обоснована их разной значимостью в каждом конкретном случае.

3. Прогноз качества полива для каждого набора входных параметров осуществляется путем его воспроизведения на ЭВМ с помощью моделирующего полив алгоритма, основанного на численном методе решения соответствующей системы дифференциальных уравнений без каких-либо упрощений [11] .

4. Поиск оптимального набора входных параметров (включая и граничные условия) производится методом последовательных приближений путем анализа достигаемо-



го качества полива при каждом наборе и соответствующей коррекции входных параметров. Эти процедуры имеют форму диалога человека с машиной.

5. Для полива по полосам и чекам без сброса прекращение подачи воды предшествует добеганию. Вода в конце задерживается земляными валиками. При невыполнении этого условия поливная норма автоматически подвергается коррекции.

6. При поливе по полосам удельный поливной расход подбирается автоматически таким образом, чтобы в начальном створе впиталась требуемая поливная норма.

7. Ввиду малой емкости борозд для задержания и накопления воды, а также большей длительности полива по сравнению с поливом по полосам избежать полностью сброса воды в конце борозд практически невозможно.

8. При поливе по бороздам подача воды прекращается лишь после того, как в створе минимального по длине увлажнения впитается требуемая поливная норма  $W_{тр}$ , после чего фиксируется поданная поливная норма  $W_{пог}$ .

9. Об эффективности использования воды при поливе следует судить по коэффициенту полезного действия водоподдачи (техники полива), выраженному отношением  $W_{тр} / W_{пог}$ . Разность между величинами  $W_{пог}$  и  $W_{тр}$  составляет потери воды на сброс в конце, глубинную фильтрацию и испарение.



10. При поливе по чекам ввиду горизонтальности дна начальный створ увлажняется на величину не менее поданной поливной нормы при любом поливном расходе. Максимизация расхода ограничивается допустимыми глубинами и высотой валиков, так как при нулевом уклоне дна большие скорости поливного потока не достигаются.

## 2. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ПОВЕРХНОСТНЫМ СПОСОБАМ ПОЛИВА

С целью получения высоких урожаев и сохранения хорошего качества орошаемых земель к поверхностным способам полива предъявляются следующие требования [12] - [16] :

увлажнение активного слоя почвы по всей длине борозд и полос;

приемлемая равномерность увлажнения по длине;

предотвращение недопустимой ирригационной эрозии;

недопущение потерь воды на глубинную фильтрацию

и сбросы;

соблюдение требований агротехники;

обеспечение необходимой площади суточного полива;

обеспечение высокой производительности труда и

высокого коэффициента землепользования;

увязка параметров техники полива с режимом орошения.



Безусловное и одновременное выполнение всех перечисленных пунктов в реальных условиях труднодостижимо. Поэтому степень выполнимости этих пунктов должна быть обоснована их разной значимостью в каждом конкретном условиях.

Для проверки степени выполнимости перечисленных пунктов при каждом наборе вышеуказанных параметров имеются два метода: пробных полевых опытов и математического моделирования процесса полива на ЭВМ. Ввиду необходимости многократного воспроизведения полива при различных наборах параметров (количество таких наборов может достигнуть нескольких сот) и ряда других трудностей реализация пробных полевых опытов в необходимом объеме весьма затруднительна. Поэтому в настоящей работе предлагается второй путь — имитация процесса полива на ЭВМ, которая дает возможность заменить полевые опыты экспериментами на ЭВМ.

### 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПОЛИВА

Существующие способы математического описания явления поверхностного полива по существу касаются лишь его первой стадии — добегания. Они основываются на уравнении баланса (неразрывности) и уравнениях типа Шези, предполагающих однозначную связь между скоростью потока и соответствующим живым сечением [2] — [6] ,



что справедливо только в условиях установившегося равномерного движения с постоянным вдоль пути расходом. Кроме того, эти способы вообще неприменимы на других стадиях полива (после добега и прекращения подачи воды), а также в случае горизонтального дна (полив по чекам).

### 3.1. Исходные уравнения, начальные и граничные условия

С целью более полного и точного описания процесса полива на всех его стадиях, а также расширения возможностей моделирующего алгоритма явление поверхностного полива по бороздам и полосам рассматривается как неустановившееся движение воды с отъемом расхода вдоль пути и описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений динамики и неразрывности гиперболического типа [11], [17].

В случае полива по бороздам эта система имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} &= gi - g \frac{u^2}{c^2 R} + q \frac{u}{F}; \\ \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial t} + q &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $F$  — живое сечение;

$Q$  — расход;

$u$  — средняя по сечению скорость;

$i$  — уклон дна;

$c$  — коэффициент Шези;



$R$  — гидравлический радиус;

$x$  — расстояние;

$t$  — время;

$H$  — глубина;

$q$  — отъем расхода на единице длины вследствие впитывания и испарения;

$g$  — ускорение силы тяжести.

При поливе по полосам рассматривается единица ширины поливного потока. В этом случае система (I) принимает вид

$$\left. \begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} &= gi - g \frac{u^2}{c^2 H} + q \frac{u}{H}; \\ \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + q &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В качестве искоемых функций рассматриваются  $u$  и  $c$ , где: при поливе по бороздам  $c = \sqrt{qF/B}$ ;  $Q = uF$ , а при поливе по полосам  $c = \sqrt{qH}$ ,  $Q = uH$ .

Задача о движении и впитывании воды при поливе формулируется как смешанная задача Коши с начальным условием  $t = t_0$ ;  $u = u(x)$ ;  $H = H(x)$  и левым граничным условием  $x = 0$ ;  $Q = Q_0(t)$ . Правая граница имеет два вида. На стадии добегания, когда длина поливного потока  $x_n$  меньше длины борозды или полосы, правая граница соответствует фронту волны ( $H = 0$ ) и является подвижной. После добегания ( $x_n = S$ ) правая граница фиксируется и здесь предполагается наличие преграды ( $u_n = 0$ ) высотой  $h$ .



При поливе по бороздам  $h \leq h_0$ , где  $h_0$  — глубина борозды.

При поливе по полосам величина  $h$  принимается равной высоте боковых валиков.

### 3.2. Отъем расхода вследствие впитывания воды в почву

Вследствие известной специфики поливов по бороздам и полосам время впитывания поливной нормы так же, как и расходы воды, подаваемые на единицу ширины поливного фронта, в том и другом случае значительно отличаются между собой. При поливе по полосам время впитывания поливной нормы существенно меньше, а расходы существенно больше аналогичных величин при поливе по бороздам. Поэтому при поливе по полосам для выражения скорости впитывания воды в почву можно пользоваться формулой А.Н.Костякова [12] :

$$K_{\tau} = A \tau^{\lambda} \quad (3)$$

где  $K_{\tau}$  — скорость впитывания в момент времени  $\tau$  ;  
 $A$  и  $\lambda$  — параметры, характеризующие впитывающие свойства почвы;

$\tau$  — время присутствия воды на поверхности почвы.

При поливе по бороздам, когда продолжительность полива может достигать нескольких суток, целесообразно пользоваться формулой А.Н.Костякова с дополнитель-



ным членом, учитывающим установившуюся скорость впитывания  $K$  (3),

$$K_t = K b t^{-\lambda} + K \quad (4)$$

Впитавшийся слой воды за время  $t$  соответственно будет:

при использовании формулы (3):

$$y = \int_0^t K_t dt = \frac{A}{1-\lambda} t^{1-\lambda}; \quad (5)$$

при использовании формулы (4):

$$y = \int_0^t K_t dt = \frac{K b}{1-\lambda} t^{1-\lambda} + K t. \quad (6)$$

Слой воды, впитавшийся за первый час, соответственно будет:

при использовании формулы (5):

$$m = \frac{A}{1-\lambda}; \quad (7)$$

при использовании формулы (6):

$$m = \frac{K b}{1-\lambda} + K. \quad (8)$$

Если величина  $m$  измеряется в метрах, то соответствующая поливная норма  $W$  — м<sup>3</sup>/га, получается путем умножения  $m \cdot 10^4$ .

В рассматриваемых ниже алгоритмах для поверхностных способов полива использована формула (4) как более общая, которая допускает также использование формулы (3), если впитывающие характеристики почвы заданы согласно



этой формуле. Так, например, если заданы величины  $A$  и  $L$  или  $m$  и  $L$ , согласно формулам (3) и (7), а вводить надо в ЭВМ величины  $L$ ,  $K$ , и  $b$ , согласно формуле (4), то следует поступить следующим образом. Величина  $K$  выбирается достаточно малой, но конечной (чтобы ее влияние практически не сказывалось), а величина  $b$  определяется, как  $A/K$ , или же, согласно формуле (7), как  $m(1-L)/K$ .

При поливе по полосам отъем расхода на единицу длины и ширины равен

$$q = K_t + K_{и.с}, \quad (9)$$

где  $K_t$  — определяется по формуле (3);  $K_{и.с}$  — скорость испарения.

При поливе по бороздам скорость впитывания  $K_t$  и скорость испарения  $K_{и.с}$  следует относить к ширине междурядий. Для этого случая на основе обработки обширного экспериментального материала в САНИИРИ получены следующие соотношения [3]:

$$b_\delta = 8\sqrt{1 - (1 - B/a)^3}; \quad (10)$$

$$K_\delta = K\sqrt{1 - (1 - B/a)^3}; \quad (11)$$

$$q_i = a K_t = a K_\delta b_\delta t^{\frac{1}{2}}, a K_\delta, \quad (12)$$

где  $b_\delta$  и  $K_\delta$  — параметры формулы (4), соответствующие впитыванию из борозд;



$b_0$  и  $K$  — аналогичные параметры в условиях одномерного вертикального впитывания (полив по полосам);

$B$  — ширина по урезу воды в борозде, которую можно выразить в функции глубины воды  $H$ ;

$a$  — ширина междурядий;

$q_1$  — отъем расхода вследствие впитывания, приходящегося на единицу длины борозды.

В условиях полива по бороздам формулу (I2) с учетом (I0) и (II) можно записать в виде:

$$q_1 = a k b \left[ 1 - \left( 1 - \frac{B}{a} \right)^3 \right] T^{\frac{1}{2}} + a K \sqrt{1 - \left( 1 - \frac{B}{a} \right)^3}, \quad (\text{I3})$$

где  $T = t - t(x)$ ;

$t$  — время, отсчитываемое с момента подачи расхода;

$t(x)$  — время пробега фронтом поливного потока длины  $x$ .

Полный отъем расхода на единице длины при поливе по бороздам выразится по формуле:

$$q = q_1 + a K_{\text{и.с.}} \quad (\text{I4})$$

Следует заметить, что в рассматриваемых ниже алгоритмах вместо формул (3), (4), (I0), (II) в принципе могут быть использованы также и другие формулы.

Характерной особенностью рассматриваемой задачи является невозможность точного задания начальных условий. Однако, поскольку счет является устойчивым,



точность задания начальных условий влияет несущественно на окончательный результат. Поэтому искомым вектором  $/\frac{u^0}{c^0}/$  на нулевом слое времени задаемся в первом приближении согласно формулам равномерного движения. Так, например, в условиях полива по бороздам эти формулы имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} u_n^0 &= u_o^0 = \frac{Q_o g^2}{4 c_o^2 t g \gamma}; \\ c_n^0 &= c_o^0 = g \left( \frac{n_o Q_o}{\sqrt{t} 4 t g \gamma (3 L n \gamma)^{1/4}} \right)^{0.18} \end{aligned} \right\} \quad (I5)$$

Если через  $x_N$  и  $t$  обозначить координаты кривой добегания, то в качестве начального условия для некоторого заданного значения  $x_N^0$  должно быть также известно соответствующее значение  $t^0$ . Поскольку поиск зависимости  $t(x_N)$  - кривой добегания является одной из целей алгоритма, ясно, что эта зависимость в качестве начального приближения должна быть задана хотя бы приближенно. В качестве первого приближения для  $t(x_N)$  принимаем балансовое уравнение. Это уравнение имеет вид:

при поливе по полосам

$$Q_o t = \bar{\gamma} (H_o + h_o) x_N, \quad (I6)$$

при поливе по бороздам

$$Q_o t = \bar{\gamma} (F_o + h_o a) x_N, \quad (I7)$$

где  $Q_o$  - поливной расход в борозды (при поливе по полосам - на  $I$  м ширины);



$H_0, F_0$  и  $h_0$  — глубина воды, живое сечение и впитавшийся слой воды в начальном створе;

$a$  — ширина междурядий.

К такому виду приводится большинство существующих формул для кривой добегания [2].

Коэффициент  $\xi$  является переменной величиной, зависящей от исходных параметров, и колеблется в пределах 0,6–0,8. Задавшись в качестве первого приближения средним значением  $\xi = 0,7$ , его уточняют для каждого набора исходных параметров методом последовательных приближений на основе численного решения исходных систем дифференциальных уравнений.

### 3.3. Численный метод решения исходных систем дифференциальных уравнений

Для представления производных в конечных разностях использована неявная четырехточечная схема в подвижной криволинейной сетке. Производные по  $x$  аппроксимируем центральной разностью [18].

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial x} &= \frac{c_{n+1}^{k+1} - c_{n-1}^{k+1}}{2\Delta}; \\ \frac{\partial u}{\partial x} &= \frac{u_{n+1}^{k+1} - u_{n-1}^{k+1}}{2\Delta}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Производные по  $t$  вследствие подвижности сетки на стадии добегания аппроксимируем по наклонному направлению с помощью линейной интерполяции в пределах шага сетки



$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{u_n^{k+1} - u_n^k}{\tau} - \frac{u_{n+1}^{k+1} - u_{n+1}^k}{2\Delta} \frac{x_n^{k+1} - x_n^k}{\tau}; \\ \frac{\partial c}{\partial t} &= \frac{c_n^{k+1} - c_n^k}{\tau} - \frac{c_{n+1}^{k+1} - c_{n+1}^k}{2\Delta} \frac{x_n^{k+1} - x_n^k}{\tau}. \end{aligned} \right\} \quad (I9)$$

После дообегания последние члены в (9) автоматически выпадают.

После подстановки (I8) и (I9) в исходную систему дифференциальных уравнений (I) или (2) разностные уравнения приводятся к виду:

$$\left. \begin{aligned} A_n^k \psi_{n-1}^{k+1} + B_n^k \psi_n^{k+1} + C_n^k \psi_{n+1}^{k+1} &= E_n^k; \\ A_0^k \psi_0^{k+1} + B_0^k \psi_1^{k+1} &= E_0^k; \\ B_N^k \psi_{N-1}^{k+1} + C_N^k \psi_N^{k+1} &= E_N^k, \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

где  $\psi^{k+1} / \psi^k$  — искомый вектор;

$A^k, B^k, C^k$  — матрицы из четырех элементов;

$E^k$  — векторы из двух элементов, которые предполагаются известными на  $K$ -м слое времени;

$N$  — максимальный номер точки, постоянный на каждом слое времени и соответствующий правой границе.

Первое уравнение (20) соответствует внутренним точкам ( $n = 1, 2, \dots, N - 1$ ), второе и третье соответственно — левой ( $n = 0$ ) и правой ( $n = N$ ) границам.

Искомый вектор  $\psi^{k+1}$  на каждом слое времени определяется путем решения системы алгебраических уравнений (20) методом матричной прогонки. При пря-



мой прогонке определяются прогоночные коэффициенты

$$\left. \begin{aligned} L_{\frac{1}{2}} &= -B_0^{-1} C_0; & T_{\frac{1}{2}} &= B_0^{-1} E_0; \\ L_{n+\frac{1}{2}} &= -(A_n L_{n-\frac{1}{2}} + B_n)^{-1} C_n; & T_{n+\frac{1}{2}} &= A_n L_{n+\frac{1}{2}} + B_n, \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

где  $L = \begin{vmatrix} \ell_{11} & \ell_{12} \\ \ell_{21} & \ell_{22} \end{vmatrix}$  — матрица,  $T = \begin{vmatrix} T_1 \\ T_2 \end{vmatrix}$  — вектор.

Искомый вектор первоначально определяется на правой границе

$$\psi_N^{K''} = (A_N L_{N-\frac{1}{2}} + B_N)^{-1} (E_N - A_N T_{N-\frac{1}{2}}), \quad (22)$$

затем во внутренних точках и левой границе (обратная прогонка)

$$\psi_n^{K''} = L_{n+\frac{1}{2}} \psi_{n+1}^{K''} + T_{n+\frac{1}{2}} \quad (n = N-1, N-2, \dots, 0), \quad (23)$$

Исследования устойчивости и сходимости использованной разностной схемы для исходных систем дифференциальных уравнений проведены по методу, изложенному в работах [18], [19]. Теоретические исследования показали, что разностная схема является сходящейся со вторым порядком точности по  $x$  и с первым по  $t$ .

Для исследования устойчивости получены уравнения в вариациях для исходных систем и проанализированы собственные значения матрицы перехода. Исследования показали, что разностная схема является устойчивой независимо от шага, если выполняется условие  $g^{\frac{1}{2}} n_0^2 > 8K$ . Это неравенство в условиях поверхностных поливов, как правило, соблюдается. Однако шаг  $\tau$  ограничивается



другими условиями и на этой основе выбирается автоматически. К числу таких ограничений относятся, например, подвижность сетки на стадии добегания, линеаризация разностных уравнений и др.

#### 4. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

##### 4.1. Классификация входных параметров

Исходными данными для начала счета ЭВМ с целью воспроизведения полива и оценки его качества служат параметры, которые вводятся в ЭВМ.

При поливе по бороздам к числу таких входных параметров относятся:  $i$  – уклон дна;  $n_o$  – коэффициент шероховатости;  $Q$  – поливной расход (в л/с при поливе по бороздам и в л/с на 1 м ширины при поливе по полосам и чекам);  $a$  – ширина междурядий, м;  $L, K, b$  – водовпитывающие характеристики почвы;  $tg\gamma$  – тангенс половины угла между откосами борозды;  $S$  – длина борозды (полосы, чека), м;  $W$  – поливная норма, м<sup>3</sup>/га;  $K_{ис}$  – скорость испарения, имеющая размерность параметра  $K$ .

При поливе по полосам и чекам параметры  $a$  и  $tg\gamma$  – вообще отсутствуют.

Перечисленные параметры условно можно разделить на две группы. Первая группа –  $L, K, b, n_o$  отражает физические условия полива и подлежит определению в конкретных условиях.



Ко второй группе можно отнести все остальные параметры, которые влияют на качество полива и должны быть подобраны оптимальным образом. В связи с этим первую группу параметров будем называть физическими, а вторую группу параметров — управляющими.

Следует заметить, что физические параметры в принципе также можно рассматривать в качестве управляющих параметров, меняя их в определенных пределах искусственно, путем механического воздействия на почву (уплотнение, прикатывание в бороздах и др.).

Первыми приближениями управляющих параметров задаемся на основе априорной информации (накопленный опыт, существующие рекомендации и др.) [2] [8]. Далее они определяются оптимальным образом на основе удовлетворения предъявляемых к поливу требований.

Что касается физических параметров, то методику их определения следует рассматривать отдельно.

#### 4.2. Определение физических параметров

Точность определения физических параметров зависит от характера и объема располагаемой информации о почве. В связи с этим можно предположить три основных способа определения этих параметров.



#### 4.2.1. Определение параметров по качественному описанию почвы

Наиболее просто, но в то же время приближенно физические параметры могут быть определены на основе качественного описания почвы и условий полива. Для этой цели можно воспользоваться, например, пятибальной градацией почв, разработанной САНИИРИ для случая полива по бороздам в условиях Средней Азии, которая приводится в табл. I. Эта таблица позволяет по качественному описанию почвы выбрать соответствующие значения параметров  $\lambda$ ,  $K$ ,  $b$  для первых поливов. Эти параметры вводятся в ЭИМ без каких-либо изменений.

При поливе по полосам можно воспользоваться градацией почв по скорости впитывания, разработанной ИЖНИИГиМом [20], которая приводится в табл. 2.

На основе величин, приведенных в графе 2, можно определить параметр  $A$  в формуле (3) следующим образом. Поскольку точность определения параметров по качественному описанию почвы является низкой, можно принять  $\lambda = 0,5$ , а величину  $A$  определить согласно формуле (7).

Параметр  $n_0$  можно выбрать на основе рекомендаций Ижгипроводхоза [21]: при влагозарядке - 0,03, при вегетационном поливе кукурузы - 0,06, при вегетационном поливе пшеницы - 0,08, при поливе по бороздам - 0,06 - 0,07 (эти значения  $n_0$  получены нами на основе



сопоставления полевого опытного материала САНИИРИ [3] с результатами численных экспериментов на ЭВМ по моделирующему полив алгоритму).

Таблица 1

| • Почвы                                                                                   | $\alpha$<br>безразм. | $K$ ,<br>м/ч | $\beta$<br>безразм. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------|---------------------|
| I                                                                                         | 2                    | 3            | 4                   |
| Сильноводопроницаемые - супеси и легкие суглинки, подстилаемые галечником, примерно с I м | 0,333                | 0,015        | 1,45                |
| Повышенной водопроницаемости - легкие мощные суглинки                                     | 0,5                  | 0,008        | 1,85                |
| Среднепроницаемые средние суглинки                                                        | 0,6                  | 0,0045       | 2,55                |
| Пониженной водопроницаемости - тяжелые суглинки                                           | 0,7                  | 0,0025       | 3,5                 |
| Слабопроницаемые - глины и суглинки, подстилаемые непроницаемыми прослойками              | 0,75                 | 0,0015       | 4,7                 |

Таблица 2

| Почвы             | $m$ ,<br>см/ч | Впитавшаяся поливная норма за первый час, $m^3/га$ |
|-------------------|---------------|----------------------------------------------------|
| I                 | 2             | 3                                                  |
| Слабопроницаемые  | менее 9       | менее 900                                          |
| Среднепроницаемые | 9-18          | 900-1800                                           |
| Сильнопроницаемые | более 18      | более 1800                                         |

Примечание.  $m$  - впитавшийся слой воды за первый час.



#### 4.2.2. Определение параметров $\alpha$ , $K$ , $b$ по опытной кривой впитывания

Более точно водовпитывающие характеристики почвы определяются путем специальных опытов — методом заливки горизонтальных площадок, после чего строится опытная кривая впитывания [22].

Проведение таких опытов на отрезках борозд в данном случае не требуется, так как специфика поливов по бороздам учитывается с помощью формулы (13) в самом алгоритме.

Почвенный покров, как правило, характеризуется пространственной неоднородностью водовпитывающих свойств. Поэтому для их изучения следует выполнить ряд измерений с последующей их обработкой статистическими методами. Методика проведения этих опытов и способы их обработки изложены в специальном методическом руководстве [22]. Вопросы изменчивости показателей водно-физических свойств почв и их влияние на результаты расчетов и объем изысканий рассмотрены также в работах [23], [24].

При использовании формулы (4) опыты по впитыванию продолжаются до тех пор, пока скорость впитывания не станет практически постоянной величиной. Эта скорость и принимается равной величине  $K$ .



Для определения параметров  $\alpha$  и  $b$  по опытной кривой впитывания можно предложить два способа. Рассмотрим их на примере применения формулы (4).

Первый способ. По оси абсцисс откладываем время  $\tau$ , ч, а по оси ординат — впитавшийся слой воды  $y$ , м, нарастающим итогом. По опытным точкам строим кривую впитывания.

Интегрирование (4) дает:

$$y = \int_0^{\tau} K_{\tau} dt = \frac{Kb}{1-\alpha} \tau^{1-\alpha} + K\tau \quad (24)$$

Выбираем на опытной кривой впитывания две точки с координатами  $y_1, \tau_1$  и  $y_2, \tau_2$  и пишем систему из двух уравнений:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= \frac{Kb}{1-\alpha} \tau_1^{1-\alpha} + K\tau_1; \\ y_2 &= \frac{Kb}{1-\alpha} \tau_2^{1-\alpha} + K\tau_2 \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Поскольку величина  $K$  предполагается уже известной из опыта, эту систему решаем относительно  $\alpha$  и  $b$ .

Второй способ. Параметры  $\alpha$  и  $b$  определяются из условия наилучшего приближения теоретической кривой впитывания, построенной на основе формулы (24), к опытным точкам. Достигается это путем минимизации средне-квадратического отклонения.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n [y_i - y(\tau_i)]^2}, \quad (26)$$

где  $n$  — количество опытных точек;

$\tau_i, y_i$  — координаты опытных точек;

$y(\tau_i)$  — вычисляются по формуле (24).



Для поиска минимума  $\delta$  имеются различные способы. Наиболее простым и наглядным из них является метод последовательного перебора (с определенным шагом) всевозможных сочетаний параметров  $\alpha$  и  $\beta$  в определенном диапазоне их изменения. За расчетные значения  $\alpha$  и  $\beta$  принимается та пара значений  $\alpha$  и  $\beta$ , которой соответствует минимальное значение  $\delta$ .

Второй способ можно рассматривать также в качестве уточняющего первый способ.

#### 4.2.3. Определение параметра $\beta$ с учетом исходной влажности почвы

В общем случае поливы могут проводиться при различной исходной влажности почвы. Несмотря на то, что эта влажность не может значительно отличаться от той, при которой назначается полив (примерно 0,7 от ППВ), влияние исходной влажности на величину соответствующих параметров все же следует учитывать. Наибольшему влиянию со стороны исходной влажности подвержен параметр  $\beta$ . Что касается параметров  $\alpha$  и  $K$ , то они такому влиянию практически не подвержены [2], [25].

Для определения параметра  $\beta$  в зависимости от исходной влажности почвы наиболее разумно воспользоваться упрощенной формулой С.Ф.Аверьянова для скорости впитывания воды в почву [25]. Если эту формулу при-



вести к виду формулы (4), то для параметра  $\epsilon$  получим следующее выражение:

$$\epsilon = 0,6 \beta \sqrt{\frac{w_1 H_k + 1,4 h_c 1, \beta}{\kappa}}, \quad (27)$$

где

$$\beta = \frac{w_1 - w}{w_1 - w_c} \quad (w_c \leq w \leq w_1);$$

$H_k$  — максимальная высота капиллярного поднятия, м;

$h_c$  — глубина воды на поверхности почвы, м;  $w_1$  — полная влагоемкость;  $w_c$  — минимальная влагоемкость;

$w$  — исходная влажность почвы, выражающаяся в долях от объема почвы.

## 5. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СПОСОБОВ ПОЛИВА НА ЭВМ И ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

### 5.1. Общие сведения о машинной имитации сложных систем

Необходимость изучения сложных систем, которые далеко не всегда поддаются исследованию с помощью аналитических методов, породила новое направление — моделирование систем на ЭВМ (машинную имитацию).

Основное преимущество такого моделирования системы заключается в том, что она может быть воспроизведена на ЭВМ во всей полноте без каких-либо существенных упрощений, а машинная имитация функционирования этой системы дает возможность поиска оптимальных решений в диалоговом режиме [26].



Таким образом, под имитацией понимается численный метод проведения машинных экспериментов с математическими моделями, описывающими поведение сложных систем в течение продолжительных периодов времени [27].

Применение машинной имитации особенно целесообразно, когда другие методы исследования неэффективны или просто непригодны. Такое положение наблюдается, когда модель изучаемого объекта характеризуется рядом особенностей, в числе которых следующие: большое число входных и выходных параметров; много связей между элементами модели; нелинейность; ограничения разных типов; реакции, зависящие от времени.

Следует заметить, что перечисленные признаки в полной мере присущи моделям поверхностных способов полива, что дает основание считать метод машинной имитации практически единственным способом их исследования и оптимизации.

## 5.2. Принципы моделирования поливов на ЭВМ

В основу имитационного моделирования поверхностных способов полива на ЭВМ положен описанный выше численный метод решения краевых задач исходных систем дифференциальных уравнений: (1), (14) – при поливе по бороздам и (2), (9) – при поливе по полосам и чекам. Кроме того, в модели указанных способов полива включе-



ны также различные условия, определяющие протекание процесса в нужном направлении, его окончание и вывод на печать необходимой информации для оценки качества данного полива.

Суть моделирования заключается в воспроизведении реального полива на ЭВМ с получением всех необходимых данных для оценки качества полива за достаточно короткое время, которое в зависимости от марки используемой ЭВМ в десятки и сотни раз меньше времени проведения такого же полива в реальных условиях.

#### 5.2.1. Выбор граничных условий

Вследствие известной специфики поливов по бороздам и полосам расходы воды, подаваемые на единицу ширины поливного фронта, в том и другом случае значительно отличаются между собой.

Если при поливе по полосам с положительным уклоном (включая и нулевые уклоны) максимальные расходы на 1 м ширины поливного фронта могут достигать 20–25 л/с, то при поливе по бороздам они не превышают 1–2 л/с. В результате скорость реализации (вылива) поливной нормы, а также производительность труда при поливе по полосам значительно выше, чем при поливе по бороздам. Поэтому при поливе по полосам время подачи воды, как правило, меньше времени добегаания и тем меньше, чем меньше уклон.



При поливе по бороздам имеем обратную картину — время подачи воды, как правило, больше, чем время добегаия.

Граничные условия задаются следующим образом. На левом конце ( $X=0$ ) задается расход  $Q$  (в общем случае переменный во времени). Правое граничное условие имеем двух видов — на стадии добегаия и после добегаия. На стадии добегаия имеем  $x = x_N$ ,  $H_N = 0$  (где  $x_N$  — переменная длина поливного потока;  $H_N$  — глубина воды на фронте). После добегаия правая граница, в свою очередь, может быть двух видов — с преградой и без нее.

Поскольку при поливе по полосам, согласно основному принципу, прекращение подачи воды должно предшествовать добегаию, подача переменного во времени поливного расхода нецелесообразна. В этом случае левое граничное условие будет иметь вид  $X=0$ ,  $Q = Q_0$  (где  $Q_0$  — постоянный удельный расход, л/с на 1 м ширины).

На правой границе ( $x = S$ ) следует возводить преграду до уровня гребня боковых валиков. Граничное условие здесь будет иметь вид  $x = S$ ,  $u(S)=0$  (где  $u(S)$  — скорость потока в створе преграды).

При поливе по бороздам после добегаия имеет смысл рассматривать возможность подачи переменного (уменьшенного) расхода с целью уменьшения сбросов. Однако ввиду технических трудностей использования сэкономлен-



ной при этом воды вопрос полива переменным расходом пока является спорным. Поэтому в прилагаемых алгоритмах на левой границе предусмотрена подача постоянного расхода, хотя идея подачи переменного расхода в зависимости от уровня воды в конечном створе в этих алгоритмах легко осуществима.

При рассмотрении граничных условий на правом конце следует выделить два варианта полива по бороздам. Первый вариант — полив по проточным бороздам без подпора при отсутствии преграды в конце. На правой границе ( $x = S$ ) должна быть задана связь между глубиной воды и скоростью потока, определяемая из условий сброса. Так, например, при свободном, неподпертом сбросе здесь будет устанавливаться критическая глубина. Возможны и другие условия сброса. Второй вариант — в конце борозд имеется преграда.

Правое граничное условие при поливе с подпором в зависимости от соотношения глубины у преграды  $H_g$  и высоты самой преграды  $h$  будет иметь два различных вида: при  $H_g < h$  будем иметь  $x = S$ ,  $u_n = 0$ ; а при  $H_g > h$  должна быть задана связь между глубиной воды и скоростью потока, определяемая из условия сброса.

Граничные условия при поливе по чекам совпадают с граничными условиями при поливе по полосам. Ввиду горизонтальности дна движение воды здесь происходит лишь



на счет уклона свободной поверхности, и поэтому большие скорости потока, как правило, не достигаются. В связи с этим максимальные удельные расходы здесь уже ограничиваются не условием предотвращения эрозии, а высотой ограждающих валиков.

### 5.2.2. Смена граничных условий в процессе имитации полива на ЭВМ

В связи с необходимостью замены граничных условий в процессе имитации полива на ЭВМ, на каждом слое времени (для каждого  $K$ ) одновременно проверяются два условия:

$$\left. \begin{array}{l} x_n^k \geq S; \\ Q_0 t \geq wS, \end{array} \right\} \quad (28)$$

где

$x_n^k$  — переменная длина поливного потока на стадии добегания;

$S$  — длина борозды (полосы, чека);

$Q$  — расход;

$t$  — время;

$w$  — приходящаяся на единицу длины поливная норма, которая должна быть подана.

В случае полива по бороздам вместо условия (28) проверяется условие



$$W_m \geq W_{rp}, \quad (29)$$

где  $W_m$  — минимальная по длине впитавшаяся поливная норма в данный момент времени;

$W_{rp}$  — требуемая поливная норма, которая должна впитаться в створе минимального по длине увлажнения; этот створ будет конечным в случае полива без подпора и промежуточным в случае полива с подпором.

Выполнение условия (27) обозначает добегание, в связи с чем в силу вступает новое граничное условие, соответствующее наличию или отсутствию преграды на правом конце. При поливе по полосам и чекам высота преграды принимается равной высоте боковых валиков, а при поливе по бороздам в зависимости от конкретных условий она может быть любой величиной, но не более глубины борозды. Так, например, при поливе хлопчатника высоту преграды рекомендуется выбирать такой, чтобы свободная поверхность воды в зоне подпора доходила до отметки, расположенной ниже корневой шейки примерно на 5 см [4].

Выполнение условия (28) обозначает, что предназначенное для увлажнения на длине  $L'$  количество воды уже подано, после чего в силу вступает новое граничное условие на левом конце, соответствующее зануленному расходу. Однако счет каждого варианта полива продолжается до



полного впитывания воды в почву для получения эпюры увлажнения по длине.

Выполнение условия (29) обозначает, что в створе минимального по длине увлажнения впиталась требуемая поливная норма.

После оголения дна в начальном створе (при поливе по бороздам и полосам с уклоном) левая граница переносится в следующую расчетную точку конечно-разностной сетки, а предыдущая точка выпадает и уже больше не просчитывается. По мере оголения дна в каждой новой точке при движении по уклону общее количество просчитываемых точек уменьшается каждый раз на единицу.

Счет каждого варианта полива считается законченным, когда наступит оголение дна по всей длине борозды или полосы.

При поливе по чекам после прекращения подачи воды, ввиду горизонтальности дна, его оголение наступает практически одновременно во всех расчетных точках, т.е. по всей длине чека. В связи с этим счет каждого варианта полива считается законченным, когда наступит оголение дна в начальном створе.

### 5.3. Автоматизация выбора некоторых параметров

На основе соображений, изложенных в предыдущем пункте, нетрудно убедиться, что полная автоматизация подбора оптимальных параметров на ЭВМ не только за-



труднительна, но и не имеет смысла, поскольку степень важности предъявляемых к поливу требований не может быть одинаковой в различных условиях. Однако некоторые из этих требований должны быть выполнены в обязательном порядке (например, увлажнение начального створа на определенную глубину и добегание воды до конечного створа). Поэтому подбор соответствующих параметров, влияющих на выполнимость этих требований, имеет смысл автоматизировать. К числу таких параметров относятся, например, поливной расход и поливная норма, которая должна быть подана.

При поверхностных способах полива следует стремиться выбрать максимальное значение расхода  $Q$ , так как при этом уменьшается время полива единицы площади и растет производительность труда. Однако максимизация расхода при поливах по бороздам и полосам, согласно существующим представлениям, ограничивается максимально допустимой скоростью потока с целью предотвращения эрозии, а при поливе по чекам — максимально допустимой глубиной во избежание перелива воды через оградительные валики.

Между тем, как показали численные эксперименты на ЭВМ, максимизация расхода  $Q$  должна ограничиваться также и по другим соображениям. Так, например, какой-либо достаточно большой расход  $Q_c$ , который однако



еще не является эрозионным, может оказаться неудовлетворительно большим, с точки зрения увлажнения начального створа.

Рассмотрим этот вопрос подробнее для каждого из видов поверхностного полива.

После реализации (вылива) поливной нормы и впитывания воды в почву место имеет балансовое уравнение.

$$Q_0 t(Q_0) = yS, \quad (30)$$

где  $Q_0$  — расход в борозды, л/с, или расход на  $I$  м ширины полосы, л/с;

$y$  — определяется поливной нормой и при поливе по полосам представляет собой количество воды, впитавшееся в почву через единичную площадь, а при поливе по бороздам — количество воды, впитавшееся на единице длины борозды при ширине, равной ширине междурядий  $a$ ;

$S$  — длина борозды (полосы, чека).

Левая часть уравнения (30) выражает поданное количество воды, а правая часть — впитавшееся.

При поливе по полосам и чекам имеем:

$$y = \int_0^{\tau} k_{\tau} dt, \quad (31)$$

где  $k_{\tau}$  — определяется формулой (3).

При поливе по бороздам

$$y = \frac{1}{a} \int_0^{\tau} q dt, \quad (32)$$

где  $q$  — определяется формулой (14).



Время присутствия воды в начальном створе выражается следующей формулой:

$$\tau_o = t(Q_o) + \Delta t, \quad (33)$$

где  $t(Q_o)$  — время подачи расхода;

$\Delta t$  — время присутствия воды или, что то же самое, время стекания воды в начальном створе после прекращения ее подачи.

### 5.3.1. Полив по полосам

При поливе по полосам и чекам увлажнение, согласно формуле (31), зависит от времени присутствия воды на ее поверхности и водовпитывающих свойств почвы, т.е. для данной почвы между  $y$  и  $\tau$  мы имеем однозначную связь.

Для пояснения сказанного рассмотрим полив по полосам с положительным уклоном при различных  $Q_o$ , но при постоянной поливной норме  $W$  и постоянной длине полосы  $L$ , т.е. когда в начальном створе подается одинаковое количество воды.

Совершенно очевидно, что чем меньше будет  $Q_o$ , тем больше будет  $\tau$  и, следовательно  $y_o$ , и наоборот (индекс "о" соответствует начальному створу), поэтому всегда можно подобрать такое значение  $Q_o$ , чтобы в начальном створе впиталась требуемая поливная норма. Этот принцип положен в основу алгоритма автоматическо-



го выбора оптимального значения  $Q_c$  с учетом влияния величины  $\Delta t$  в выражении (33).

Ввиду автоматического выбора значения  $Q_c$  при поливе по полосам с уклоном необходимость ввода этого параметра в ЭВМ отпадает.

Выбранный по такому принципу расход  $Q_c$ , в рамках поиска оптимальных параметров, может оказаться меньше максимально-допустимых расходов на полосы, выбираемых из условия предотвращения эрозии. При необходимости расход можно уменьшить путем уменьшения длины полосы (уменьшение  $S$  согласно уравнению (30) вызывает автоматическое уменьшение  $Q_c$ , поскольку  $t(Q_c)$  остается постоянной).

При поливе по полосам поливная норма, которая должна быть подана, регулируется автоматически на основе удовлетворения принятого принципа — прекращение подачи воды должно предшествовать добеганию [8]. В противном случае поливная норма уменьшается автоматически путем умножения на  $5/6$ , после чего счет начинается снова. Если же добегание вообще отсутствует, поливная норма увеличивается автоматически путем умножения на  $6/5$ , после чего счет начинается снова. Автоматическая коррекция поливной нормы продолжается до тех пор, пока не будут удовлетворены указанные условия.



### 5.3.2. Полив по бороздам

Согласно основной концепции полива по бороздам, подача воды продолжается до тех пор, пока в створе минимального по длине увлажнения не впитается требуемая поливная норма. При отсутствии подпора минимальное увлажнение по длине будет наблюдаться в конечном створе, а при наличии подпора – в некотором промежуточном створе. Поскольку в этом случае полностью исключается возможность недобегания поливного потока до конца борозды, а также недоувлажнения начального створа, то и необходимость в автоматическом выборе расхода или поливной нормы отпадает. Требуемая поливная норма  $W_{тр}$  и расход при поливе по бороздам являются входными параметрами, а поданная поливная норма – выходным параметром. Максимизация расхода ограничивается пропускной способностью борозд и возможностью возникновения эрозии. Что касается требуемой поливной нормы, то она назначается в соответствии с режимом орошения.

### 5.3.3. Полив по чекам

Несмотря на то, что поливная норма, которая должна быть подана, является заданной, автоматизация выбора поливного расхода при поливе по чекам, так же как и при поливе по бороздам со сбросом, нецелесообразна, однако, по другим соображениям.



Ввиду горизонтальности дна продвижение воды здесь происходит только лишь за счет уклона свободной поверхности. После прекращения подачи воды, ее растекание происходит весьма медленно, поэтому после подачи (вылива) заданной поливной нормы растекание воды происходит очень медленно. В результате впитавшаяся в начальном створе поливная норма, как правило, превышает требуемую поливную норму независимо от величины поливного расхода. Поэтому автоматизация подбора расхода для регулирования увлажнения начального створа нецелесообразна.

Максимизация расхода, являющегося входным параметром, ограничивается допустимыми глубинами и в конечном счете — высотой ограждающих земляных валиков.

Автоматическая коррекция поливной нормы (увеличение — в случае недобегания и уменьшение — в случае невыполнения принципа, опережающего выключение расхода) происходит так же, как в случае полива по полосам.

#### 5.4. Критерии оптимальности выбора параметров

Оптимальным считается такой набор параметров, при котором в рамках возможностей данного региона (хозяйства) наилучшим образом удовлетворяются предъявляемые к поливу требования, которые были перечислены в п. 2. Анализ этих требований показывает, что они имеют различную природу и охватывают широкий круг разных вопросов.



Поскольку эти требования практически невозможно свести к одному суммарному критерию, поставленную задачу поиска оптимальных параметров следует рассматривать как многоцелевую (многокритериальную).

Ввиду непреодолимых трудностей решения многокритериальных (векторных) задач оптимизации в основу метода поиска оптимальных параметров полива положена концепция удовлетворения предъявляемых к поливу требований в определенных весах (соотношениях), зависящих от конкретных условий. Причем эти соотношения вследствие большого разнообразия условий при поливах не могут быть установлены заранее. Более того, эти соотношения могут меняться во времени даже для одного и того же хозяйства. В таких условиях ведущим требованием может оказаться, например, увязка параметров техники полива с планируемым режимом орошения, при этом не обращается особого внимания на другие показатели качества полива (равномерность увлажнения, производительность труда и др.).

Вполне понятно, что в этих условиях искать какой-либо стандартной схемы поиска оптимальных параметров, которая была бы пригодна в любых условиях, может быть и не имеет смысла, поскольку степень важности требований к поливу, а следовательно, и набор оптимальных параметров определяется конкретными условиями.



Таким образом, критерий оптимальности (показатель качества) подбираемых параметров зависит от степени важности того или иного пункта (или пунктов) требований к поливу, сформулированных в п. 2.

Следует заметить, что при выборе какого-либо одного пункта требований в качестве основного (в качестве критерия оптимальности) все остальные пункты этих требований будут выступать в качестве ограничений.

Если принять во внимание растущий дефицит водных ресурсов, то в качестве ведущего критерия оптимальности выбранных параметров (элементов техники полива) наиболее целесообразно выбрать коэффициент полезного действия водоподачи на поле, определяемый отношением требуемой поливной нормы к фактически поданной  $W_{тр}/W_{под}$ . Разность между  $W_{под}$  и  $W_{тр}$  составляет суммарные потери воды на глубинную фильтрацию, сброс и испарение.

При максимизации этого критерия в условиях тех ограничений, которые имеются в конкретных условиях (минимум длины, максимум расхода, увязка с режимом орошения и др.), будет достигнуто наиболее экономное использование воды. Другими словами, одним и тем же количеством воды будет полита наибольшая площадь орошаемых земель, что равносильно максимизации валового сбора урожая с этих земель.



## 5.5. Входные параметры и выходные данные

Поскольку параметры, которые подлежат оптимальному подбору, являются входными, а суждение об их оптимальности выносится по выходным данным, рассмотрим входные параметры и выходные данные в той последовательности, в которой они соответственно вводятся в ЭВМ и выводятся на печать.

Входные параметры при поливе по полосам:  $i$  — уклон дна;  $n_o$  — коэффициент шероховатости;  $\alpha, \kappa, \beta$  — параметры, отражающие водовпитывающие свойства почвы (п. 4);  $S$  — длина полосы, м;  $W$  — поливная норма,  $\text{м}^3/\text{га}$ , которая должна быть подана.

Если в процессе счета выясняется, что поливная норма  $W$  при введенном наборе остальных входных параметров не обеспечивает выполнения основного принципа полива по полосам (п. 5.3.1), ее величина автоматически корректируется соответствующим образом и счет начинается снова. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будет выполнен основной принцип полива. Соответствующую поливную норму  $W_p$  будем называть реализованной и рассматривать в качестве выходного параметра.

Удельный расход  $q$  не вводится, так как он подбирается автоматически из условия увлажнения начального створа на величину  $W_p$ , поэтому фигурирует в качестве выходного параметра.



Если водовпитывающие свойства почвы задаются двумя параметрами  $m$  и  $\lambda$ , то методика их ввода через параметры  $\alpha, \kappa, b$  приводится в п. 3.2.

Если эти свойства задаются лишь одним параметром  $m$ , то в качестве второго параметра следует брать  $\lambda = 0,5$ .

Входные параметры при поливе по бороздам:  $i, n_c, Q$  — поливной расход в борозды, л/с;  $a$  — ширина междурядий, м;  $\alpha, \kappa, b, \operatorname{tg} \gamma$  — тангенс половины угла между откосами борозды;  $S$  — длина борозды, м;  $W_{rp}$  — требуемая поливная норма, м<sup>3</sup>/га;  $h$  — высота преграды в конце, м, при поливе с подпором.

Входные параметры при поливе по чекам:  $i, n_c, Q$  — удельный расход на  $I$  м ширины, л/с;  $\alpha, \kappa, b, S$  — длина чека, м, в направлении полива;  $W$  — поливная норма, м<sup>3</sup>/га, которая должна быть подана.

Выходные данные при поливе по полосам. После ввода параметров они сразу же печатаются в виде массива в последовательности, указанной выше. Затем печатается удельный поливной расход  $Q$ , л/с на  $I$  м ширины. Дальнейший счет ЭВМ связан с численным интегрированием исходных систем дифференциальных уравнений, и через некоторое время после реализации (вылива) поливной нормы  $W$  печатается массив из четырех элементов  $x_n, t, Q, W_p$ , где  $x_n$  — длина поливного потока, м, в момент реализации поливной нормы, после чего расход  $Q$  зануливается;



$t$  – соответствующее время, ч;  $Q=0$  – зануленный расход;  $W_p$  – реализованная в ЭВМ (поданная) поливная норма,  $\text{м}^3/\text{га}$ .

Далее (после добегания) печатается массив из двух элементов  $S$  и  $t(S)$ , где  $S$  – реализованная в ЭВМ величина введенного параметра  $S$ , м (длина добегания) и соответствующее время добегания  $t(S)$ , ч.

После впитывания воды на всей длине полосы печатается массив увлажнения по длине  $W$  из  $N+1$  элементов, из которых первый элемент представляет собой впитавшуюся поливную норму в начальном створе  $W_0$ , а последний элемент  $W_g$  – аналогичную величину в конечном створе,  $\text{м}^3/\text{га}$ . Внутренние элементы массива соответствуют увлажнению в промежуточных створах.

В конце печатается массив из четырех элементов  $u_0, H_0, \tau_0, \tau_g$ , где  $u_0$  и  $H_0$  – соответственно средняя по глубине скорость,  $\text{см/с}$ , и глубина,  $\text{см}$ , в начальном створе (эти значения  $u_0$  и  $H_0$  в то же время являются максимальными по длине);  $\tau_0$  и  $\tau_g$  соответственно время присутствия воды в начальном и конечном створах, ч.

#### Выходные данные при поливе по бороздам.

После печати массива введенных параметров печатается массив из двух элементов  $S$  и  $t(S)$ , соответствующий моменту добегания, где  $S$  – реализованная в ЭВМ величина введенного параметра  $S$ , м, и соответствующее время добегания  $t(S)$ , ч.



После того, как в створе минимального увлажнения впитывается требуемая поливная норма  $W_{tr}$ , подача воды прекращается и печатается массив из четырех элементов:  $\delta, t, Q, W_{neg}$ .

После впитывания воды на всей длине борозды печатается массив увлажнения,  $m^3/га$ . Далее печатаются массив из четырех элементов  $u, H_0, \tau, \tilde{\tau}_2$  и в виде отдельных чисел потери на фильтрацию и потери на сброс,  $m^3/га$ .

Выходные данные при поливе по чекам. Эти данные аналогичны выходным данным при поливе по полосам с той лишь разницей, что здесь в последнем массиве из четырех элементов первый элемент выражает максимальную по времени глубину в начальном створе, а второй элемент — максимальную глубину в конечном створе.

### 5.6. Описание алгоритмов

Алгоритмы моделирования и оптимизации поливов по полосам, бороздам и чекам имеют много общего между собой. В то же время между ними имеются и существенные различия.

Поскольку тексты этих алгоритмов прилагаются к настоящей работе (прил. I, 2, 3), а основные принципы их функционирования были изложены в пп. 5.2 и 5.3, ниже приводится лишь краткое описание указанных алгоритмов, необходимое для пользования ими.



Параметры вводятся в ЭВМ на отдельных перфокартах в той последовательности, в которой они перечислены в п. 5.5.

При поливе по полосам и чекам параметры  $a$  и  $tg\gamma$  вообще отсутствуют. При поливе по полосам с уклоном не вводится также параметр  $Q$ , так как он подбирается автоматически на основе принципов, изложенных в п. 5.3. Таким образом, если при поливе по бороздам вводится 10 параметров, то при поливе по чекам вводится 8, а при поливе по полосам — 7 параметров.

Для хранения и печатания этих параметров после ввода выделен массив  $P$ , который включает в себя также еще один параметр  $N$  — количество разностных интервалов, постоянное на каждом слое времени и выбираемое автоматически для всех трех видов полива в зависимости от величины  $S$  самой машиной в связи с численным решением исходных систем дифференциальных уравнений.

После ввода параметров первой печатается выбранная величина  $N$ , а затем следует печатать введенные параметры в той же последовательности, в какой они были введены.

Поскольку размерность некоторых вводимых параметров не соответствует размерности, в которой работает алгоритм, этим параметрам после ввода так же, как и другим величинам, перед их выводом на печать присваиваются соответственно другие значения.



Алгоритм начинается с метки  $BOR$  и кончается печатью массивов  $PN, \alpha A$ , после чего следует автоматическое именование какого-либо параметра и счет нового варианта с метки  $BO$ . При поливе по бороздам и полосам в качестве такого параметра принят продольный уклон дна  $i$ , а при поливе по чекам (нулевой уклон) — длина чека.

Стандартные процедуры, к которым многократно обращается алгоритм с помощью конструкции  $cod (ZBZ...)$ , выделены отдельно и размещены непосредственно после описания массивов и идентификаторов.

После ввода параметров вычисляются постоянные  $LA, LA1, Ag, Ag1$  и др., которые многократно используются в алгоритме.

После просчета нулевого слоя (начальных условий), включающегося в формировании массивов  $u, c, TK$ , счет каждого нового слоя времени начинается с метки  $I6$  и ведется стандартным образом — счет прогоночных коэффициентов в каждой точке по формулам (21) и обратная прогонка по формулам (22), (23). Обращение к этой (самой большой по объему) стандартной процедуре осуществляется с помощью конструкции  $cod (ZBZ LEV, PROG 1)$ . В результате на каждом верхнем слое времени определяются искомые функции  $u_n^{k+1}, c_n^{k+1}$  ( $n = 0, 1, 2, \dots, N$ ).

Выходные данные печатаются в следующей последовательности. После печати параметров следует печать вы-



ранного машиной удельного поливного расхода на полосы (л/с на 1 м ширины). При поливе по бороздам и чекам аналогичная печать отсутствует, так как расход в этом случае фигурирует в качестве входного параметра.

При поливе по бороздам далее следует печать массива  $AL$  из двух элементов. Первый из этих элементов — длина добега, м (с точностью дискретного счета), а второй — время добега, ч.

Затем следует печать массива  $AA$  из четырех элементов. Первый из этих элементов — длина добега в момент реализации поливной нормы, второй — соответствующее время, ч, третий — зануленный расход, четвертый — реализованная поливная норма,  $\text{м}^3/\text{га}$ .

Поскольку счет ведется дискретным образом, реализованные значения длины  $S'$  и поливной нормы  $W'$  совпадают с их введенными значениями лишь с определенной точностью. Однако расхождение между ними, как правило, не превышает 2–3%.

При поливе по полосам и чекам массивы  $AL$  и  $AA$  на основе соображений, изложенных в пп. 5.2 и 5.3, печатаются в обратной последовательности.

В случае недобега независимо от вида полива автоматически увеличивается поливная норма, печатается в  $\text{м}^3/\text{га}$  и счет начинается снова с метки.



Если в момент добегания при поливе по полосам не реализована (не вылита) поливная норма, то она автоматически уменьшается на основе соображений, изложенных в пп. 5.2 и 5.3, печатается в  $\text{м}^3/\text{га}$  и счет начинается снова с метки.

Счет каждого варианта полива независимо от его вида заканчивается печатью массивов  $P\mathcal{N}$  из  $\mathcal{N}+1$  элементов и  $\alpha\mathcal{A}$  из четырех элементов.

Массив  $P\mathcal{N}$  представляет собой впитавшиеся поливные нормы в расчетных, равномерно расположенных по длине отборах,  $\text{м}^3/\text{га}$ . Первый элемент массива соответствует начальному створу, а последний элемент массива — конечному створу, где, как правило, имеется преграда определенной высоты.

Первый элемент массива  $\alpha\mathcal{A}$  при поливе по бороздам и полосам представляет собой скорость,  $\text{см}/\text{с}$ , в начальном створе; второй элемент — глубину,  $\text{см}$ , в начальном створе; третий и четвертый элементы независимо от вида полива выражают время присутствия воды,  $\text{ч}$ , соответственно в начальном и конечном створах. После массива  $\alpha\mathcal{A}$  в случае полива по бороздам печатаются также в виде отдельных чисел потери на фильтрацию и на сброс,  $\text{м}^3/\text{га}$ .

При поливе по чекам первый элемент массива  $\alpha\mathcal{A}$  выражает максимальную (во времени) глубину,  $\text{см}$ , в началь-



ном створе, а второй элемент — максимальную глубину в конечном створе.

Поскольку поиск оптимального набора входных параметров проводится методом последовательных приближений в режиме диалога с ЭВМ, в алгоритме после просчета каждого варианта полива (после печати выходных данных) предусмотрена возможность автоматического ввода нового набора входных параметров.

### 5.7. Примеры расчетов на ЭВМ

Разработанные алгоритмы применимы для любых условий при любых значениях входных параметров, которые могут встретиться в практике проектирования поверхностных способов полива.

Ввиду применения численного метода решения исходных систем дифференциальных уравнений, объем вычислений, выполняемый ЭВМ для воспроизведения хотя бы одного конкретного полива, слишком велик и недоступен для ручного счета. Поэтому проиллюстрировать применение этого метода на каком-либо численном примере без использования ЭВМ практически невозможно. Пример расчета модельного полива и поиска оптимальных параметров может быть выполнен лишь с использованием ЭВМ. Для этого необходимо:

отперфорировать один из прилагаемых алгоритмов, соответствующий поливу по полосам, бороздам или чекам;



выбрать и отперфорировать входные параметры согласно указаниям п. 5.5;

подготовить и включить какой-либо транслятор с АЛГОЛ-60 (ТА1М, ТА2М и др.) и ввести отперфорированную колоду в ЭВМ (трансляция при использовании ЭВМ М-222 занимает 10-12 мин);

получить рабочую программу в виде отперфорированной колоды или в виде записи на ленте;

ввести в ЭВМ рабочую программу вместе с входными параметрами в последовательности, указанной в п. 5.5;

печать выходных данных (результатов) осуществляется в последовательности, указанной в этом же пункте;

время счета одного варианта полива в зависимости от значений входных параметров составляет 5-30 мин, если пользоваться ЭВМ М-220, М-222.

Принципы таких расчетов для случаев полива по полосам, бороздам и чекам сведены в табл. 3-7.

Поскольку полив по полосам, как правило, применяется на почвах с хорошей водовпитывающей способностью, соответствующие характеристики впитывания были выбраны в соответствии с табл. 2 для среднепроницаемых и сильнопроницаемых почв.

При просчете различных вариантов полива по бороздам исходные данные соответствовали почвам Средней Азии. Эти данные были предоставлены нам отделом мелио-



Таблица 3

Вегетационный полив по полосам (входные параметры  
 $\alpha_p = 0,08$ ,  $\alpha = 0,5$ ,  $\omega = 1200$ )

| Входные параметры                                             |              |                            | Результаты счета ЗЕМ, определяющие качество полива |      |      |                         |                      |                               |               |                        |                          |                         |
|---------------------------------------------------------------|--------------|----------------------------|----------------------------------------------------|------|------|-------------------------|----------------------|-------------------------------|---------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|
| слой вы-<br>таившейся<br>воды $m$ ,<br>м, за<br>первый<br>час | уклон<br>$i$ | длина<br>полосы $L$ ,<br>м | расход $Q$ ,<br>л/с, на<br>1 м шири-<br>ны         | 5    | 6    | время, ч                |                      | присутствия воды<br>в створах |               | в начальном створе     |                          | КИ<br>$\frac{w_n}{w_p}$ |
|                                                               |              |                            |                                                    |      |      | добега-<br>ния $t_{дб}$ | подачи<br>воды $t_n$ | началь-<br>ном                | конеч-<br>ном | скорость $u$ ,<br>см/с | глуби-<br>на $H$ ,<br>см |                         |
|                                                               |              |                            |                                                    |      |      |                         |                      |                               |               |                        |                          |                         |
| I                                                             | 2            | 3                          | 4                                                  | 5    | 6    | 7                       | 8                    | 9                             | 10            | 11                     | 12                       |                         |
| 0, II                                                         | 0,0005       | 300                        | 11,6                                               | 1517 | 1,35 | 1,08                    | 1,87                 | 2,25                          | 7,1           | 16,3                   | 0,91                     |                         |
| 0, II                                                         | 0,0005       | 400                        | 12,2                                               | 1805 | 1,86 | 1,64                    | 2,50                 | 2,66                          | 7,3           | 16,7                   | 0,85                     |                         |
| 0, II                                                         | 0,005        | 500                        | 15,9                                               | 1807 | 2,0  | 1,58                    | 2,53                 | 3,95                          | 8,2           | 19,4                   | 0,80                     |                         |
| 0, II                                                         | 0,0025       | 300                        | 7,11                                               | 1504 | 1,82 | 1,76                    | 1,83                 | 1,39                          | 9,2           | 7,7                    | 0,71                     |                         |
| 0, II                                                         | 0,0025       | 400                        | 9,48                                               | 1500 | 1,98 | 1,76                    | 1,92                 | 1,47                          | 9,8           | 8,4                    | 0,70                     |                         |
| 0, II                                                         | 0,0025       | 500                        | 10,3                                               | 1804 | 2,57 | 2,43                    | 2,51                 | 1,74                          | 10,7          | 9,6                    | 0,65                     |                         |
| 0, II                                                         | 0,0045       | 300                        | 8,24                                               | 1251 | 1,38 | 1,26                    | 1,29                 | 1,39                          | 11,6          | 7,1                    | 0,61                     |                         |
| 0, II                                                         | 0,0045       | 500                        | 11,9                                               | 1504 | 1,97 | 1,76                    | 1,79                 | 1,82                          | 13,5          | 8,7                    | 0,58                     |                         |
| 0, II                                                         | 0,0065       | 300                        | 8,24                                               | 1256 | 1,32 | 1,27                    | 1,29                 | 1,81                          | 12,8          | 6,4                    | 0,53                     |                         |
| 0, II                                                         | 0,008        | 200                        | 6,40                                               | 1046 | 0,92 | 0,91                    | 0,91                 | 1,82                          | 12,4          | 5,2                    | 0,57                     |                         |



| I    | 2     | 3   | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11    | 12   |
|------|-------|-----|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
| 0,11 | 0,01  | 200 | 7,47 | 876  | 0,74 | 0,65 | 0,66 | 2,16 | 13,9 | 5,4   | 0,55 |
| 0,15 | 0,001 | 200 | 11,4 | 1501 | 0,82 | 0,73 | 1,03 | 1,11 | 8,6  | 13,20 | 0,91 |
| 0,15 | 0,002 | 300 | 14,3 | 1512 | 1,06 | 0,88 | 1,02 | 0,94 | 11,6 | 12,3  | 0,85 |
| 0,15 | 0,002 | 400 | 21,1 | 1411 | 1,08 | 0,74 | 0,90 | 1,16 | 13,7 | 15,3  | 0,81 |
| 0,15 | 0,004 | 300 | 12,5 | 1511 | 1,15 | 1,01 | 1,04 | 0,96 | 13,3 | 9,3   | 0,65 |
| 0,15 | 0,004 | 400 | 17,7 | 1402 | 1,17 | 0,88 | 0,92 | 1,02 | 15,5 | 11,4  | 0,62 |
| 0,15 | 0,006 | 300 | 12,5 | 1505 | 1,09 | 1,00 | 1,02 | 1,22 | 15,0 | 8,3   | 0,59 |
| 0,15 | 0,008 | 300 | 12,5 | 1508 | 1,04 | 1,00 | 1,02 | 1,52 | 16,3 | 7,6   | 0,54 |
| 0,19 | 0,002 | 200 | 17,8 | 1418 | 0,57 | 0,44 | 0,57 | 0,71 | 12,7 | 13,9  | 0,89 |
| 0,19 | 0,002 | 300 | 21,2 | 1685 | 0,84 | 0,66 | 0,80 | 0,88 | 13,7 | 15,4  | 0,86 |
| 0,19 | 0,004 | 200 | 13,9 | 1416 | 0,68 | 0,56 | 0,60 | 0,59 | 14,0 | 9,9   | 0,72 |
| 0,19 | 0,004 | 300 | 17,7 | 1681 | 0,94 | 0,79 | 0,83 | 0,75 | 15,5 | 11,4  | 0,68 |
| 0,19 | 0,006 | 200 | 13,9 | 1402 | 0,64 | 0,56 | 0,58 | 0,72 | 15,7 | 8,8   | 0,66 |
| 0,19 | 0,008 | 200 | 13,9 | 1404 | 0,62 | 0,56 | 0,57 | 0,84 | 17,1 | 8,1   | 0,61 |



Таблица 4

## Невегетационный полив по полосам

| I    | 2      | 3   | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10    | 11    | 12   |
|------|--------|-----|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|
| 0,11 | 0,0005 | 300 | 13,8 | 1040 | 0,76 | 0,63 | 0,94 | 1,07 | 13,49 | 10,23 | 0,90 |
| 0,11 | 0,0005 | 400 | 14,5 | 1253 | 1,08 | 0,96 | 1,29 | 1,28 | 13,77 | 10,52 | 0,88 |
| 0,11 | 0,0025 | 300 | 9,6  | 1045 | 0,93 | 0,91 | 0,93 | 0,85 | 18,29 | 5,25  | 0,66 |
| 0,11 | 0,0025 | 400 | 12,8 | 1042 | 1,01 | 0,90 | 0,93 | 0,87 | 20,69 | 6,19  | 0,65 |
| 0,11 | 0,0045 | 300 | 11,2 | 869  | 0,70 | 0,64 | 0,65 | 1,02 | 23,11 | 4,85  | 0,61 |
| 0,11 | 0,0065 | 300 | 11,2 | 870  | 0,67 | 0,65 | 0,65 | 1,45 | 25,67 | 4,37  | 0,54 |
| 0,15 | 0,0005 | 200 | 16,5 | 1170 | 0,45 | 0,39 | 0,65 | 0,69 | 14,56 | 11,34 | 0,90 |
| 0,15 | 0,0005 | 300 | 17,3 | 1507 | 0,74 | 0,73 | 1,02 | 1,12 | 14,85 | 11,64 | 0,89 |
| 0,15 | 0,0005 | 400 | 19,8 | 1700 | 0,97 | 0,95 | 1,28 | 1,31 | 15,76 | 12,60 | 0,88 |
| 0,15 | 0,001  | 400 | 20,6 | 1417 | 0,86 | 0,76 | 0,89 | 1,44 | 19,52 | 10,56 | 0,84 |
| 0,15 | 0,001  | 500 | 21   | 1707 | 1,20 | 1,13 | 1,27 | 5,24 | 19,66 | 10,66 | 0,89 |
| 0,15 | 0,002  | 300 | 13,3 | 1404 | 0,88 | 0,88 | 0,92 | 0,75 | 19,72 | 6,74  | 0,75 |
| 0,15 | 0,004  | 300 | 15,6 | 1169 | 0,65 | 0,62 | 0,64 | 0,73 | 25,76 | 6,06  | 0,65 |
| 0,19 | 0,001  | 300 | 24,2 | 1503 | 0,58 | 0,52 | 0,64 | 0,73 | 20,90 | 11,56 | 0,89 |
| 0,19 | 0,001  | 400 | 28   | 1706 | 0,75 | 0,68 | 0,82 | 0,75 | 22,25 | 12,57 | 0,85 |
| 0,19 | 0,002  | 200 | 15,5 | 1251 | 0,49 | 0,45 | 0,49 | 0,45 | 21,05 | 7,35  | 0,81 |
| 0,19 | 0,002  | 300 | 19,6 | 1502 | 0,69 | 0,64 | 0,68 | 0,64 | 23,30 | 8,42  | 0,80 |
| 0,19 | 0,003  | 300 | 19,6 | 1502 | 0,65 | 0,64 | 0,66 | 0,57 | 26,16 | 7,50  | 0,80 |
| 0,19 | 0,004  | 200 | 15,5 | 1252 | 0,45 | 0,45 | 0,46 | 0,47 | 25,66 | 6,03  | 0,69 |



Таблица 5

Поля по бороздам без поворота  
(Входные параметры:  $\beta_0 = 0,07$ ,  $2f = 120^\circ$ ,  $\eta_{ff} = 1,73$ ,  $\lambda = 0,5$ ,  $\kappa = 0,0025$ ,  $l = 14$ )

| Уклон<br>$i$                    | Длина<br>бороз-<br>ды $l$ ,<br>м | Расход $Q$ ,<br>л/с | Ширина<br>между-<br>рядий $a$ ,<br>м | Требуе-<br>мое<br>уши-<br>ренная<br>$w_{нр}$ ,<br>м <sup>3</sup> /га | Результаты счета ЗЕМ, определяющие качество поля |                   |                                                        |                                                  |                                                                         |                   |                        |                                      |                        |                        | в начальном стро-<br>е |       | КПД<br>$\frac{w_1}{w_{нр}}$ |  |  |  |  |  |  |
|---------------------------------|----------------------------------|---------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------|-----------------------------|--|--|--|--|--|--|
|                                 |                                  |                     |                                      |                                                                      | улучшение в стро-<br>ках, м <sup>3</sup> /га     |                   | оброс<br>в ме-<br>жду-<br>рядьях<br>м <sup>3</sup> /га | потери<br>на фаз-<br>зацию<br>м <sup>3</sup> /га | полез-<br>ная по-<br>живая<br>норма<br>$w_{нр}$ ,<br>м <sup>3</sup> /га | время, ч          |                        | присутствие по-<br>вы в строках      |                        | в начальном стро-<br>е | в начальном стро-<br>е |       |                             |  |  |  |  |  |  |
|                                 |                                  |                     |                                      |                                                                      | началь-<br>ная<br>$w_0$                          | конечная<br>$w_1$ |                                                        |                                                  |                                                                         | всего<br>$t_{вс}$ | в строках<br>$t_{стр}$ | в строках<br>началь-<br>ная<br>норма | конеч-<br>ная<br>норма |                        |                        |       |                             |  |  |  |  |  |  |
|                                 |                                  |                     |                                      |                                                                      |                                                  |                   |                                                        |                                                  |                                                                         |                   |                        |                                      |                        |                        |                        |       |                             |  |  |  |  |  |  |
| 1                               | 2                                | 3                   | 4                                    | 5                                                                    | 6                                                | 7                 | 8                                                      | 9                                                | 10                                                                      | 11                | 12                     | 13                                   | 14                     | 15                     | 16                     | 17    |                             |  |  |  |  |  |  |
| 0,0005                          | 200                              | 1,5                 | 0,9                                  | 1440                                                                 | 2965                                             | 1651              | 1032                                                   | 495                                              | 3235                                                                    | 3,35              | 13,76                  | 12,35                                | 10,21                  | 4,03                   | 14,65                  | 0,51  |                             |  |  |  |  |  |  |
| 0,0005                          | 300                              | 1,5                 | 0,9                                  | 1440                                                                 | 3742                                             | 1684              | 623                                                    | 799                                              | 3245                                                                    | 7,19              | 16,22                  | 17,92                                | 12,55                  | 4,03                   | 14,65                  | 0,52  |                             |  |  |  |  |  |  |
| 0,0005                          | 400                              | 1,5                 | 0,9                                  | 1440                                                                 | 4579                                             | 1715              | 426                                                    | 1144                                             | 3455                                                                    | 12,46             | 23,03                  | 24,82                                | 14,75                  | 4,03                   | 14,65                  | 0,50  |                             |  |  |  |  |  |  |
| 0,00175                         | 200                              | 1                   | 0,9                                  | 1020                                                                 | 2076                                             | 1124              | 613                                                    | 371                                              | 2149                                                                    | 3,57              | 10,09                  | 11,06                                | 8,81                   | 5,70                   | 10,06                  | 0,52  |                             |  |  |  |  |  |  |
| 0,00175                         | 300                              | 1                   | 0,9                                  | 1020                                                                 | 2630                                             | 1144              | 363                                                    | 599                                              | 2197                                                                    | 7,37              | 16,16                  | 16,52                                | 10,99                  | 5,70                   | 10,06                  | 0,52  |                             |  |  |  |  |  |  |
| 0,00175                         | 400                              | 1                   | 0,9                                  | 1020                                                                 | 3257                                             | 1162              | 243                                                    | 866                                              | 2323                                                                    | 12,76             | 23,23                  | 23,57                                | 13,21                  | 5,70                   | 10,06                  | 0,51  |                             |  |  |  |  |  |  |
| $\lambda = 0,004, \delta = 5,8$ |                                  |                     |                                      |                                                                      |                                                  |                   |                                                        |                                                  |                                                                         |                   |                        |                                      |                        |                        |                        |       |                             |  |  |  |  |  |  |
| 0,00175                         | 200                              | 1                   | 0,9                                  | 1020                                                                 | 2440                                             | 1139              | 411                                                    | 527                                              | 2109                                                                    | 4,36              | 10,55                  | 10,87                                | 7,71                   | 5,70                   | 10,07                  | 0,54  |                             |  |  |  |  |  |  |
| 0,00175                         | 300                              | 1                   | 0,9                                  | 1020                                                                 | 3297                                             | 1154              | 226                                                    | 902                                              | 2313                                                                    | 9,47              | 17,35                  | 17,67                                | 9,34                   | 5,70                   | 10,07                  | 0,50  |                             |  |  |  |  |  |  |
| 0,005                           | 200                              | 0,5                 | 0,6                                  | 870                                                                  | 2589                                             | 933               | 199                                                    | 697                                              | 1856                                                                    | 6,41              | 12,37                  | 12,42                                | 6,87                   | 6,91                   | 6,46                   | 0,51  |                             |  |  |  |  |  |  |
| 0,005                           | 300                              | 0,5                 | 0,6                                  | 870                                                                  | 3746                                             | 936               | 96                                                     | 1207                                             | 2297                                                                    | 14,72             | 22,58                  | 22,61                                | 9,22                   | 6,91                   | 6,46                   | 0,418 |                             |  |  |  |  |  |  |
| 0,005                           | 400                              | 0,5                 | 0,6                                  | 820                                                                  | 2871                                             | 945               | 191                                                    | 785                                              | 2032                                                                    | 6,13              | 10,01                  | 10,06                                | 4,99                   | 8,35                   | 8,31                   | 0,47  |                             |  |  |  |  |  |  |
| 0,005                           | 200                              | 0,5                 | 0,6                                  | 820                                                                  | 2533                                             | 885               | 180                                                    | 891                                              | 1790                                                                    | 6,41              | 11,93                  | 11,97                                | 6,42                   | 6,91                   | 6,46                   | 0,50  |                             |  |  |  |  |  |  |
| 0,005                           | 300                              | 0,5                 | 0,6                                  | 820                                                                  | 3665                                             | 889               | 89                                                     | 1199                                             | 2199                                                                    | 14,72             | 21,99                  | 22,03                                | 8,64                   | 6,91                   | 6,46                   | 0,41  |                             |  |  |  |  |  |  |
| 0,005                           | 400                              | 0,5                 | 0,6                                  | 820                                                                  | 2125                                             | 926               | 319                                                    | 469                                              | 1760                                                                    | 2,91              | 5,93                   | 5,96                                 | 3,76                   | 8,35                   | 8,31                   | 0,52  |                             |  |  |  |  |  |  |
| 0,04                            | 100                              | 0,2                 | 0,6                                  | 700                                                                  | 1253                                             | 703               | 355                                                    | 244                                              | 1280                                                                    | 2,33              | 10,66                  | 10,67                                | 8,55                   | 11,48                  | 3,17                   | 0,55  |                             |  |  |  |  |  |  |
| 0,01                            | 100                              | 0,2                 | 0,6                                  | 700                                                                  | 1564                                             | 710               | 220                                                    | 361                                              | 1302                                                                    | 3,90              | 10,85                  | 10,86                                | 7,34                   | 6,92                   | 4,08                   | 0,55  |                             |  |  |  |  |  |  |



Таблица 6

Невегетационный полив по чекам. Слабоводопроницаемые почвы

(Входные параметры:  $\eta_c = 0,03$ ;  $\alpha = 0,75$ ;  $K = 0,0015$ ;  $\beta = 4,7$ ;  $w_p = 1200$ )

| Входные парамет-ры  |                                           | Результаты счета, определяющие качество полива          |                                 |               |                |                |                |                               |        |                                                                          |                                    |
|---------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|--------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| длина<br>$L$ ,<br>м | расход $Q$ ,<br>л/с на<br>1 м шири-<br>ны | полив-<br>ная<br>норма<br>$w_p$ ,<br>м <sup>3</sup> /га | увлажнение в стро-<br>ках, м/га |               | добега-<br>ния | время, ч       |                | присутствия воды<br>в строках |        | длина до-<br>бега<br>в момент<br>прекраще-<br>ния пода-<br>чи воды,<br>м | максималь-<br>ная глуби-<br>на, см |
|                     |                                           |                                                         | началь-<br>ном                  | конеч-<br>ном |                | подачи<br>воды | началь-<br>ном | конеч-<br>ном                 |        |                                                                          |                                    |
|                     |                                           |                                                         |                                 |               |                |                |                |                               |        |                                                                          |                                    |
| I                   | 2                                         | 3                                                       | 4                               | 5             | 6              | 7              | 8              | 9                             | 10     | 11                                                                       |                                    |
| 100                 | 0,5                                       | 843                                                     | 923                             | 808           | 5,02           | 4,69           | 21,22          | 16,19                         | 94,85  | 5,9                                                                      |                                    |
| 200                 | 0,5                                       | 833                                                     | 999                             | 736           | 11,47          | 9,25           | 24,69          | 13,23                         | 172,73 | 5,7                                                                      |                                    |
| 300                 | 0,5                                       | 833                                                     | 1054                            | 581           | 19,74          | 13,88          | 27,31          | 7,57                          | 247,16 | 5,4                                                                      |                                    |
| 400                 | 0,5                                       | 1002                                                    | 1281                            | 708           | 26,46          | 22,27          | 38,60          | 12,13                         | 360,96 | 5,2                                                                      |                                    |
| 100                 | I                                         | 1072                                                    | 1124                            | 1053          | 3,44           | 2,98           | 30,72          | 27,28                         | 90,28  | 9,3                                                                      |                                    |
| 200                 | I                                         | 1060                                                    | 1175                            | 1018          | 7,67           | 5,89           | 33,24          | 25,58                         | 167,11 | 9,4                                                                      |                                    |
| 300                 | I                                         | 1043                                                    | 1199                            | 938           | 12,52          | 8,69           | 34,40          | 21,89                         | 241,09 | 9,1                                                                      |                                    |
| 400                 | I                                         | 1048                                                    | 1247                            | 877           | 17,66          | 11,65          | 36,81          | 19,16                         | 317,16 | 8,8                                                                      |                                    |
| 100                 | 2                                         | 1219                                                    | 1262                            | 1213          | 2,48           | 1,69           | 37,59          | 35,10                         | 77,85  | 13,5                                                                     |                                    |
| 200                 | 2                                         | 1229                                                    | 1328                            | 1218          | 5,63           | 3,41           | 40,99          | 35,36                         | 146,41 | 14,1                                                                     |                                    |
| 300                 | 2                                         | 1215                                                    | 1342                            | 1160          | 9,22           | 5,06           | 41,69          | 32,47                         | 212,93 | 14,0                                                                     |                                    |
| 400                 | 2                                         | 1200                                                    | 1356                            | 1098          | 13,01          | 6,67           | 42,45          | 29,44                         | 278,68 | 13,7                                                                     |                                    |



Таблица 7

Вегетационный полив по чекам. Слабоводопроницаемые почвы

(Входные параметры:  $n_c = 0,08$ ;  $\alpha = 0,75$ ;  $\kappa = 0,0015$ ;  $\beta = 4,7$ ;  $w_c = 1500$ )

| I   | 2  | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8     | 9     | 10     | 11   |
|-----|----|------|------|------|------|------|-------|-------|--------|------|
| 300 | 5  | 1535 | 1812 | 1221 | 31,5 | 2,56 | 67,03 | 35,50 | 111,61 | 39,1 |
| 400 | 5  | 1504 | 1838 | 881  | 49,1 | 3,34 | 68,44 | 19,34 | 145,95 | 39,0 |
| 500 | 5  | 1507 | 2165 | 1275 | 51,4 | 5,04 | 86,92 | 35,54 | 197,30 | 43,3 |
| 600 | 5  | 1820 | 2233 | 1038 | 64,3 | 6,06 | 90,83 | 26,53 | 236,55 | 43,3 |
| 700 | 5  | 1822 | 2293 | 650  | 84,3 | 7,08 | 94,29 | 9,95  | 275,78 | 43,2 |
| 300 | 10 | 1520 | 1801 | 1230 | 30,4 | 1,27 | 66,39 | 35,99 | 98,57  | 45,5 |
| 400 | 10 | 1530 | 1865 | 1001 | 45,2 | 1,70 | 69,96 | 24,80 | 129,52 | 46,6 |
| 500 | 10 | 1529 | 1909 | 707  | 66,5 | 2,12 | 72,42 | 5,93  | 160,33 | 47,1 |
| 300 | 20 | 1541 | 1875 | 1356 | 28,1 | 0,64 | 70,51 | 42,42 | 92,63  | 51,6 |
| 400 | 20 | 1542 | 1931 | 1147 | 41,8 | 0,86 | 73,69 | 31,83 | 120,81 | 52,8 |
| 500 | 20 | 1541 | 1975 | 837  | 58,7 | 1,07 | 76,18 | 17,43 | 148,80 | 53,6 |
| 600 | 20 | 1809 | 2279 | 1221 | 58,0 | 1,51 | 93,52 | 35,53 | 183,08 | 60,8 |
| 700 | 20 | 1817 | 2322 | 976  | 72,4 | 1,77 | 95,99 | 23,63 | 212,28 | 61,4 |



ративных исследований проектного института "Средазгипроводхлопок".

Что касается полива по чекам, то он главным образом применяется для тяжелых почв. Поэтому варианты полива были просчитаны для слабопроницаемых почв, а соответствующие параметры были выбраны в соответствии с табл. I. Примеры счета выполнены для случая, когда полив по чекам производится отдельными поливными нормами. Моделирующий алгоритм можно приспособить также и для случая, когда полив по чекам необходимо проводить путем непрерывного затопления.

В каждой из приведенных табл. 3-7 разграничены входные параметры и выходные данные (результаты счета), позволяющие оценить качество или, что то же самое, степень оптимальности данного полива на основе сопоставления полученных результатов счета с предъявляемыми к поливу требованиями, которые были перечислены в п. 2.

Следует заметить, что в приведенных табл. 3-7 увлажнение в отдельных створах определялось по количеству впитавшейся воды в различных створах. На самом деле после полива в течение определенного времени происходит дополнительное перераспределение влаги в почве, которое не может быть учтено в данных алгоритмах. Надо полагать, что переувлажнение, которое может происходить в начальном створе (или же в конечном створе при



наличии преграды), и недоувлажнение в конечном створе (или промежуточных створах при наличии преграды) будет постепенно выравниваться после полива, улучшая тем самым всю длину увлажнения по длине.

Приведенную в табл. 3-7 информацию следует рассматривать всего лишь как результаты машинных имитационных экспериментов полива при различных наборах входных параметров без поиска их оптимального набора.

Методика поиска оптимального набора входных параметров с помощью таких машинных экспериментов рассмотрена ниже.

## 5.8. Поиск оптимальных параметров

В зависимости от конкретных условий критерии оптимальности выбора параметров так же, как и ограничений, могут быть различными. Поэтому для поиска оптимальных параметров целесообразно иметь такой метод, который не будет зависеть от вида критерия и характера имеющихся ограничений. Наиболее подходящими в этом случае являются два метода — диалог с ЭВМ и аппроксимирующие формулы.

### 5.8.1. Метод диалога с ЭВМ и планирование машинных экспериментов

Основной смысл метода диалога с ЭВМ на основе планирования машинных экспериментов заключается в следующем.



Компетентный специалист на основе анализа результатов (выходных данных) машинного эксперимента по поливу при определенном наборе входных параметров за сравнительно короткое время предлагает новый набор входных параметров для следующего эксперимента с целью лучшего удовлетворения предъявляемых к поливу требований или же для максимизации какого-либо определенного критерия оптимальности при наличии тех или иных ограничений. Следует заметить, что анализ результатов каждого эксперимента на ЭВМ и планирование нового эксперимента производится специалистом не только на основе своих знаний, опыта и интуиции, но и с привлечением специальных методов теории планирования эксперимента [28] , [29].

В результате такого диалога проверяется степень соответствия полученного качества данного варианта полива предъявляемым требованиям, на основе чего при необходимости производится коррекция того или иного параметра и начинается счет нового варианта и т.д. Этот процесс подбора параметров продолжается до тех пор, пока не будет найден такой их набор, при котором предъявляемые к поливу требования удовлетворяются в заданных условиях наилучшим образом.

Прежде чем приступить к машинным имитационным экспериментам с целью поиска оптимальных параметров, следует выяснить, какими из входных параметров можно



варьировать (и в каких пределах) с целью наилучшего удовлетворения предъявляемых к поливу требований и какие из них являются фиксированными в условиях рассматриваемой конкретной задачи. Установление количества подбираемых параметров и возможных пределов их варьирования имеет важное значение, так как от этого зависит выбор метода планирования эксперимента.

Основная цель планирования эксперимента заключается в сокращении количества необходимых опытов. В машинном имитационном эксперименте это приводит не только к существенной экономии машинного времени, но и к ускорению решения самой задачи. Однако применение методов планирования эксперимента имеет смысл лишь в том случае, если задача допускает выбор одного критерия оптимальности, а математическая модель протекания процесса заранее не известна.

Из множества путей поиска оптимальных условий в рассматриваемом случае наиболее подходящими являются два метода: первый — метод Бокса-Уилсона, который в литературе получил также название метода крутого восхождения или метода построения поверхности реакции и второй — метод покоординатного восхождения [27] — [29]. Смысл этих методов поясняется ниже.



### Метод крутого восхождения

В зависимости от того, максимизируется или минимизируется критерий оптимальности, этот метод может также называться и методом наискорейшего спуска. В качестве начальной точки процедуры на основе априорной информации берется некоторая точка плана в пространстве варьируемых факторов. На первом шаге строится линейная аппроксимация (аппроксимирующая гиперплоскость) поверхности реакции в окрестности начальной точки в виде полинома первой степени. В случае четырех варьируемых факторов, например,  $Q, i, S, W_{тр}$  при поливе по бороздам со сбросом этот полином будет иметь вид::

$$\frac{W_{тр}}{W_{сбг}} = b_0 + b_1 Q + b_2 i + b_3 S + b_4 W_{тр}, \quad (34)$$

где отношение  $W_{тр} / W_{сбг}$  является критерием полезного использования воды, который следует максимизировать. Заметим, что те входные параметры, которые подлежат варьированию, здесь принято называть факторами. Эксперимент нужен для того, чтобы найти численные значения коэффициентов полинома. Поэтому, чем больше коэффициентов, тем больше экспериментов необходимо провести. В этом отношении наиболее выгодно использование полинома первой степени, так как при одинаковом количестве факторов он содержит минимальное количество коэффициентов.



Для определения коэффициентов полинома (34) методом наименьших квадратов необходимо провести эксперименты, используя симплексные, неполные факторные или ротатабельные планы [27]. По полученным значениям коэффициентов можно судить о характере влияния факторов на отношение  $W_{тр} / W_{псг}$ .

При следующем шаге величина отношения  $W_{тр} / W_{псг}$  исследуется вдоль направления крутого восхождения, определяемого аппроксимирующей гиперплоскостью (34). Экспериментальные точки вдоль этого направления выбираются до тех пор, пока не будет найдена точка, похожая на точку максимума. В окрестности этой точки вновь производится исследование величины отношения  $W_{тр} / W_{псг}$ , в результате чего может быть найдено новое направление крутого восхождения. После нескольких шагов мы попадем в точку, в которой аппроксимирующая гиперплоскость почти горизонтальна и поэтому уже не дает направления крутого восхождения. Здесь может быть два исхода – либо мы попали в точку максимума, либо в окрестности этой точки аппроксимирующая гиперплоскость непригодна для описания реакции (линейная модель неадекватна [28]). Поэтому для более детального исследования окрестности этой точки поверхность реакции следует аппроксимировать полиномом второй степени. Для определения коэффициентов этого полинома можно спланировать эксперименты



путем применения ротатабельных планов второго порядка или неполного факторного плана.

### Метод покоординатного восхождения

В этом методе производится варьирование по одному фактору при фиксированных других. После отыскания максимума по этому фактору он фиксируется на этом уровне и производится варьирование по другому фактору. После окончания варьирования по всем факторам начинается новая серия экспериментов в той же последовательности. Этот процесс заканчивается тогда, как варьирование отдельных факторов уже не приводит к увеличению критерия оптимальности.

### Сравнение рассмотренных методов

Метод покоординатного восхождения по сравнению с методом крутого восхождения имеет два преимущества. Первое — не требуется локального исследования поверхности реакции на промежуточных стадиях процесса. Планы такого исследования, как правило, содержат много точек. Второе преимущество заключается в том, что варьирование одного фактора намного легче, чем всех одновременно. В то же время метод покоординатного восхождения по сравнению с методом крутого восхождения имеет один существенный недостаток — восхождение производится только в направлениях, параллельных осям координат. Поэтому



му в случае узкой области максимума, не параллельной координатным осям, поиск может остановиться далеко от точки максимума. В этом случае окрестность точки подозрительной на максимум надо исследовать методом построения поверхности реакции.

При планировании и проведении экспериментов важное значение имеет правильный выбор интервалов варьирования факторов. Чем больше интервал, тем больше риск проскочить точку максимума, чем меньше этот интервал, тем больше затраты машинного времени. Как видим, выбор интервалов варьирования — задача трудная, поскольку она связана с неформализованным этапом планирования эксперимента.

#### 5.8.2. Аппроксимирующие формулы

Идея использования аппроксимирующих формул для поиска оптимальных параметров заключается в следующем.

На основе просчета множества вариантов полива на ЭВМ в достаточно большом диапазоне изменения входных параметров составляются таблицы, где разграничены входные и выходные данные. Задача заключается в отыскании таких аппроксимирующих формул, которые с достаточной для практики точностью связывали бы входные параметры в принятом диапазоне их изменения с основными выходными данными. К числу таких основных выходных данных относят-



ся, например, фактически поданная поливная норма, коэффициент полезного использования воды, равномерность увлажнения, максимальные скорости и глубины и др.

Наличие таких формул, в зависимости от их точности и диапазона действия, может полностью освободить нас от необходимости планирования и проведения машинных имитационных экспериментов, прибегая к ним лишь в исключительных случаях и в порядке контроля.

Поскольку связи между входными параметрами и выходными данными, как правило, являются нелинейными, непосредственный поиск вида аппроксимирующей формулы по табличным данным затруднителен. Поэтому для построения таких аппроксимирующих формул нами были использованы различные предпосылки.

Несмотря на то, что поливы по полосам, бороздам и чекам представляют собой всего лишь разновидности поверхностного орошения, с точки зрения возможностей их оптимизации, между ними имеются существенные различия. Поэтому перед тем, как приступить к поиску аппроксимирующей формулы, необходимо уяснить, что мы собираемся оптимизировать и между какими величинами следует искать функциональную связь.



## Полив по полосам

Рассмотрим два возможных подхода к оптимизации полива по полосам.

1. Поскольку полив по полосам, согласно основному принципу полива, должен проводиться без сброса (выключение расхода должно предшествовать добеганию) требуемая для увлажнения поливная норма при соблюдении этого принципа будет близка к фактической поливной норме. Если задаться этой поливной нормой, т.е. считать ее фиксированной, то, следуя соображениям, изложенным в п. 5.3, тем самым мы задаемся и удельным расходом, а также и временем водоподачи. В этих условиях, видимо, следует искать оптимальную длину полосы, если фиксирован также и уклон дна, или же искать оптимальный уклон дна, если фиксирована длина полосы. Показателем оптимальности будет равномерность увлажнения по длине, выражаемая отношением минимального увлажнения по длине к максимальному  $W_{\min} / W_{\max}$ . В этом случае, на основе данных машинных экспериментов, следует искать приближенную функциональную связь между показателем оптимальности  $W_{\min} / W_{\max}$  и входными параметрами, которая может быть выражена аппроксимирующей формулой.

2. Анализ результатов большого числа машинных экспериментов по разработанному алгоритму, когда автоматически выполняются обязательные требования к поли-



ву (добегание, отсутствие сброса, увлажнение начального створа и др.) показал, что достаточно хорошее качество полива имеет место при многих, но определенных наборах входных параметров, вследствие чего их можно считать близкими к оптимальному набору. В результате отбора этих данных и их обработки на основе использования уравнения баланса и метода наименьших квадратов получена аппроксимирующая формула, которая с удовлетворительной точностью (расхождение с данными машинных экспериментов не превышает 10%) устанавливает связь между входными и выходными данными. Такие формулы получены как в случае вегетационного ( $n_e = 0,08$ ), так и в случае невегетационного ( $n_e = 0,03$ ) поливов при следующем диапазоне изменения параметров:  $i = 0,0005-0,008$ ;  $S = 200-500$  м;  $m = 0,5-2$  дм,  $n_e = 0,03; 0,08$ ;  $\alpha = 0,4-0,6$ .

Эти формулы имеют вид:

в случае невегетационного полива ( $n_e = 0,03$ ):

$$W = 5,35 \left( \frac{S}{Q} \right)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} \frac{m^{1/\alpha}}{\sqrt{i}} + 165; \quad (35)$$

в случае вегетационного полива ( $n_e = 0,08$ ):

$$W = 6,4 \left( \frac{S}{Q} \right)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} \frac{m^{1/\alpha}}{\sqrt{i}} + 148. \quad (36)$$

Время подачи воды  $t_n$ , ч, определяется путем деления количества поданной воды на удельный поливной расход в расчете на 1 м ширины



$$t_n = \frac{W S 10^{-4}}{36 Q}, \quad (37)$$

где  $W$  – поливная норма, которая должна быть подана,  $\text{м}^3/\text{га}$ ;

$S$  – длина полосы,  $\text{м}$ ;

$Q$  – удельный поливной расход,  $\text{л/с}$  на  $1 \text{ м}$  ширины;

$m = \frac{A}{1-\alpha}$  – слой воды,  $\text{дм}$ , впитавшийся за первый час;

$\alpha$  и  $A$  – отражают впитывающие свойства почвы и представляют собой параметры формулы А.Н.Костякова (3);

$t_n$  – время подачи воды, ч. Методы определения  $\alpha$  и  $A$  были рассмотрены в п. 4.2.

При использовании аппроксимирующих формул (35) и (36) следует помнить, что они связывают входящие в них параметры при удовлетворении обязательных требований к полосовому поливу (отсутствие сброса, обязательное увлажнение начального створа на величину  $w$ , приемлемая равномерность увлажнения по длине). Другими словами, параметры, определенные по формулам (35), (36), обеспечивают выполнение этих обязательных требований.

Методика использования формул (35) и (36) зависит от того, какая задача ставится. Каждая из этих формул может быть использована для определения какого-либо одного параметра, когда все остальные параметры являются заданными. Однако, при выборе или определении величины  $Q$  по формуле (35) или (36), полученное значение следует дополнительно сравнить с критическим (не



вызывающим эрозию) удельным расходом  $Q_{кр}$ . Вопросу определения критических скоростей и расходов посвящена обширная литература. Наиболее подробно и глубоко этот вопрос изучен в работе [13].

На основе накопленного опыта для определения  $Q_{кр}$  можно рекомендовать табл. 8.

Таблица 8

| Продольный<br>уклон<br>полос<br>$i$ | $Q_{кр}, \frac{л}{с/м}$                           |                                                 |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|                                     | для незадернованных<br>полос<br>$n_0 = 0,03-0,04$ | для задернованных<br>полос<br>$n_c = 0,05-0,06$ |
| 0,0005                              | 40-55                                             | 80-100                                          |
| 0,001                               | 25-35                                             | 50-65                                           |
| 0,002                               | 20-25                                             | 35-40                                           |
| 0,003                               | 15-20                                             | 25-30                                           |
| 0,004                               | 10-15                                             | 20-25                                           |
| 0,005                               | 10-15                                             | 20-25                                           |
| 0,0075                              | 5-10                                              | 15-20                                           |
| 0,01                                | 5-10                                              | 10-15                                           |
| 0,015                               | 5-10                                              | 10-15                                           |
| 0,02                                | 5                                                 | 10                                              |

При сравнении выбранного или найденного значения  $Q$  по формулам (35), (36) могут возникнуть два случая: в первом случае  $Q < Q_{кр}$  и во втором —  $Q > Q_{кр}$ .



Первый случай означает, что имеется возможность такого варьирования остальных параметров, которое вызывает увеличение  $Q$ . В частности, имеется резерв для увеличения длины полосы  $S$  и продольного уклона  $i$ .

Второй случай означает, что в обязательном порядке следует изменить параметры таким образом, чтобы выполнялось неравенство  $Q \leq Q_{кр}$ . Для этого следует уменьшить  $S$  или  $i$ .

### Пример расчета

Задано:  $S = 400$  м;  $q = 10$  л/с/м;  $\alpha = 0,5$ ;  $i = 0,002$ ;  $m = 1$  дм/ч.

Поливная норма, которую следует подать, и соответствующее время подачи воды будет:

1) в случае невегетационного полива ( $n_o = 0,03$ ) по формулам (35) и (37):

$$W = 5,35 \frac{400}{10} \frac{1^2}{\sqrt{0,002}} + 165 = 1175 \text{ м}^3/\text{га};$$

$$t_n = \frac{1175 \cdot 400 \cdot 10^{-4}}{3,6 \cdot 10} = 1,3 \text{ з};$$

2) в случае вегетационного полива ( $n_o = 0,08$ ) по формулам (36) и (37):

$$W = 6,4 \frac{400}{100} \frac{1^2}{\sqrt{i}} + 148 = 1360 \text{ м}^3/\text{га};$$

$$t_n = \frac{1360 \cdot 400 \cdot 10^{-4}}{3,6 \cdot 10} = 1,52 \text{ з}.$$

Предельно допустимый (не вызывающий эрозию) удельный расход  $Q_{кр}$ , согласно табл. 3, равен 20 л/с/м. Так, в приведенном примере выбранный расход является вполне удовлетворительным. Кроме того, из этого примера выте-



кает следующий вывод. На длине  $S = 400$  м можно реализовать меньшую поливную норму за счет увеличения  $Q$  или же, оставляя эту поливную норму без изменения, можно увеличить длину полосы  $S$  опять-таки за счет увеличения  $Q$ . Какую из этих возможностей выбрать для оптимизации полива по полосам, зависит от целей, которые поставлены в конкретных условиях. Некоторые из этих целей (отсутствие сброса, обязательное увлажнение начального створа на величину  $W$ , приемлемая равномерность увлажнения по длине) автоматически достигаются при использовании формул (35)–(37).

#### Полив по бороздам

Поскольку ширина междурядий для пропашных культур, как правило, выбирается небольшой (0,6–0,9 м), то и соответствующие размеры поперечных сечений борозд получаются также небольшими [30]–[32]. Вследствие этого емкость борозд для задержания и накопления воды является незначительной, по сравнению с полосами, и поэтому, при необходимости увлажнения почвы на определенную величину, поливать без сброса в конце практически весьма затруднительно [33]–[34]. При малых уклонах целесообразно устраивать подпор путем сооружения преграды определенной высоты  $h$  в конечном створе. Такое повышение глубин в концевых створах увеличивает инфильтрационный расход, в результате чего уменьшается сброс



и выравнивается эпюра увлажнения по длине. Этот эффект тем значительней, чем меньше уклон дна и больше ширина междурядий, когда поперечное сечение борозд также может быть увеличено.

При поливе по бороздам без подпора ставится задача увлажнения конечного створа на определенную величину  $W_s = W_{tr}$ , м<sup>3</sup>/га, с минимальными потерями воды на глубинную фильтрацию и сброс. При этом увлажнение  $W(x)$  в произвольном створе  $x$  будет превосходить величину  $W_s$  и тем больше, чем меньше  $x$ . Наибольшей величины разность  $W(x) - W_s$  достигнет для начального створа ( $x = 0$ ).

При поливе по бороздам с подпором минимальное увлажнение по длине будет иметь место в некотором промежуточном створе, который должен быть увлажнен на определенную величину  $W_{tr}$ .

Потери на глубинную фильтрацию растут с увеличением времени полива и длины борозды. Эти потери определяются как  $\int_0^S (W(x) - W_s) dx$ . Что касается потерь на сброс, то они возрастают с увеличением расхода  $Q$  и уменьшением длины борозды  $S$  и определяются как  $\int_0^t Q(t) dt$ , где  $Q(t)$  — сбросной расход,  $at$  — продолжительность сброса. С увеличением потерь на глубинную фильтрацию, как правило, уменьшаются потери на сброс и наоборот. Поэтому ставится задача отыскания таких оптимальных параметров, при которых суммарные потери воды окажутся



минимальными для заданных условий. В связи с этим аппроксимирующую формулу целесообразно искать в таком виде, чтобы величина  $W_{\text{асд}}$  была выражена как функция входных параметров, где  $W_{\text{асд}}$  — поливная норма в м<sup>3</sup>/га, которая должна быть подана.

Величина отношения  $W_{\text{тр}}/W_{\text{асд}}$ , где  $W_{\text{тр}}$  — требуемая поливная норма, характеризует степень полезного использования воды. Эту величину называют также коэффициентом полезного действия водоподачи (или техники полива). Отношение  $W_{\text{тр}}/W_{\text{асд}}$  на практике всегда меньше единицы и в пределе (с уменьшением потерь воды) стремится к единице. При полном отсутствии потерь воды на фильтрацию и сброс (идеальный случай) это отношение станет равным единице, в результате чего будем иметь равномерное по длине увлажнение почвы. Задача оптимизации в этом случае (при выборе в качестве критерия отношения  $W_{\text{тр}}/W_{\text{асд}}$ ) сводится к выбору такого набора входных параметров (с учетом имеющихся ограничений), при котором величина критерия достигает максимума.

При поиске аппроксимирующей формулы использовано балансовое уравнение

$$Q(t_g + t_s) = W_{\text{асд}} S a, \quad (38)$$

где  $Q$  — поливной расход в борозду;

$t_g$  — время добегания;

$t_s$  — время впитывания требуемой поливной нормы  $W_{\text{тр}}$  в конечном створе;



$W_{\text{пог}}$  — поданная поливная норма

$S$  — длина борозды;

$a$  — ширина междурядий.

Решая уравнение (38) относительно  $W_{\text{пог}}$ , получим

$$W_{\text{пог}} = \frac{Q(t_g + t_s)}{Sa}. \quad (39)$$

Для величин  $t_g$  и  $t_s$  получены приближенные аналитические решения, в которых они выражены как функции входных параметров.

В результате сопоставления выражения (39) с данными машинных экспериментов и обработки этих данных методом наименьших квадратов получена аппроксимирующая формула, которая с удовлетворительной точностью (расхождение с данными машинных экспериментов не превышает 10–15%) устанавливает связь между поданной поливной нормой  $W_{\text{пог}}$  и входными параметрами. Такая формула получена для двух случаев: а) полив без подпора; б) полив с подпором при наличии преграды в конечном створе высотой  $h$ , см, при следующем диапазоне изменения входных параметров  $i = 0,0005–0,04$ ;  $S = 100–500$  м;  $\alpha = 0,33–0,7$ ;  $\kappa = 0,015–0,0015$  м/ч;  $\beta = 1,45–14$ ;  $n_c = 0,07$ ;  $Q = 0,2–1,5$  л/с.

Эта формула имеет вид:

$$W_{\text{пог}} = \frac{100Q}{Sa} \left[ 396 \left( \frac{2,2Si}{(1-\alpha)e} \right)^{1/4} - \frac{56Sh^2 \operatorname{tg} \gamma}{e} + \right. \\ \left. + 432 \left( \frac{\kappa a}{10^5 i} \right)^{1/4} + 670 \right] + \frac{283\kappa}{10^4 \sqrt{\kappa}}, \quad (40)$$



где  $u = \kappa \sqrt{h} \operatorname{tg} \gamma$ ,  $e = 3,6Q - 1,15 \kappa \sqrt{h a \operatorname{tg} \gamma}$ ,

$$H = 0,1 \left( \frac{Q n_0}{\sqrt{i}} \right)^{0,36} \frac{(1 + \operatorname{tg}^2 \gamma)^{0,135}}{(\operatorname{tg} \gamma)^{0,65}}, \quad (41)$$

а) при отсутствии подпора  $x = W_{\text{тр}}$ ,

б) при наличии подпора

$$x = W_{\text{тр}} - \frac{g \delta + b_l W_{\text{тр}} S / i}{b_l S + W_{\text{тр}}}, \quad (42)$$

где

$$g = \frac{(10^5 \kappa \sqrt{h} (\operatorname{tg} \gamma)^2)}{2,4 a}, \quad b_l = \frac{0,79 a g}{10^6 Q \sqrt{\kappa}},$$

$$\delta = 5,35 \left( \frac{u}{1-2} \right)^{1/2} \left( \left( \frac{S}{1} \right)^{1/2} - \left( \frac{M}{D} \right)^{1/2} \right) - 0,27 H \left( \frac{S}{1} - \frac{M}{D} \right),$$

$$\Gamma = 3,6Q - \Phi S, \quad M = S - h/i, \quad D = 3,6Q - \Phi M, \quad \Phi = 1,45 \kappa \sqrt{h a}.$$

Входящие в эти формулы параметры имеют следующую размерность (безразмерные параметры не перечисляются):

$Q$  — расход, л/с;

$a$  — ширина междурядий, м;

$\kappa$  — установившаяся скорость впитывания, м/ч;

$S$  — длина борозды, м;

$W_{\text{тр}}$  — требуемая поливная норма, м<sup>3</sup>/га (увлажнение на меньшую величину недопустимо);

$W_{\text{пог}}$  — поливная норма, м<sup>3</sup>/га, которая должна быть подана, чтобы минимальное по длине увлажнение было равным  $W_{\text{тр}}$ ;

$h$  — высота преграды в конце, м (при поливе с подпором).

При отсутствии подпора формула (42) вообще не считается. Для борозд  $n_0 = 0,06-0,07$ .



Основное достоинство аппроксимирующей формулы (40) заключается в том, что она позволяет проводить численные эксперименты по подбору оптимальных параметров с меньшими затратами времени и средств по сравнению с реализацией разработанного алгоритма на ЭВМ с транслятором "Алгол-60" (прил. 2). Эти численные эксперименты можно проводить не только на ЭВМ любой марки, но и с помощью ручного счета.

Основная цель таких численных экспериментов, независимо от того, используются аппроксимирующие формулы или моделирующие алгоритмы, заключается в том, чтобы подобрать входные параметры (все или несколько) таким образом, чтобы перечисленные в п. 2 требования к поливу были удовлетворены наилучшим образом. В качестве одного из основных критериев при этом можно принять КПД водоподачи, выражаемый отношением  $W_{гр} / W_{псд}$ , который следует максимизировать. Однако, как было выявлено из анализа результатов численных экспериментов, оптимизация по этому критерию все еще оставляет некоторую свободу варьирования параметров, которую можно использовать для удовлетворения других требований, предъявляемых к поливу (см. п. 2). Такая свобода некоторого варьирования параметров создается двумя обстоятельствами.



Первое обстоятельство заключается в том, что одному и тому же максимальному значению критерия могут соответствовать различные наборы входных параметров, т.е. решение не является единственным. Поставленная таким образом задача определения оптимального набора параметров, как и большинство других обратных задач, встречающихся на практике, не является корректной. Для ее решения (выделения одного решения из множества решений), как правило, привлекается дополнительная информация [35]. В качестве такой информации, помимо принятого критерия оптимальности, можно использовать другие дополнительные требования к поливу, которые перечислены в п. 2. Таким образом, из множества наборов входных параметров, при которых достигается практически один и тот же максимум критерия оптимальности должен быть выделен тот, который наилучшим образом удовлетворяет остальным требованиям, предъявляемым к поливу.

Второе обстоятельство связано с неизбежными ошибками в исходных данных и незначительным изменением критерия оптимальности в окрестности своего максимума при варьировании некоторых параметров.

Вообще говоря, оптимальным следует считать такой набор входных параметров, при котором критерий оптимальности достигнет своего наибольшего значения. Однако на самом деле найденный оптимальный набор, ввиду приближен-



ности исходных данных, будет в такой же степени приближенным. Поэтому в практике проектирования, когда исходные данные содержат неизбежные ошибки, целесообразнее рассматривать не единственный набор параметров, а целое множество таких наборов, соответствующих не только максимальному значению критерия оптимальности, но и близким к нему значениям, тем более когда значение критерия в окрестности своего максимума меняется незначительно.

Проиллюстрируем применение аппроксимирующей формулы (40) на примерах, которые были выполнены в ГрузНИИГиме для проектного института "Средазгипроводхлопок". Отделом мелиоративных исследований этого института была поставлена следующая задача. Для исходных данных, приведенных в графах I-7 табл. 9, определить оптимальные расходы и соответствующие поливные нормы, при которых отношение  $W_{гр} / W_{пог}$  будет иметь максимальное значение.

Формула (40) была записана в режиме автопрограммирования малой ЭВМ "Наири-2" с автоматическим изменением шага по какому-либо одному параметру и печатью соответствующих результатов. Приведенный текст этой формулы с примерами счета на ЭВМ "Наири-2", соответствует случаю полива по бороздам с подпором при наличии преграды в конце высотой  $h = 0,08$  м, когда варьируемым параметром является  $Q$ .



Таблица 9

Полив по бороздам с подпором,  $h = 0,08$  м

| $i$     | $a$ ,<br>м | $\alpha$ | $\kappa$ ,<br>м/ч | $b$ | $S$ ,<br>м | $W_{np}$ ,<br>м <sup>3</sup> /га | $Q$ ,<br>л/с | $W_{ог}$ ,<br>м <sup>3</sup> /га | $W_{np}/W_{ог}$ ,<br>КПД | $S$ ,<br>м | $W_{ог}$ ,<br>м <sup>3</sup> /га | $W_{np}/W_{ог}$ ,<br>КПД |
|---------|------------|----------|-------------------|-----|------------|----------------------------------|--------------|----------------------------------|--------------------------|------------|----------------------------------|--------------------------|
| I       | 2          | 3        | 4                 | 5   | 6          | 7                                | 8            | 9                                | 10                       | 11         | 12                               | 13                       |
| 0,0005  | 0,9        | 0,5      | 0,0025            | 14  | 300        | 1680                             | 0,8          | 2043                             | 0,822                    | 200        | 1929                             | 0,870                    |
| -       | -          | -        | -                 | -   | 400        | -                                | 0,9          | 2038                             | 0,823                    | 220        | 1917                             | 0,876                    |
| -       | -          | -        | -                 | -   | 500        | -                                | 1,0          | 2043                             | 0,822                    | 240        | 1925                             | 0,872                    |
| 0,00175 | -          | -        | -                 | -   | 240        | 1200                             | 1,4          | 2312                             | 0,726                    | 240        | 2138                             | 0,785                    |
| -       | -          | -        | -                 | -   | 300        | -                                | 1,5          | 2309                             | 0,727                    | 280        | 2116                             | 0,793                    |
| -       | -          | -        | -                 | -   | 400        | -                                | 1,7          | 2311                             | 0,726                    | 320        | 2146                             | 0,782                    |
| 0,005   | 0,6        | -        | 0,004             | 9,8 | 240        | 960                              | 2,0          | 2564                             | 0,654                    | 300        | 2380                             | 0,705                    |
| -       | -          | -        | -                 | -   | 300        | -                                | 2,3          | 2552                             | 0,658                    | 340        | 2355                             | 0,713                    |
| -       | -          | -        | -                 | -   | 400        | -                                | 2,6          | 2553                             | 0,657                    | 380        | 2368                             | 0,709                    |
| -       | -          | -        | -                 | -   | 500        | -                                | 3,4          | 1894                             | 0,633                    | 140        | 1889                             | 0,635                    |
| 0,005   | 0,6        | -        | 0,004             | 9,8 | 240        | 960                              | 4,5          | 1875                             | 0,639                    | 180        | 1816                             | 0,660                    |
| -       | -          | -        | -                 | -   | 300        | -                                | 5,7          | 1892                             | 0,634                    | 220        | 1839                             | 0,652                    |
| -       | -          | -        | -                 | -   | 400        | -                                | 7,7          | 1989                             | 0,603                    | 200        | 1970                             | 0,608                    |
| -       | -          | -        | -                 | -   | 500        | -                                | 8,0          | 1982                             | 0,605                    | 240        | 1937                             | 0,619                    |
| 0,005   | 0,6        | -        | 0,004             | 9,8 | 240        | 960                              | 10,7         | 1989                             | 0,603                    | 300        | 1982                             | 0,605                    |
| -       | -          | -        | -                 | -   | 300        | -                                | 10,8         | 1952                             | 0,491                    | 160        | 1895                             | 0,506                    |
| -       | -          | -        | -                 | -   | 400        | -                                | 10,8         | 1949                             | 0,492                    | 180        | 1876                             | 0,511                    |
| -       | -          | -        | -                 | -   | 500        | -                                | 10,9         | 1973                             | 0,486                    | 220        | 1908                             | 0,503                    |
| 0,01    | -          | -        | -                 | -   | 150        | 800                              | 13,3         | 2117                             | 0,453                    | 180        | 2076                             | 0,462                    |
| 0,04    | -          | -        | -                 | -   | 100        | -                                | 13,3         | 2098                             | 0,457                    | 220        | 2019                             | 0,475                    |
| -       | -          | -        | -                 | -   | 100        | -                                | 13,3         | 2107                             | 0,455                    | 260        | 2035                             | 0,471                    |
| -       | -          | -        | -                 | -   | 100        | -                                | 13,3         | 1560                             | 0,512                    | 100        | 1494                             | 0,535                    |
| -       | -          | -        | -                 | -   | 100        | -                                | 13,3         | 1501                             | 0,532                    | 120        | 1464                             | 0,546                    |
| -       | -          | -        | -                 | -   | 100        | -                                | 13,3         | 1517                             | 0,527                    | 180        | 1602                             | 0,500                    |
| -       | -          | -        | -                 | -   | 100        | -                                | 13,3         | 1473                             | 0,542                    | 90         | 1478                             | 0,540                    |
| -       | -          | -        | -                 | -   | 100        | -                                | 13,3         | 1456                             | 0,550                    | 110        | 1454                             | 0,549                    |
| -       | -          | -        | -                 | -   | 100        | -                                | 13,3         | 1462                             | 0,547                    | 150        | 1589                             | 0,503                    |



Текст формулы (40) для ЭВМ "Напри-2"

(полив по бороздам с подпором,  $h = 0,08$  м)

- 1) Введем  $u$  р а л в с  $m$ ;
- 2) допустим  $u = 0,0005$ ,  $p = 0,5$ ,  $a = 0,9$ ,  $л = 0,0025$ ,  
 $в = 14$ ,  $с = 300$ ,  $m = 1680$ ;
- 3) печатаем с 5 знаками  $u$  р а л ;
- 4) печатаем с 2 знаками  $В$  с  $m$ ;
- 5) вычислим  $p = p + 0,1$ ;
- 6) вычислим  $m = 0,085I (\exp(0,364(\ln((p \times 0,07)/\sqrt{u}))))$ ;
- 7) вычислим  $ш = 1,73 \times н \times л \times В$ ;
- 8) вычислим  $\phi = 1,45 \times л \times \sqrt{н \times а}$ ;
- 9) вычислим  $e = 3,6 \times p - 1,1 \times с \times л \times \sqrt{н \times а \times 1,73}$ ;
- 10) вычислим  $m = c - 0,08/u$ ;
- 11) вычислим  $\Gamma = 3,6 \times p - \phi \times с$ ;
- 12) вычислим  $о = 3,6 \times p - \phi \times m$ ;
- 13) вычислим  $\delta = 5,35 \times ((л \times В \times н \times 1,73)/0,5^2 \times (с^2/\Gamma^2 - m^2/о^2) -$   
 $0,27 \times н \times (с/\Gamma - m/о))$ ;
- 14) вычислим  $g = (10^5 \times л \times В \times н \times 1,73)^2 / 2,4 \times а^2$ ;
- 15) вычислим  $н = (0,79 \times а \times g) / (10^6 \times p \times \sqrt{л})$ ;
- 16) вычислим  $х = m - (g \times \delta + н \times m \times 0,08/\sqrt{с}) / (н \times с + m)$ ;
- 17) вычислим  $y = ((100 \times p)/(с \times а)) \times (396 \times ((2,2 \times с \times ш)/0,5 \times e)^2 +$   
 $+ 432 \times ((а \times а)/(10^5 \times ш))^2 + 670 - (56 \times с \times н^2 \times 1,73)/e) +$   
 $+ (283 \times а)/(10^4 \times \sqrt{л})$ ;
- 18) вычислим  $u = m/y$ ;
- 19) печатаем с 3 знаками  $р у u$ ;
- 20) идти к 5;
- 21) кончаем  
исполним 2.



# Примеры счета на ЭВМ "Наири-2"

|               |                |               |               |
|---------------|----------------|---------------|---------------|
| $u = 0,00049$ | $p = 0,50000$  | $a = 0,89999$ | $л = 0,00250$ |
| $B = 14,00$   | $c = 300,00$   | $m = 1680,00$ |               |
| $p = 0,600$   | $y = 2101,275$ | $u = 0,799$   |               |
| $p = 0,700$   | $y = 2060,853$ | $u = 0,815$   |               |
| $p = 0,800$   | $y = 2043,094$ | $u = 0,822$   |               |
| $p = 0,900$   | $y = 2038,869$ | $u = 0,823$   |               |
| $p = 1,000$   | $y = 2043,317$ | $u = 0,822$   |               |
| $p = 1,099$   | $y = 2053,620$ | $u = 0,818$   |               |
| $p = 1,199$   | $y = 2068,038$ | $u = 0,812$   |               |
| $p = 1,299$   | $y = 2085,441$ | $u = 0,805$   |               |

2 допустим  $c = 400$   $p = 1$

исполним 2

|               |                |               |               |
|---------------|----------------|---------------|---------------|
| $u = 0,00049$ | $p = 1,00000$  | $a = 0,89999$ | $л = 0,00250$ |
| $B = 14,00$   | $c = 400,00$   | $m = 1680,00$ |               |
| $p = 1,099$   | $y = 2353,747$ | $u = 0,713$   |               |
| $p = 1,199$   | $y = 2333,441$ | $u = 0,719$   |               |
| $p = 1,299$   | $y = 2320,348$ | $u = 0,724$   |               |
| $p = 1,399$   | $y = 2312,689$ | $u = 0,726$   |               |
| $p = 1,499$   | $y = 2309,227$ | $u = 0,727$   |               |
| $p = 1,599$   | $y = 2309,073$ | $u = 0,727$   |               |
| $p = 1,699$   | $y = 2311,571$ | $u = 0,726$   |               |
| $p = 1,799$   | $y = 2316,230$ | $u = 0,725$   |               |
| $p = 1,899$   | $y = 2322,669$ | $u = 0,723$   |               |
| $p = 1,999$   | $y = 2330,595$ | $u = 0,720$   |               |

2 допустим  $c = 500$   $p = 1,8$

исполним 2

|               |                |               |               |
|---------------|----------------|---------------|---------------|
| $u = 0,00049$ | $p = 1,79999$  | $a = 0,89999$ | $л = 0,00250$ |
| $B = 14,00$   | $c = 500,00$   | $m = 1680,00$ |               |
| $p = 1,899$   | $y = 2573,301$ | $u = 0,652$   |               |
| $p = 1,999$   | $y = 2564,938$ | $u = 0,654$   |               |
| $p = 2,099$   | $y = 2558,899$ | $u = 0,656$   |               |
| $p = 2,199$   | $y = 2554,842$ | $u = 0,657$   |               |
| $p = 2,299$   | $y = 2552,488$ | $u = 0,658$   |               |
| $p = 2,399$   | $y = 2551,611$ | $u = 0,658$   |               |
| $p = 2,499$   | $y = 2552,022$ | $u = 0,658$   |               |
| $p = 2,599$   | $y = 2553,564$ | $u = 0,657$   |               |
| $p = 2,699$   | $y = 2556,105$ | $u = 0,657$   |               |
| $p = 2,799$   | $y = 2559,532$ | $u = 0,656$   |               |
| $p = 2,899$   | $y = 2563,749$ | $u = 0,655$   |               |



При отсутствии преграды (полив без подпора) оператор I6 примет вид  $\alpha = m$ , а надобность в операторах 8–I5 вообще отпадает.

Для входных параметров были использованы следующие обозначения (идентификаторы):  $i = u$ ,  $Q = p$ ,  $a = a$ ,  $k = l$ ,  $B = B$ ,  $S = c$ ,  $W_{гр} = m$ , остальные входные параметры не менялись и им были присвоены постоянные значения:  $n_0 = 0,07$ ;  $\alpha = 0,5$ ;  $h = 0,08\text{м}$ ;  $\text{tg } \gamma = 1,73$ . Это значение  $\gamma$  соответствует случаю, когда угол между откосами борозд  $2\gamma$  равен  $120^\circ$ .

Остальные обозначения промежуточных результатов для ЭВМ "Наири-2" совпадают с принятыми для формулы (40).

Приведенные примеры соответствуют первым трем строкам входных параметров табл. 9.

После оператора "исполним 2" в первых двух строчках печатаются введенные параметры. Варьируемому параметру  $Q$  ( $P$ ) первоначально придается малое (заведомо неоптимальное) значение. Далее этот параметр после каждого цикла счета получает постоянное приращение (см. оператор 5) и печатаются соответствующие результаты  $Q$ , л/с,  $W_{пог}$ ,  $\text{м}^3/\text{га}$ ,  $W_{гр} / W_{пог}$  в виде столбцов. Счет останавливается вручную после того, как отношение  $W_{гр} / W_{пог}$  примет максимальное значение и начнет уменьшаться. Оптимальные значения расхода  $Q$  ( $P$ ) и поливной нормы  $W_{пог}(\gamma)$ , вообще говоря, соответствуют максимальному значению



критерия  $W_{гр} / W_{псг}(\zeta)$  (в круглых скобках указан соответствующий идентификатор). Однако, как видно из примеров счета, ввиду незначительного изменения критерия в окрестности его максимума, в качестве оптимальных параметров  $Q$  и  $W_{псг}$  можно принять не только их единственные значения, соответствующие максимуму этого критерия, но и определенный диапазон их значений, в пределах которого величина критерия незначительно отклоняется от его максимального значения. Поэтому для каждого набора входных параметров в графах 8, 9, 10 табл. 9 приводятся не только оптимальные значения  $Q$  и  $W_{псг}$ , но и крайние значения диапазона, в пределах которого эти параметры можно считать практически оптимальными. Наличие такого диапазона оптимальных (по какому-то одному критерию) значений параметров, как уже указывалось, является положительным фактом, так как это создает известную свободу для удовлетворения других пунктов требований к поливу, перечисленных в п. 2.

В качестве варьируемого можно выбрать любой другой параметр. Тогда соответствующим образом изменяются операторы 5 и 19. Так, например, если в качестве варьируемого параметра выбрать  $S(s)$  с шагом 20 м и первоначальным значением 100 м, то эти операторы примут вид: 5 вычислим  $S = S + 20$ ; 19 печатаем с 3 знаками  $s, y, \zeta$ .



При варьировании какого-либо одного параметра все остальные входные параметры предполагаются фиксированными. После отыскания оптимального значения варьируемого параметра он фиксируется на своем оптимальном уровне и начинается поиск оптимального значения следующего параметра (если поставлена такая задача). Таким образом, могут быть подобраны, в принципе, все входные параметры, если условия задачи допускают их варьирование. Этот метод, получивший название покоординатного поиска, был рассмотрен в п. 5.8.1.

Однако в практике проектирования, как правило, одной части входных параметров по тем или иным соображениям заранее придаются определенные фиксированные значения и подбору подлежит лишь другая часть параметров. Чаще всего такими параметрами являются расход  $Q$ , уклон  $i$ , длина борозды  $S$ , поливная норма, которая должна быть подана  $W_{\text{вд}}$ , и др. Алгоритм поиска этих параметров с помощью формулы (40), в зависимости от поставленных целей, может быть составлен различным образом (см. п. 5.81). Приведенный текст формулы (40) соответствует случаю, когда на каждом этапе счета исследуется влияние лишь одного параметра. Однако независимо от того, какой параметр варьируется, из отпечатанного материала подбирается не только оптимальное значение (или диапазон оптимальных значений) этого параметра, но и



соответствующее значение (или диапазон значений) поливной нормы, которая при этом должна быть подана.

В графах II, I2, I3 приводятся аналогичные результаты счета при варьировании  $S$ , когда для каждого набора входных параметров расход фиксировался на своем оптимальном уровне согласно графе 8.

В графе II (см. табл. 9) можно выбрать оптимальное значение  $S$  при фиксированном расходе, который, в свою очередь, был выбран оптимальным образом для тех длин борозд, которые приведены в графе 6. Так, например, для строки 7 входных параметров оптимальным расходом является  $Q = 1,1$ , так как при этом КПД в графе IO достигает максимума — 0,457. Для этого расхода, в свою очередь, оптимальными параметрами являются  $S = 220$  м и  $W_{\text{пог}} = 2019 \text{ м}^3/\text{га}$ , так как при этом КПД в графе I3 достигает максимума — 0,475. Однако из этого не следует делать вывод, что значения параметров  $Q = 1,1$ ,  $S = 220$  м,  $W_{\text{пог}} = 2019 \text{ м}^3/\text{га}$  являются вообще оптимальными для строки 7 входных параметров. Путем варьирования обоих параметров  $Q$  и  $S$  всегда можно найти такую пару их значений, при которой КПД будет превышать величину 0,476. Так, например, нетрудно убедиться, что для рассматриваемой строки при  $S = 120$  м,  $Q = 0,3$  л/с имеем  $W_{\text{пог}} = 1626 \text{ м}^3/\text{га}$  и КПД, равный 0,59.



Сравним полученные результаты.

С точки зрения эффективности использования воды параметры  $S = 120$  м,  $Q = 0,3$  л/с,  $W_{\text{пог}} = 1626$  м<sup>3</sup>/га имеют преимущество перед параметрами  $S = 220$  м,  $Q = 1,1$  л/с,  $W_{\text{пог}} = 2019$  м<sup>3</sup>/га, так как в первом случае КПД = 0,59, а во втором случае КПД = 0,476. Однако с точки зрения удовлетворения других требований к поливу, в частности, требования максимизации производительности труда и механизмов мы имеем обратную картину. Второй набор параметров в этом смысле является более предпочтительным. Поэтому, если требование максимизации производительности труда и механизмов является превалирующим, то надо идти на удлинение борозд и завышение поливной нормы (что вызывает падение КПД), покрывая дефицит воды путем повторного использования дренажных и сбросных вод. Как видим, окончательный выбор параметров должен производиться не только по какому-либо одному критерию (скажем по максимуму КПД водоподачи), но и с учетом других требований к поливу, перечисленных в п. 2. В частности, иногда ведущим требованием может оказаться необходимость увязки поливов с режимом орошения [37].

Приведенный пример сопоставления двух вариантов полива специально был рассмотрен подробно, так как он является типичным для той ситуации, которая обычно возникает при проектировании внутрихозяйственной оро-



сительной сети [36]. Разработанные алгоритмы и аппроксимирующие формулы позволяют на стадии проектирования объективно оценить возникающую ситуацию при том или ином наборе входных параметров и на основе этих оценок выбрать такой их набор, при котором для заданных условий наилучшим образом удовлетворяются предъявляемые к поливу требования.

### Полив по чекам

Если при поливе по полосам максимизация удельного расхода ограничивается опасностью возникновения эрозии, то при поливе по чекам рост удельного расхода ограничивается допустимыми глубинами воды и, в конечном счете, высотой земляных ограждающих валиков.

Ввиду горизонтальности дна эрозия и сброс воды в конце не имеют места. По этой же причине возможность недоувлажнения начального створа, по сравнению с другими створами, также исключается.

Поскольку одним из основных подбираемых параметров при поливе по чекам является лимитируемый допустимыми глубинами удельный расход, то на основе проведенных численных экспериментов на ЭВМ вместо аппроксимирующей формулы построены соответствующие кривые зависимости максимальной глубины  $H_m$  от удельного расхода  $Q$ , которые приведены на рис. 1. Ввиду слабой зависимости  $H_m$  от  $S$  величины  $H_m$  по  $S$  осреднялись.



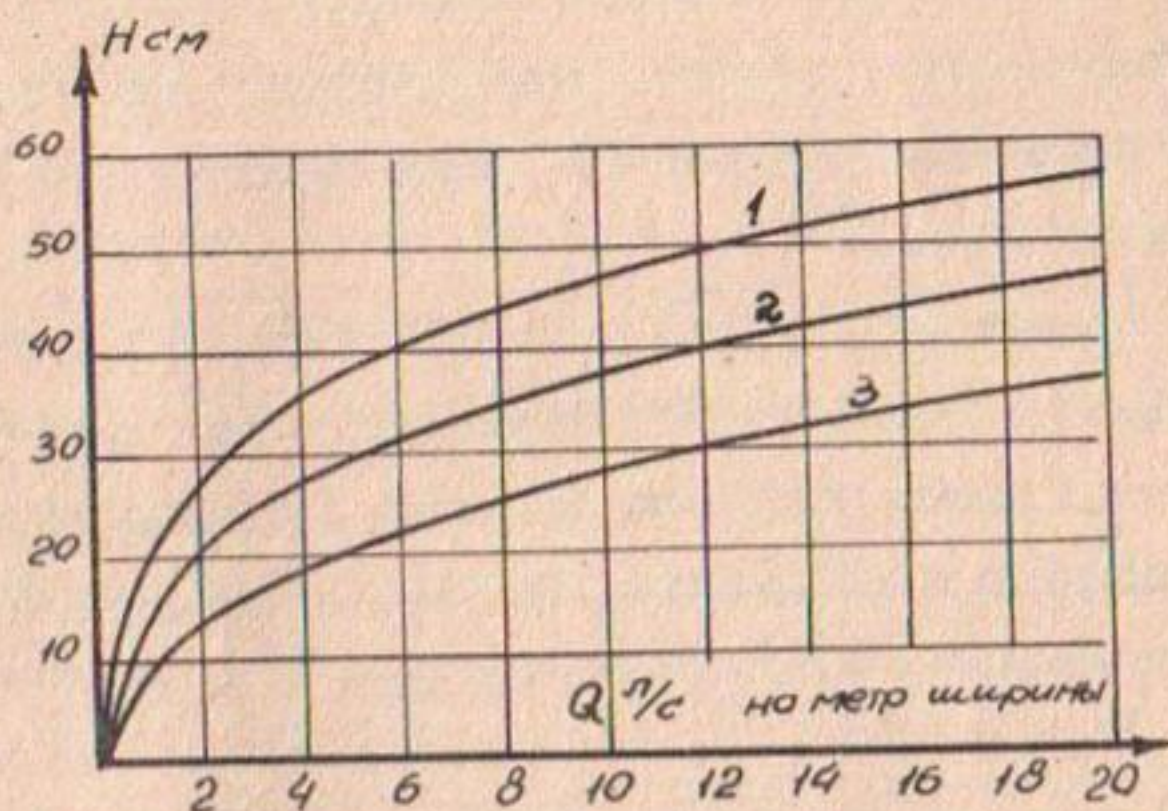


Рис. I. Зависимость максимальной глубины от расхода при поливе по чекам, кривые 1 ( $n_0 = 0,08$ ) и 2 ( $n_0 = 0,06$ ) – вегетационные поливы, кривая 3 ( $n_0 = 0,03$ ) – невегетационный полив

## 6. ДОСТОВЕРНОСТЬ РАЗРАБОТАННЫХ АЛГОРИТМОВ

Для описания явления поверхностного полива, сопровождающегося отъемом расхода вдоль пути вследствие впитывания и испарения использованы системы дифференциальных уравнений (1), (9) и (2), (14), точность которых вполне достаточна для описания рассматриваемого явления. Следует заметить, что гидравлика открытых потоков в настоящее время более общими и точными уравнениями не располагает.

При нулевом отъеме расхода эти уравнения переходят в известные уравнения Сен-Венана, которые многократно



апробированы при решении различных практических задач (движение паводка, движение воды в каналах при суточном регулировании нагрузки ГЭС, волнообразование на быстроходах и др.).

Что касается точности решения исходных уравнений численными методами, то она регулируется выбором шага и числа точек разностной сетки и сводится к уменьшению или увеличению времени счета ЭВМ. Тем не менее, для проверки алгоритмов был привлечен также и опытный материал.

Полевых опытов по поверхностному поливу проведено много, однако, воспользоваться накопленным опытным материалов для проверки теории можно далеко не всегда. Дело в том, что в публикациях и отчетах приводятся не все данные, которые необходимы для их сопоставления с теоретическими результатами. Поэтому для этой цели нами были отобраны лишь те опытные данные, которые позволили в той или иной степени проверить достоверность разработанных алгоритмов, как в качественном, так и в количественном отношении.

Наиболее целесообразным было признано провести такое сопоставление по времени добегания и времени присутствия воды в различных створах (эпюра увлажнения по длине), поскольку эти показатели охватывают весь процесс полива (и впитывания) на всех его стадиях. В связи с этим из имеющегося в настоящее время опытного мате-



риала по поверхностному поливу была отобрана лишь та часть, которая содержала указанные показатели. К числу таких опытов, которые были использованы для сопоставления с теоретическими результатами, относятся следующие.

При поливе по полосам: опыты Южгипроводхоза [38], опыты Кридла [39], опыты ГрузНИИГиМа [40], опыты Хоменко И.С. [41].

При поливе по бороздам: опыты САНИРИ [3], [42], [43], опыты Хоменко И.С. [41], опыты ЮжНИИГиМа [44], опыты ГрузНИИГиМа [45] и др.

Сопоставление результатов, полученных с помощью разработанных алгоритмов с данными перечисленных полевых опытов дает вполне удовлетворительный результат.

## 7. ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Поскольку теоретическая база алгоритмов представляет собой системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, которые не имеют решения в аналитической форме, выводы, вытекающие из этой теории, можно получить лишь на основе проведения машинных имитационных экспериментов по поливу с помощью разработанных алгоритмов. Результаты таких экспериментов в предположении отсутствия испарения сведены, например, в табл. 3-7. В каждой из этих таблиц приведены входные параметры и результаты счета, позволяющие оценить ка-



чество каждого полива по степени выполнимости предъявляемых к поливу требований, которые были перечислены в п. 2.

Анализ основных концепций поверхностного орошения и материала, полученного на основе машинных имитационных экспериментов, позволяет сделать ряд выводов, которые можно использовать при проектировании площадей под поверхностный полив.

### 7.1. Полив по полосам

1. Увеличение удельных расходов и длины полос с целью роста производительности труда ограничивается опасностью возникновения эрозии. Приемлемые с этой точки зрения удельные расходы достигают 20–25 л/с на 1 м ширины полосы. Поэтому с целью минимизации сбросов воды в конце прекращения ее подачи должно предшествовать добеганию поливного потока до конца полосы. При определенном выборе момента прекращения подачи воды ее сбросы в конце можно вообще предотвратить.

2. Увеличение удельного расхода  $Q$  ограничивается также условием увлажнения начального створа. При большом (но еще не эрозионном) значении  $Q$  поливная норма может быть подана за сравнительно короткое время, недостаточное для увлажнения начального створа. Поэтому при выборе  $Q$  должно удовлетворяться обязательное требование – впитавшийся слой воды в начальном створе должен



соответствовать требуемой поливной норме  $W_{тp}$ . Выполнение этого требования предусмотрено как в алгоритме (прил. I), так и в аппроксимирующих формулах (35) и (36).

3. Чем большая поливная норма должна впитаться в начальном створе, тем меньше должен быть удельный расход при фиксированной длине полосы и наоборот, чем меньше требуемая поливная норма, тем больше может быть расход.

4. Вследствие наличия возможности подачи больших удельных расходов, полив по полосам целесообразно применять на почвах с хорошей водовпитывающей способностью.

5. Ввиду наличия в конце преграды, которая задерживает стекающую воду, минимальное по длине увлажнение будет иметь место не в конечном створе, а в некотором промежуточном створе, который тем ближе будет к конечному створу, чем больше продольный уклон полосы.

6. Согласно формулам (35)–(37), реализуемая поливная норма пропорциональна впитывающей способности почвы, длине полосы, сопротивлению движению воды и обратно пропорциональна удельному расходу и уклону.

## 7.2. Полив по бороздам

I. Поскольку ширина междурядий для пропашных культур выбирается небольшой (0,6–0,9 м), то и соответствующие размеры поперечных сечений борозд получаются также небольшими. Вследствие этого емкость борозд для задержания и накопления воды является незначительной по



сравнению с полосами и поэтому при необходимости увлажнения почвы на определенную величину, когда воду надо держать в борозде длительное время, поливать без сброса воды в конце весьма затруднительно.

2. В отличие от полива по полосам глубина воды, определяющая смоченный периметр борозды, существенным образом влияет на инфильтрационный расход. Поэтому при малых уклонах целесообразно устраивать подпор. Увеличение глубин в концевых створах увеличивает инфильтрационный расход, в результате чего уменьшается сброс воды в конце и выравнивается эпюра увлажнения по длине. В этом случае минимальное по длине увлажнение будет иметь место в некотором промежуточном створе.

3. При больших уклонах устраивать подпор в конце не имеет смысла. В этом случае минимальное по длине увлажнение будет иметь место в конечном створе.

4. При поливе по бороздам требуется, чтобы в створе минимального увлажнения впиталась требуемая поливная норма  $W_{тр}$ . В соответствии с этим требованием подача воды продолжается до выполнения этого условия, после чего расход зануливается и фиксируется поданная поливная норма  $W_{зад}$ . При таком принципе полива, в отличие от случая полива по полосам, возможность недоувлажнения начального створа, так же как и возможность недобегания поливного потока до конца борозды полностью исключаются и поэтому необходимость в автоматическом



регулировании поливной нормы и расхода здесь вообще отсутствует.

5. Разность между величинами  $W_{\text{псг}}$  и  $W_{\text{тр}}$  составляют суммарные потери воды на сброс и глубинную фильтрацию, а также испарение. Одной из основных целей при выборе параметров является максимизация коэффициента полезного действия водоподачи, выражаемого отношением  $W_{\text{тр}} / W_{\text{псг}}$ . Поэтому для определения величины  $W_{\text{псг}}$  как функции входных параметров получена аппроксимирующая формула (40), которая дает возможность оценки КПД водоподачи при заданном наборе входных параметров.

6. При поливе по бороздам без подпора КПД водоподачи является низким и редко превышает величину 0,55. Устройство подпора в конце, в зависимости от уклона и длины борозды, может увеличить КПД водоподачи на 10–50%.

7. Максимизация расхода при малых и средних уклонах ( $i = 0,0005-0,008$ ) ограничивается пропускной способностью борозд, а при больших уклонах ( $i > 0,008$ ) — опасностью возникновения эрозии.

8. Как показали численные эксперименты, при оптимизации по КПД водоподачи можно выбрать не только один оптимальный набор входных параметров, но и определенный их диапазон, в пределах которого эти параметры можно считать практически оптимальными. Это обстоятельство создает определенную свободу дополнительного



варьирования входных параметров для удовлетворения других требований к поливу, перечисленных в п. 2.

### 7.3. Полив по чекам при нулевом уклоне

1. Ввиду горизонтальности дна и малых скоростей поливного потока, опасность возникновения эрозии и недоувлажнения начального створа вообще отсутствует. Поэтому автоматический выбор расхода, который имеет место в алгоритме полива по полосам, здесь не предусмотрен.

2. Максимизация удельного расхода с целью повышения производительности труда ограничивается допустимыми максимальными глубинами воды и, в конечном счете, высотой земляных ограждающих валиков. Зависимость максимальных глубин от расходов приведена на рис. 1.

3. Ввиду горизонтальности дна накопленная вода при впитывании в почву имеет горизонтальную поверхность, а нулевые глубины достигаются по длине практически одновременно. Поэтому максимальное увлажнение, как правило, имеет место в начальном створе, а минимальное — в конечном.

4. При поливе по чекам, ввиду горизонтальности дна, на добегание затрачивается значительно больше времени по сравнению с поливом по полосам. Поэтому реализуемые поливные нормы при поливе по чекам, при прочих равных условиях, значительно выше, чем при поливе по полосам.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волинов А.М., Рымарь П.С. Что нужно для широкой механизации и автоматизации поверхностного полива. "Гидротехника и мелиорация", № 4, 1977.
2. Лактаев Н.Т. Проект методических указаний для проведения полевых опытов по изучению техники бороздкового полива. Ташкент, 1965.
3. Лактаев Н.Т. Теоретическое обоснование технологии полива сельскохозяйственных культур по бороздам. Техника полива сельскохозяйственных культур. М., "Колос", 1972.
4. Лактаев Н.Т. Полив хлопчатника. М., "Колос", 1978.
5. Сыромятникова З.А. Орошение зерновых культур в зарубежных странах. Обзор литературы. Вып. 7 (105). ВИНТИ, М., 1967.
6. Sasry G., Agarwal S.C. Prediction of irrigation advance function by dimensional analysis J. *Irrig and Drainage* №2, 1972.
7. Tsai Wu, T. Liang. Optimal design of furrow length of surface irrigation J. *Irrig and Drain* №3, 1970.
8. Штепа Б.Г. Полив по широким длинным полосам и конструкция оросительной системы. Обзорная информация. Минводхоз СССР, ЦЕНТИ, М., 1974.



9. Киладзе Р.М. Подбор параметров полива по бороздам и полосам путем моделирования на ЭВМ и системного анализа. Рекомендации по внедрению новой техники. Минводхоз СССР. М., 1975.

10. Киладзе Р.М. Математическое моделирование самотечного полива и вопросы его оптимизации. Совещание по применению математических методов и ЭВМ в мелиорации и водном хозяйстве. Тезисы докладов. Ереван, 1969.

11. Киладзе Р.М. К вопросу оптимизации самотечного полива путем математического моделирования и применения ЭВМ. Труды ГрузНИИГим, вып. 28, Тбилиси, 1971.

12. Костяков А.Н. Основы мелиорации. М., 1956.

13. Мирцхулава Ц.Е. Инженерные методы расчета и прогноза водной эрозии. М., "Колос", 1970.

14. Штепа Б.Г. Прогрессивные способы орошения, включая машинное орошение. Генеральный доклад по вопросу 32.XI Международный конгресс по ирригации и дренажу. М., 1975.

15. Шумаков Б.Б., Носенко В.Ф., Шейнкин Г.Ю. Основные направления совершенствования техники полива в СССР. "Гидротехника и мелиорация", № 7, 1975.

16. Фиалковский П.Г. О расчете режима орошения закрытых оросительных систем. Сборник научных трудов В/О "Союзводпроект", № 47, 1977.



17. Стокер Дж. Волны на воде. Перевод с англ. М., Изд-во иностр.лит-ры, 1959.
18. Рождественский Б.Л., Яненко Н.Н. Системы квазилинейных уравнений. М., "Наука", 1968.
19. Рихтмайер Р.,Мортон К. Разностные методы решения краевых задач. Перевод со второго английского издания. М., "Мир", 1972.
20. Справочник гидротехника под редакцией Б.А.Шумакова. М., "Колос", 1967.
21. Аверьянов А.П. О расчете движения воды по полосе. Гидротехнические сооружения и эксплуатация гидромелиоративных систем. Сборник научных трудов. Южгипрводхоз, 1974.
22. Методическое руководство по изучению воднофизических свойств почв для мелиоративного строительства. Минводхоз СССР. М., 1974.
23. Голованов А.И. Состав и объем изыскательских работ для моделирования прогноза водно-солевого режима. Прогрессивные методы мелиорации засоленных почв. Материалы совещания в январе 1975 г. в г. Ташкенте. М., 1977.
24. Голованов А.И. Оптимальное количество определений коэффициента фильтрации при проектировании осушительных систем. Труды МГМИ, т. 46, 1977.



25. Костяков А.Н., Фаворин Н.Н., Аерьянов С.Ф.  
Влияние оросительных систем на режим грунтовых вод.  
М., Изд-во АН СССР, 1956.
26. Мойсеев Н.Н. Математик задает вопросы. М.,  
"Знание", 1974.
27. Нейлор Т. Машинные имитационные эксперименты с  
моделями экономических систем. Перевод англ. М.,  
"Мир", 1975.
28. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В.  
Планирование эксперимента при поиске оптимальных усло-  
вий. М., "Наука", 1971.
29. Хикс Ч. Основные принципы планирования экспе-  
римента. Пер. с англ. М., "Мир", 1967.
30. Журавская Г.Л. Экономическое обоснование эле-  
ментов техники механизированного полива по бороздам.  
Вопросы водного хозяйства (орошение), вып. 39.  
Фрунзе, 1977.
31. Воропаев Г.В. Организация поливных работ.  
Алма-Ата, "Кайнар", 1966.
32. Воропаев Г.В. Новая техника орошения. Алма-Ата,  
"Кайнар", 1970.
33. Павлов Г.Н. Полив по длинным бороздам. "Гидро-  
техника и мелиорация" № 2, 1965.



34. Технические указания по выбору элементов техники полива по бороздам и полосам на орошаемых землях и проектированию внутрихозяйственной оросительной сети. Ташкент, Средазгипроводхлопок, 1974.

35. Кучмент Л.С. Математическое моделирование речного стока. Л., Гидрометеиздат, 1972.

36. Натальчук М.Ф. Внутрихозяйственная эксплуатация оросительных систем. М., "Колос", 1969.

37. Методические указания и алгоритмы расчета режимов орошения сельскохозяйственных культур. М., Минводхоз СССР. В/О "Союзводпроект". 1976.

38. Исследование по технике полива по широким длинным полосам из заглубленных каналов-дрен с помощью передвижных насосных станций. Южгипроводхоз. Заключительный отчет по теме I-A-3. Научный руководитель главный инженер института Б.Глушков. Ростов, 1976.

39. *Griddle D. - methods for avaluattling irrig. sistems Agric. Handbook № 82, Soil cons. serv. 1955.*

40. Адамова Е.Н. Разработка элементов техники само-течного полива по полосам. Полный научный отчет ГрузНИИГиМ. Тбилиси, 1963.

41. Хоменко И.С. К вопросу изучения техники поверхностного полива. Кандидатская диссертация, 1948.

42. Челюканов М.Д. Рекомендуемый метод расчета техники полива хлопчатника. Труды САНИИРИ, вып. 125, Ташкент, 1970.



43. Еременко Г.В. и др. Некоторые результаты исследований по технике бороздкового полива в центральной Фергане. Труды САНИИРИ, вып. 125. Ташкент, 1970.

44. Штокалов Д.А. Результаты исследований повышения производительности труда на поливе по удлиненным бороздам. Сборник научных трудов ЮжНИИТим, вып. 10, Новочеркасск, 1964.

45. Угрехелидзе Ш.В. Разработка режима орошения и техники полива виноградников в районах Кахетии. Научный отчет ГрузНИИТим. Тбилиси, 1963.



# СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| В в е д е н и е .....                                                                                |    |
| 1. Основные положения .....                                                                          | 9  |
| 2. Требования, предъявляемые к поверхност-<br>ным способам полива .....                              | II |
| 3. Математическое описание явления полива                                                            | 12 |
| 3.1. Исходные уравнения, начальные и гранич-<br>ные условия .....                                    | 13 |
| 3.2. Отъем расхода вследствие впитывания<br>воды в почву .....                                       | 15 |
| 3.3. Численный метод решения исходных сис-<br>тем дифференциальных уравнений .....                   | 20 |
| 4. Исходные данные .....                                                                             | 23 |
| 4.1. Классификация входных параметров .....                                                          | 23 |
| 4.2. Определение физических параметров .....                                                         | 24 |
| 4.2.1. Определение параметров по качественно-<br>му описанию почвы .....                             | 25 |
| 4.2.2. Определение параметров $\lambda$ , $\kappa$ , $\nu$ по опыт-<br>ной кривой впитывания .....   | 27 |
| 4.2.3. Определение параметра $b$ с учетом ис-<br>ходной влажности почвы .....                        | 29 |
| 5. Воспроизведение поверхностных способов<br>полива на ЭВМ и поиск оптимальных пара-<br>метров ..... | 30 |



|                                                                           | Стр. |
|---------------------------------------------------------------------------|------|
| 5.1. Общие сведения о машинной имитации<br>сложных систем .....           | 30   |
| 5.2. Принципы моделирования поливов на ЭВМ                                | 31   |
| 5.2.1. Выбор граничных условий .....                                      | 32   |
| 5.2.2. Смена граничных условий в процессе имитации<br>полива на ЭВМ ..... | 35   |
| 5.3. Автоматизация выбора некоторых параметров<br>.....                   | 37   |
| 5.3.1. Полив по полосам .....                                             | 40   |
| 5.3.2. Полив по бороздам .....                                            | 42   |
| 5.3.3. Полив по чекам .....                                               | 42   |
| 5.4. Критерии оптимальности выбора параметров<br>.....                    | 43   |
| 5.5. Входные параметры и выходные данные ...                              | 46   |
| 5.6. Описание алгоритмов .....                                            | 49   |
| 5.7. Примеры расчетов на ЭВМ .....                                        | 54   |
| 5.8. Поиск оптимальных параметров .....                                   | 63   |
| 5.3.1. Метод диалога с ЭВМ и планирование машинных<br>экспериментов ..... | 63   |
| 5.8.2. Аппроксимирующие формулы .....                                     | 69   |
| 6. Достоверность разработанных алгоритмов                                 | 93   |
| 7. Выводы и рекомендации .....                                            | 95   |
| 7.1. Полив по полосам .....                                               | 96   |
| 7.2. Полив по бороздам .....                                              | 97   |
| 7.3. Полив по чекам при нулевом уклоне .....                              | 100  |
| Список литературы .....                                                   |      |



## Полив по полосам Приложение I

```

001 -C-O-M-E-N-T -D-O-POREN;
002 -B-E-G-I-N -I-N-T-E-G-E-P N,I,I,I,I2,J,I,Q;-A-R-F-A-Y
003 P(0:7);-P-E-A-L W1,W2,W3,W4,W5,W6,W7,W8;
004 BFG:INOUT('R10-2',W1,W2,W4,W5,W6,W7,W8);
005 W:=W7/10+10;P(0):=W;C(1):=W1;P(2):=W2;
006 C(3):=W4;P(4):=W5;P(5):=W6;P(6):=W7;P(7):=W8;
007 -B-E-G-I-N -P-F-A-L T,T1,T3,TT,T8,T9,
008 UD,C0,D,01,TAU,X,XHK,XHK1,TK,TKS,HN,DS0,DS1,
009 RQ,N,MN,R,AA,LA,E,Y,V1,MV,TW,QU,
010 LA1,AG,AG1,G1;-A-R-F-A-Y ZZ,AL(1:2),DA,A,A1,
011 B,B1,C1,C5(1:4),TK,TA,PN,U,C(0:N),
012 T5(1:2*N),L(1:4*N);-C-O-M-E-N-T -D-O TK,TA,
013 N,U,C,111,T5,220,L,440;-G-O-T-D BOR;
014 L1:A(1):=C0+2/981;A(3):=W3/(DS0*100);RA:T1:=
015 (A(1)+EXT+(1-W4))/(A(3)-W5);-I-F ABS(T1-T)<T1/100-T-H-E-N
016 -B-E-G-I-N T:=T1;-G-O-T-D R2-E-N-D -E-L-S-E
017 -B-E-G-I-N T:=T1;-G-O-T-D RA-E-N-D ;R2:C00('RETURN');
018 R3:B(1):=A(1)*B1(1)+A(2)*B1(2);B(2):=A(3)*B1(1)+
019 A(4)*B1(2);R4:C00('RETURN');R5:C(1):=A(1)*B1(1)+
020 A(2)*B1(3);C(2):=A(1)*B1(2)+A(2)*B1(4);C(3):=
021 A(3)*B1(1)+A(4)*B1(3);C(4):=A(3)*B1(2)+A(4)*B1(4);
022 R6:C00('RETURN');R7:T1:=A(1)*A(4)-A(2)*A(3);A(1):=
023 A(4)/T1;A(2):=-A(2)/T1;A(3):=-A(3)/T1;A(4):=
024 A(1)/T1;R8:C00('RETURN');
025 IN:TX:=TK(J)+(TK(J+1)-TK(J))*J*(D1-D)/D;IN:=
026 C00('RETURN');LEV:T1:=(U(1)-C(Q))/U1;X:=U(Q)/
027 (C(Q);T3:=1/C(Q)+2;TX:=R*X;A(1):=-T1+1/TAU+TX
028 *T3-T3*(LA/T+W4+H);A(2):=2*(T1-1/TAU)+T3*(LA/T+W4+H)
029 *(2*X+1)-AA*X+2);A(3):=1;A(4):=2*AG1*T3/(C(Q)*3);
030 C00('ZBZ',R7,R8);
031 C(1):=(U(Q)-C(Q))/D1;B1(2):=-2*B1(1);B1(3):=B1(4):=0;
032 C00('ZBZ',R5,R6);L(4*X+1):=-C(1);L(4*X+2):=-C(2);L(4*X+3):
033 :=-C(3);L(4*X+4):=-C(4);B1(1):=G1+(U(Q)-2*C(Q))/TAU+2*(LA/T
034 +W4+H)*(X+1)-R*X+2/2)/C(1);B1(2):=AG1*T3;C00('ZBZ',R3,R4);
035 T5(2*X+1):=B(1);T5(2*X+2):=B(2);
036 I:=Q+1;MET14:T1:=I*(D1-D)/TAU;A(1):=-U(1)
037 +C(1)-T1/(2*D1);A(2):=2*A(1);A(3):=(C(1)-U(1)+T1)/
038 (2*D1);A(4):=-2*A(1);-F-Q-R J:=1
039 -S-T-F-P 1-U-N-T 1-L 4-D-O B1(J)
040 :=L(4*(I-1)+J);C00('ZBZ',R5,R6);B1(1):=T5(2*(I-1)+1);
041 B1(2):=T5(2*(I-1)+2);C00('ZBZ',R3,R4);X:=U(1)/C(1);
042 T3:=1/C(1)+2;T8:=
043 R*X+2*SIGN(U(1))/C(1);T9:=AA*X+2*T3*SIGN(U(1));B1(1):=1/TAU
044 -T3*(LA/TA(1)+W4+H)+R*X*T3;B1(2):=2/TAU+T3*(LA/
045 TA(1)+W4+H)*(2*X-1)-T9;B1(3):=B1(1);B1(4):=-2/TAU
046 +T3*(LA/TA(1)+W4+H)*(2*X+1)-T9;C5(1):=G1+T2*C(1)+
047 U(1)/TAU+(LA/TA(1)+W4+H)*(X-1)/C(1)-T8;C5(2):=G1
048 +U(1)-2*C(1)/TAU+(LA/TA(1)+W4+H)*(X+1)/C(1)-T8;A(1):=C(1)+
049 B1(1);A(2):=C(1)+B1(2);A(3):=C(1)+B1(3);A(4):=C(1)+
050 B1(4);B1(1):=A(1);B1(2):=A(2);B1(3):=A(1);B1(4):=
051 A(4);C00('ZBZ',R7,R8);C00('ZBZ',R5,R6);L(4*X+1):=
052 C(1);L(4*X+2):=C(2);L(4*X+3):=C(3);L(4*X+4):=C(4);
053 B(3):=C5(1);B(4):=C5(2);B1(1):=B(3)-B1(2);=
054 B(4)-B(2);C00('ZBZ',R3,R4);T5(2*X+1):=B(1);T5(2*X+2):=B(2);
055 I:=I+1;-I-F I<N-T-H-E-N -G-O-T-D MET14;T1:=G1+(U(N)+2*C
056 (N))/TAU;-I-F I2=2-T-H-E-N -G-O-T-D PREG;X:=U(N-1)/C
057 (N-1);T3:=1/C(N-1)+2;T8:=(X-1)/C(N-1);A(1):=-
058 C(N-1)/D1-T3*(LA/TA(N-1)+W4+H)*(2*X-1)-AA*X+2*T3;A(1):=0;
059 D1+T3*(LA/TA(N-1)+W4+H)*(2*X-1)-AA*X+2*T3;A(1):=0;
060 A(4):=-1;C5(1):=1/TAU+C(N-1)/D1;C5(2):=2*C5(1);C5(3):=0;C5(4):=1;
061 B(3):=T1+(LA/TA(N-1)+W4+H)*(X-1)/C(N-1);B(4):=0;
062 -G-O-T-D MET8;PREG:A(1):=-U(N)+C(N)/D1;A(2):=2*A(1);
063 A(3):=A(4):=0;C5(3):=1;C5(4):=0;X:=U(N)/C(N);
064 T3:=1/C(N)+2;C5(1):=-A(1)+1/TAU+R*X*T3-LA*T3/TA
065 (N)+W4-H*T3;C5(2):=-2*A(1)+2/TAU-AA*X+T3+T3*

```



```

066 (LA/TA(N)+W4+M)*(2*X-1);P[3]:=T1+(LA1/TA(N)+W4+M)*
067 (X-1)/C(I)-R*X*U(N)*
068 T3;B[4]:=0;METR:B1[1]:=L[4*N-3];B1[2]:=L[4*N-2];
069 C1[3]:=L[4*N-1];B1[4]:=L[4*N];COD('ZBZ',R5,R6);A[1]:=
070 :C1[1]+C5[1];A[2]:=C1[2]+C5[2];A[3]:=C1[3]+C5[3];A[4]:=
071 :C1[4]+C5[4];B1[1]:=T5[2*N-1];B1[2]:=T5[2*N];COD('ZBZ',
072 :R3,R4);B1[1]:=B[1];B1[2]:=B[4]-B[2];COD('ZBZ',R7,R8);
073 :COD('ZBZ',R3,R4);U(N):=B[1];C(N):=B[2];I_F I2=2-T_H_E_N
074 :B_E_G-I_N-I_F C(N)>HN-T_H_E_N HN:=C(N)-E_N_D ;J:=N;PROG:A1[1]
075 ::=L[4*N-3];A1[2]:=L[4*N-2];A1[3]:=L[4*N-1];A1[4]:=
076 :L[4*N];B1[1]:=U(J);B1[2]:=C(J);COD('ZBZ',R3,R4);U(J-1)
077 ::=B[1]+T5[2*N-1];C(J-1):=B[2]+T5[2*N];I_F I1=2-T_H_E_N
078 :B_E_G-I_N-I_F C(J-1)<10-T_H_E_N C(J-1):=10
079 :E_N_D ;J:=J-1;I_F J>Q-T_H_E_N -G_O-T_O PROG:PROG1:
080 :COD('RETURN');BOR:
081 :B_E-G-I_N INOUT('P2-10',P);W2:=W2/SQRT(10);
082 :W5:=W5/36;W7:=W7*100;W8:=W8/100;DS0:=7/10;
083 :BOR1:LA:=981*W5*W6*3600+H4;LA1:=2*LA;M:=981*W5;
084 :I_F W1>0.009-T_H_E_N -G_O-T_O BEG;
085 :HM:=2*H;R:=2*W2+2*981*(5/2);AA:=R*3/2;GI:=981*W1;
086 :C:=W5*W6*3600+H4/(1-W4);
087 :T:=(W8/E)*(1/(1-W4));NK:=W8-T*W5;
088 :I_F MK<0-T_H_E_N
089 :B_E-G-I_N T:=T*5/6;G_O-T_O NK_E_N_D ;T1:=(MK/E)+
090 : (1/(1-W4));I_F ABS(T1-T)<T1/100-T_H_E_N
091 :B_E-G-I_N TW:=T1;W3:=W8*W7/TW-E_N_D -E_L-S_F
092 :B_E-G-I_N T:=T1;G_O-T_O NK_E_N_D ;BOR2:AG1:=981*3*W3;XNK:=W7/2;
093 :NK:=W3/10;INOUT('P2-10',MK);
094 :C0:=SQRT(981)*(W3+2*W2+2/W1)*(1/7);U0:=981*W3/C0+2;
095 :D:=XNK/H;TAU:=C/U0;TK[0]:=0;I:=1;T:=D/U0;
096 :MET11:COD('ZBZ',R1,R2);TK[I]:=T;I:=I+1;I_F I<N
097 :I_H_E_N -G_O-T_O MET11;F_O-R I:=0
098 :S-T-E-P I-U-N-T-I-L-N-D_O
099 :B_E-G-I_N U[I]:=U0;C[I]:=C0;E_N_D ;
100 :T:=TK[N];I1:=J1:=I2:=1;R:=HN:=0;MET16:
101 :I_F I2<2-T_H_E_N TAU:=D/(2*U[N]);
102 :XNK1:=XNK+U[N]*TAU;I_F I2=2-T_H_E_N -G_O-T_O MET20;
103 :I_F XNK1<W7-T_H_E_N
104 :B_E-G-I_N TKS:=T+TAU;XNV:=XNK1;-G_O-T_O MET20-E_N_D ;I2:=2;
105 :TAU:=TAU/10;AG:=5*TAU;Y:=T+10*TAU;AL[1]:=XNK/100;AL[2]:=
106 :TKS/3600;INOUT('P2-10',AL);I_F I1=1-T_H_E_N
107 :B_E-G-I_N W8:=W8*5/6;RQ:=W8*100;INOUT('P2-10',RQ);-G_O-T_O
108 :BOR1-E_N_D ;MET20:T:=T+TAU;I_F I2=2*TAU>V-T_H_E_N
109 :TAU:=AG;D1:=XNK/N;I_F I1=2
110 :T_H_E_N -G_O-T_O MD;I_F T*W3>W7*W8-T_H_E_N
111 :B_E-G-I_N AG1:=0;DA[1]:=XNK/100;DA[2]:=T/3600;
112 :DA[3]:=AG1;DA[4]:=T*W3*100/W7;I1:=2;INOUT
113 :('P2-10',DA)-E_N_D ;MD:J:=1;I_F I2=2-T_H_E_N -G_O-T_O AR;
114 :MET21:COD('ZBZ',IN,IU1);TK[J]:=T;J:=J+1;I_F J<N
115 :T_H_E_N -G_O-T_O MET21;TK[N]:=T;AR;
116 :F_O-P J:=R-S-T-E-P I-U-N-T-I-L
117 :N-I-D_O TA[J]:=T-TK[J];TA[N]:=I_F I2=1-T_H_E_N TA(N-1)*
118 :I-E-L-S-E (T-TK[N-1]);COD('ZBZ',LEV,PROG1);
119 :I_F I2=2*J1=1-T_H_E_N
120 :B_E-G-I_N DS1:=W3*T/((C0+2/981+E*T+(1-W4)+1/5*T)*XNK);
121 :I_F ABS(DS1-DS0)>DS0/3-T_H_E_N
122 :B_E-G-I_N DS0:=DS1;-G_O-T_O BOR1-E_N_D ;J1:=2-E_N_D ;
123 :I_F Q=0^C[0]=10-T_H_E_N

```



```

124 B-E-G-I-N QI:=W8*W7/(TW-(I-DA(21*3600)));
125 -I-F-ABS(GU-W3)>QU/10-T-H-E-N
126 -D-E-G-I-N W3:=QU;-G-O-T-O ROR2_E-N_D--E-N_D ;
127 D:=D1;-I-F I1=2^I2#2-T-H-E-N
128 -B-E-G-I-N -I-F XNK<75*W7/100vC(N-51)=10-T-H-E-N
129 -B-E-G-I-N W8:=W8*6/5;RQ:=W8*100;INOUT(P2-10',RQ);
130 -G-O-T-O ROR1_E-N_D;-G-O-T-O RE_E-N_D;RE:-I-F C(Q)=10-T-H-E-N
131 -P-E-G-I-N PH(Q):=100*(E*TA(Q)+(1-W4)+W5*TA(Q))+10;Q:=Q+1-E-N_D ;
132 -I-F Q<N-1-T-H-E-N -G-O-T-O MET16;
133 Y:=2*x0;RH:TA(N):=TA(N)+4*TAU;TA(N-1):=TA(N-1)+4*TAU;
134 Z:=Y+2-8*TAU*Y*(E*(1-W4)/TA(N)+W4+W5)/W1;-I-F T3>0-T-H-E-N
135 Y1:=SORT(T3);-I-F T3<0vY1<0/10-T-H-E-N
136 -B-E-G-I-N PH(N):=(E*TA(N)+(1-W4)+W5*TA(N))*100+10;MK:=HN+2/081;
137 DA(I1):=U0;DA(21):=C0+2/981;DA(3):=TA(0)/3600;DA(4):=TA(N)/3600;
138 INOUT(P2-10',PH,DA,MK);W1:=W1+0.002;
139 INOUT(P2-10',W1);-G-O-T-O ROR1_E-N_D ;
140 -I-F I1=2^V1<0-T-H-E-N
141 -B-E-G-I-N PH(N-1):=(E*TA(N-1)+(1-W4)+W5*TA(N-1))*100+10;I1:=3-E-N_D ;
142 Q:=V1;-G-O-T-O RH;-E-N_D -E-N_D ;

```



## Полив по бороздам

## Приложение 2

```

001 C-O-M-N-E-M-T-D-O MOREP;
002 C-E-G-I-N-I-U-T-F-G-E-P N,I,I1,I2,J,J1,Q,Q13;-A-P-R-A-Y
003 C-D-I-O-T-R-E-A-L W1,U2,W3,W4,W5,W6,W7,W8,W9,W10;
004 C-E-A-L CELL;
005 CEG: INOUT('R10-2',W1,W2,W3,W4,W5,W6,W7,W8,W9,W10);
006 C-LL:=W9;
007 C:
008 W:=W9/10+20;P(0):=N;P(1):=W1;P(2):=W2;
009 P(3):=W3;P(4):=W4;P(5):=W5;P(6):=W6;P(7):=W7;
010 P(8):=W8;P(9):=W9;P(10):=W10;
011 C-E-G-I-N-R-E-A-L T,T1,T3,TT,T8,T9,
012 C-O,C0,C1,TAU,X,XHK,XHK1,TX,TKS,HN,DS0,DS1,
013 C-O,A,MN,F,AA,LA,E,F,Y,Y1,MK,TW,RU,
014 LA1,AG,AG1,G1;-A-R-A-Y ZZ,AL(1:2),DA,A,A1,
015 C,B1,C1,C5(1:4),TK,TA,PN,U,C(0:N),
016 S(1:2*KN),L(1:4*KN);-C-O-M-N-E-M-T-D-O TK,TA,
017 C,U,C,111,T5,220,L,440;-G-O-T-O BOR;
018 C1:AC(1):=C0+4/AG;A(2):=12*P(8)*P(6)*P(7)*3600+P(5)*
019 C+2/(981*(1-P(5)));A(3):=P(3)/(DS0*I*U);A(4):=2*
020 [6]*CC*SQRT(P(4)*3*P(8)/981);RA:T1:=(A(1)+A(2)*T+(1-P(5)
021 ))/(A(3)-A(4));-I-F ABS(T1-T)<T1/1000-T-H-E-
022 C-E-G-I-N-T:=T1;-G-O-T-O P2-E-N-D F-L-S-E
023 C-E-G-I-N-T:=T1;-C-O-T-O RA-E-N-D ;P2:CODE('RETURN');
024 C:B(1):=A(1)*B(1)+A(2)*B(2);B(2):=A(3)*B(1)+
025 A(4)*B(2);R4:CODE('RETURN');R5:C(1):=A(1)*B(1)+
026 A(2)*C(1);C(2):=A(1)*B(2)+A(3)*B(1)+C(1);=
027 A(3)*C(1)+A(4)*B(3);C(4):=A(3)*B(2)+A(4)*B(1)+
028 C6:CODE('RETURN');R7:T1:=A(1)*A(4)-A(2)*A(3);A(1):=
029 A(4)/T1;A(2):=-A(2)/T1;A(3):=-A(3)/T1;A(4):=
030 A(1)/T1;F8:CODE('RETURN');
031 IN:TX:=TK(J)+(TK(J+1)-TK(J))*J*(DI-D)/U;IM1:
032 CODE('RETURN');LEV:T1:=(U(Q)-C(Q))/D1;X:=U(Q)/
033 C(Q);T3:=1/C(Q)+2;TX:=R*X;A(1):=-T1+1/TAU+TX
034 *T3-LA*T3/T+P(5)-M*T3/C(Q);A(2):=4*T1-4/TAU-AA*
035 X+2*T3+LA*T3*(1+2*X)/T+P(5)+M*T3*(2+3*X)/C(Q);
036 A(3):=1;A(4):=4*AG1*T3+2/(C(Q)*5);
037 CODE('ZPZ',R7,R8);
038 C(1):=(U(Q)-C(Q))/D1;B(1):=4*B(1);B(3):=B(1)+3;
039 CODE('ZPZ',R5,R6);L(4*X+1):=-C(1);L(4*X+2):=-C(1)+3;L(4*X+3)
040 :=-C(1);L(4*X+4):=-C(1);B(1):=(U(Q)-4*C(Q))/TAU+
041 C(1-TX)*X/C(Q)+LA1*(1+X)/C(Q)
042 C+T+P(5)+M*(1+X)*T3;
043 P(1):=AG1*T3+2;CODE('ZPZ',R3,R4);
044 S(2*X+1):=B(1);T5(2*X+2):=B(2);
045 C:=Q+1;HFT14:T1:=1*(D1-D)/TAU;A(1):=-(U(1)-C(1)-T1)/
046 C(1-T1)/(2*X+1);A(2):=4*A(1);-C-O-R J:=1
047 C2*X+1);A(4):=-4*A(3);-C-O-R J:=1
048 C-T-F-P 1-U-N-T-I-L 4-D-O B(1);
049 C=L(4*(1-1)+J);CODE('ZBZ',R5,R6);B(1):=T5(2*(1-1)+1);
050 C(1):=T5(2*(1-1)+2);CODE('ZBZ',R3,R4);X:=U(1)/C(1);
051 T3:=1/C(1)+2;TT:=LA*T3/TA(1)+P(5);T8:=
052 R*X+2*SIGN(U(1))/C(1);T9:=AA*X+2*T3*SIGN(U(1));B(1):=1/TAU
053 +R*X*T3-TT-M*T3/C(1);B(1):=4/TAU-T9-LA*
054 C*(1-2*X)/TA(1)+P(5)-M*T3*(2-3*X)/C(1);B(1):=B(1);
055 C(1):=-4/TAU-T9+LA*T3*(1+2*X)/TA(1)+P(5)+M*T3*(2+3*X)/
056 C(1);C(1):=(U(1)+4*C(1))/TAU+6T-T8+LA1*(X-1)/(C(1)*
057 TA(1)+P(5))+MM*(X-1)*T3;C5(2):=(U(1)-4*C(1))/TAU+6T-
058 B+LA1*(X+1)/(C(1)+TA(1)+P(5))+MM*(X+1)*T3;A(1):=C(1)+
059 C(1);A(1):=C(1)+C(1);A(3):=C(1)+F(1);A(4):=C(1)+
060 C(1);P(1):=A(1);B(1):=A(1);B(1):=A(1);B(1):=A(1);B(1):=

```



```

059 A1(1):=A1(2)+C1(2)+A(3):=C1(3)+F1(3);A(4):=C1(4)+
060 A1(4)+C1(1);A1(1):=A1(2);A1(2):=A1(3);A1(3):=A1(4);A1(4):=
061 A1(1);C0(1):=ZPZ';R7,R8);C0D('ZPZ',R5,R6);L(4*I+1):=
062 A1(1);L(4*I+2):=C1(2);L(4*I+3):=C1(3);L(4*I+4):=C1(4);
063 A(3):=C5(1);B(4):=C5(2);A1(1):=A(3);A1(2):=
064 A(4);A(2):=C0D('ZPZ',R3,R4);T5(2*I+1):=B(1);T5(2*I+2):=B(2);
065 T:=I+1;I:=I+1;I<N-T-H-E-N-G-O-T-O MET14;T1:=G1+(U(N)+4)*C
066 (T)/TAU;X:=U(N-1)/C
067 (N-1)+T3:=1/C(N-1)+2;T6:=(X-1)/C(N-1);A1(1):=
068 U(N-1)/D1+R*X+T3-LA*X+T3/TA(N-1)+P(5)-U*X+T3/C(N-1);
069 A1(2):=-4*C(N-1)/D1-AA*X+2*T3*SIGN(U(N-1))-LA*X+T3*(1-
070 2*X)/TA(N-1)+P(5)-U*X+T3*(2-3*X)/C(N-1);A1(3):=0;A1
071 (4):=-1;C5(1):=C(N-1)/D1+1/TAU;C5(2):=4*C5(1);C5
072 (3):=0;C5(4):=1;A(3):=T1-R*X+2*SIGN(U(N-1))/C(N-1)+
073 (LA1/TA(N-1)+P(5)+H)/C(N-1)*T8;B(4):=0;-G-O-T-O
074 METB;METB:B1(1):=L(4*N-3);B1(2):=L(4*N-2);
075 B1(3):=L(4*N-1);B1(4):=L(4*N);C0D('ZBZ',R5,R6);A1(1):=
076 C1(1)+C5(1);A(2):=C1(2)+C5(2);A(3):=C1(3)+C5(3);A(4):=
077 C1(4)+C5(4);B1(1):=T5(2*N-1);B1(2):=T5(2*N);C0D('ZBZ',
078 R3,R4);B1(1):=B(3);B1(2):=B(4);B1(2):=C0D('ZBZ',R7,R8);
079 C0D('ZPZ',R3,R4);U(N):=B(1);C(N):=B(2);
080 J:=N;PROG:A1(1)
081 :=L(4*N-3);A1(2):=L(4*N-2);A1(3):=L(4*N-1);A1(4):=
082 L(4*N);B1(1):=U(1);B1(2):=C(1);C0D('ZBZ',R3,R4);U(J-1)
083 :=B(1)+T5(2*N-1);C(J-1):=B(2)+T5(2*N);I:=2-T-H-E-N
084 -F-E-C-I-N-I-F C(J-1)<15-T-H-E-N C(J-1):=15
085 -F-E-N C(J):=J-1;I:=J>C-T-H-E-N-G-O-T-O PROG:PROG1:
086 C0D('RETURN');FOR:
087 -B-E-G-I-N INOUT('P2-10',P);I3:=1;
088 -I-F W9>CELL-T-H-E-N-G-O-T-O BEG;
089 I0:P(2):=W2/SQRT(10);P(3):=
090 U3*1000;P(4):=U4*100;P(6):=W6/3A;
091 P(9):=U9*100;P(10):=U10*W4;DS0:=0.55;BOR1:
092 LA:=2*981*P(6)*P(7)*3600*P(5);
093 LA1:=2*LA;AG:=981+2/(4*P(8));AG1:=5*P(3)*AG;A:=
094 (981+(3/2)*P(6)*SQRT(2*P(4)/P(8)))/2;AM:=3*P(1);R:=
095 2*P(2)+2*981+(5/2)*(1+P(8)+2)/(3/4)/P(8)+((3/2)*A:=
096 3*R/2;G1:=981*P(1);E:=8*P(8)*P(6)*P(7)*3600+
097 P(5)/(981*P(4));F:=2*P(6)*SQRT(3*P(8)/(981*P(4)));
098 G:=SQRT(981)*(P(2)*P(3)*(1+P(8)+2)+(3/8)/(SQRT(P(1))*4*P(8)+
099 (7/4)))+0.1818;U0:=P(3)*AG/C0+4;XNK:=P(9)/2;
100 G:=XNK/N;TAU:=C/U0;TK(0):=0;I:=1;T:=D/U0;
101 MET11:C0D('ZBZ',R1,R2);TV(1):=T;I:=I+1;I-F I<N
102 -T-H-E-N-G-O-T-O MET11;-F-O-P I:=0
103 -S-T-E-P I-U-N-T-I-L H-D-O
104 -E-E-G-I-N U(1):=U0;C(1):=C0;-E-N-D;
105 -F-O-P J:=0-S-T-E-P I-U-N-T-I-L N-D-O PH(J):=0;
106 T:=TK(N);I1:=J1:=I2:=1;Q:=HN:=0;MET16:
107 TK1:=XNK+U(N)*TAU;-I-F I2=2-T-H-E-N-G-O-T-O MET20;
108 -I-F XNK<P(9)-T-H-E-N
109 -B-E-G-I-N TK5:=T+TAU;XNK:=XNK1;-G-O-T-O MET20-E-N-D;I2:=2;
110 A(1):=XNK/100;A(2):=TK5/3600;INOUT('P2-10',AL);
111 MET20:T:=T+TAU;D1:=XNK/N;
112 -I-F I1=2-T-H-E-N-G-O-T-O MD;-I-F PH(N-1)>U10-T-H-E-N
113 -B-E-G-I-N AG1:=0;DA(1):=XNK/100;DA(2):=T/3600;
114 A(3):=AG1;DA(4):=T*P(3)*100/(P(9)*P(4));I1:=2;INOUT
115 ('P2-10',DA)-E-N-D;MD:J:=1;-I-F I2=2-T-H-E-N-G-O-T-O AR;
116 MET21:C0D('ZBZ',IN,IN1);TK(J):=TX;J:=J+1;-I-F J<N
117 -T-H-E-N-G-O-T-O MET21;TK(N):=T;AR:
118 -F-O-P J:=Q-S-T-E-P I-U-N-T-I-L
119 N-1-D-O TA(J):=T-TK(J);TA(N):=-I-F I2=1-T-H-E-N TA(N-1)*
120 1-E-L-S-E (T-TK(N-1));C0D('ZBZ',LEV,PROG1);
121 -I-F I2=2-T-H-E-N HN:=HN+U(N)*TAU*C(N)+4/AG;
122 -I-F J1=2-T-H-E-N-F-O-P J:=Q

```



```

112 I=2-T-H-E-N-G-O-T-O-MD;-I-F PH[N-1]>W10-T-H-E-N
113 -B-E-G-I-N AG1:=0;DAI1J:=XNK/100;DA(2J):=T/3600;
114 A(3J):=AG1;DA(4J):=T*P(3J)*100/(P(9J)*P(4J));I1:=2;INOUT
115 ('P2-10',DA)-E-N-D;MD:J:=1;-I-F I2=2-T-H-E-N-G-O-T-O AR;
116 MET21:COD('ZBZ',IN,IN1);TK(J):=TX;J:=J+1;-I-F J<N
117 -T-H-E-N-G-O-T-O MET21;TK(N):=T;AR;
118 -F-O-P-J:=Q-S-T-E-P 1-U-P-T-I-L
119 N-1-D-O TA(J):=T-TK(J);TA(N):=-I-F I2=1-T-H-E-N TA[N-1]*
120 1-E-L-S-E (T-TK[N-1J]);COD('ZBZ',LEV,PROG1);
121 -I-F I2=2-T-H-E-N HH:=HN+U[N]*TAU*C[N]*4/AG;
122 -I-F J1=2-T-H-E-N -F-O-R J:=R
123 -S-T-F-P I-U-N-T-I-L N-D-O PN(J):=
124 IN(J)+100*TAU*(EXC(J)+2/TA(J)+P(5J)+F*C(J));-I-F I2=2
125 ^J1=1-T-H-E-N
126 -B-E-G-I-N -F-O-R J:=Q-S-T-E-P 1-U-N-T-I-L H-D-O
127 PN(J):=100*(EX(1-J/H)*C0+2*TA(J)+P(5J))/
128 (1-P(5J))+F*SQRT(1-J/N)*C0*TA(J);DS1:=P(3J)*T/
129 ((C(0J)+4/(AG)+PN(0J)*P(4J)/100)*XNK);
130 J1:=2-E-N-D;
131 Q:=0;-I-F I1=2^I2#2-T-H-E-N
132 -B-E-G-I-N-P(10J):=P(10J)*5/4;RR:=P(10J)/W4;INOUT('P2-10',
133 RG);P(3J):=W3*1000;-G-O-T-O BOR1-E-N-D;
134 -I-F C(RJ)=15-T-H-E-N
135 Q:=Q+1;-I-F Q<N-2-T-H-E-N -G-O-T-O MET16;INOUT('P2-10',PN);V:=HN/(100*W4
136 *W3);
137 -F-O-P-J:=0-S-T-F-P 1-U-N-T-I-L N-D-O PN(J):=PN(J)-PN(N);
138 Q:=0;V1:=0;P19:V1:=V1+PN(J);J:=J+1;
139 -I-F J<N-T-H-E-N -G-O-T-O M19;V1:=V1/N+1;
140 DA(1J):=UC;DA(2J):=2*C0+2/081;DA(3J):=TA(0J)/3600;
141 DA(4J):=TA(NJ)/3600;INOUT('P2-10',DA,V1,V);
142 Q:=Q+100;-G-O-T-O EG;
143 -E-N-D -F-I-L-D -E-N-D;

```



ПК

## Полив по чекам

## Приложение 3

```

001 _C_O_M_M_E_N_T _D_O HORED;
002 _C_E_C_I_N _I_U_T_E_G_E_P N,I,I1,I2,J,J1,QI_A_R_R_A_V
003 T(0:81); _C_E_A_L W1,W2,W3,W4,W5,W6,W7,W8;
004 !HOUT('R10-2',W1,W2,W3,W4,W5,W6,W7,W8);
005 B0:N:=W7/10+10;P(0):=N;P(1):=W1;
006 P(2):=W2;P(3):=W3;P(4):=W4;P(5):=W5;
007 P(6):=W6;P(7):=W7;P(8):=W8;
008 _C_E_C_I_N _P_E_A_L T,T1,T3,TT,T8,T9,
009 U0,C0,D,D1,TAU,X,XHK,XHK1,TK,TKS,MN,DS0,DS1,
010 RQ,M,MN,K,AA,LA,E,V,V1,MV,
011 LA1,AG,AG1,G1; _A_R_R_A_V ZZ,AL(1:2),DA,A,A1,
012 P,P1,C1,C5(1:4),TK,TA,PK,U,C(0:N),
013 T5(1:2*N),L(1:4*N); _C_O_M_M_E_N_T _D_O TK,TA,
014 MN,U,C,111,T5,220,L,440; _G_O_T_O BOR;
015 I1:A(1):=C0+2/981;A(3):=W3/(DS0*I*D);RA:T1:=
016 (A(1)+E*W*(1-W4))/(A(3)-W5); _I_F ABS(T1-T)<T1/100 _T_H_E_N
017 _C_E_C_I_N T:=T1; _G_O_T_O R2_E_N_D _E_L_S_E
018 _C_E_C_I_N T:=T1; _G_O_T_O RA_E_N_D ;R2:COD('RETURN');
019 B3:B(1):=A1(1)*B1(1)+A1(2)*B1(2);B(2):=A1(3)*B1(1)+
020 A1(4)*B1(2);R4:COD('RETURN');R5:C1(1):=A1(1)*B1(1)+
021 A1(2)*B1(3);C1(2):=A1(1)*B1(2)+A1(2)*B1(4);C1(3):=
022 A1(3)*B1(1)+A1(4)*B1(3);C1(4):=A1(3)*B1(2)+A1(4)*B1(4);
023 R6:COD('RETURN');R7:T1:=A(1)*A(4)-A(2)*A(3);A1(1):=
024 A(4)/T1;A1(2):=-A(2)/T1;A1(3):=-A(3)/T1;A1(4):=
025 A(1)/T1;R8:COD('RETURN');
026 IN:TX:=TK(J)+(TK(J+1)-TK(J))*J*(D1-D)/U;IN1:
027 COD('RETURN');LEV:T1:=(U(Q)-C(Q))/D1;X:=U(Q)/
028 C(Q);T3:=1/C(Q)+2;TX:=R*X;A(1):=-T1+1/TAU+TX
029 *T3-T3*(LA/T+W4+M);A(2):=2*(T1-1/TAU)+T3*((LA/T+W4+M)
030 *(2*X+1)-AA*X+2);A(3):=1;A(4):=2*AG1*T3/(C(Q)*3);
031 COD('ZBZ',R7,R8);
032 B1(1):=(C(Q)-C(Q))/D1;B1(2):=-2*B1(1);B1(3):=B1(4):=0;
033 COD('ZBZ',R5,R6);L(4*N+1):=-C1(1);L(4*N+2):=-C1(2);L(4*N+3)
034 :=-C1(3);L(4*N+4):=-C1(4);B1(1):=G1+(U(Q)-2*C(Q))/TAU+2*((LA/T
035 +W4+M)*(X+1)-R*X+2/2)/C(Q);B1(2):=AG1*T3;COD('ZBZ',R3,R4);
036 T5(2*N+1):=B1(1);T5(2*N+2):=B1(2);
037 I:=Q+1;HFT14:T1:=I*(D1-D)/TAU;A1(1):=-(U(I)
038 +C(I)-T1)/(2*D1);A1(2):=2*A1(1);A1(3):=(C(I)-U(I)+T1)/
039 (2*D1);A1(4):=-2*A1(3); _F_O_R J:=1
040 _S_T_F_P 1-U-N-T _I_L 4 _D_O B1(J)
041 :L(4*(I-1)+J);COD('ZBZ',R5,R6);B1(1):=T5(2*(I-1)+1);
042 B1(2):=T5(2*(I-1)+2);COD('ZBZ',R3,R4);X:=U(I)/C(I);
043 T3:=1/C(I)+2;TT:=LA*T3/TA(I)+P(5);T8:=
044 R*X+2*SIGN(U(I))/C(I);T9:=AA*X+2*T3*SIGN(U(I));B1(1):=1/TAU
045 -T3*(LA/TA(I)+W4+M)+R*X*T3;B1(2):=2/TAU+T3*(LA/
046 TA(I)+W4+M)*(2*X-1)-T9;B1(3):=B1(1);B1(4):=-2/TAU
047 +T3*(LA/TA(I)+W4+M)*(2*X+1)-T9;C5(1):=U+(2*C(I)+
048 U(I))/TAU+(LA1/TA(I)+W4+MM)*(X-1)/C(I)-T8;C5(2):=G1
049 +(U(I)-2*C(I))/TAU+(LA1/TA(I)+W4+MM)*(X+1)/C(I)-T8;A(1):=C1(1)+
050 B1(1);A(2):=C1(2)+B1(2);A(3):=C1(3)+B1(3);A(4):=C1(4)+
051 B1(4);B1(1):=A1(1);B1(2):=A1(2);B1(3):=A1(3);B1(4):=
052 A1(4);COD('ZBZ',R7,R8);COD('ZBZ',R5,R6);L(4*I+1):=
053 C1(1);L(4*I+2):=C1(2);L(4*I+3):=C1(3);L(4*I+4):=C1(4);
054 B(3):=C5(1);B(4):=C5(2);B1(1):=B(3)-B(1);B1(2):=
055 C(4)-B(2);COD('ZBZ',R3,R4);T5(2*I+1):=B1(1);T5(2*I+2):=B1(2);
056 I:=I+1; _I_F I<N _T_H_E_N _G_O_T_O MET14;T1:=G1+(U(N)+2*C
057 (N))/TAU; _I_F I2=2 _T_H_E_N _G_O_T_O PRG;X:=U(N-1)/C
058 (N-1);T3:=1/C(N-1)+2;T8:=(X-1)/C(N-1);A1(1):=-
059 C(N-1)/D1-T3*(LA/TA(N-1)+W4+M)+R*X*T3;A1(2):=-2*C(N-1)/
060 D1-T3*(LA/TA(N-1)+W4+M)*(2*X-1)-AA*X+2*T3;A1(3):=0;
061 A1(4):=-1;C5(1):=1/TAU+C(N-1)/D1;C5(2):=2*C5(1);C5(3):=0;C5(4):=1;
062 B(3):=T1+(LA1/TA(N-1)+W4+MM)*T8-R*X+2/C(N-1);B(4):=0;
063 _G_O_T_O METB;PRG;A1(1):=-(U(N1+C(N))/D1;A1(2):=2*A1(1);
064 A1(3):=A1(4):=0;C5(3):=1;C5(4):=0;X:=U(N1)/C(N1);
065 T3:=1/C(N1)+2;C5(1):=-A1(1)+1/TAU+R*X*T3-LA*T3/TA
066 (N1)+W4-M*T3;C5(2):=-2*A1(1)+2/TAU-AA*X+2*T3+T3*
067 (LA/TA(N1+W4+M)*(2*X-1);P(3):=T1+(LA1/TA(N1)+W4+MM)*

```



```

067 (LA1/TA[N])*(14-M)*X(2*X-1)/T(3):=1+(LA1/TA[N])*(14+M)*X
068 (X-1)/C(1)=R*X*U(N)*
069 T3:B(4):=0;METB:B1(1):=L(4*N-3);B1(2):=L(4*N-2);
070 B1(3):=L(4*N-1);B1(4):=L(4*N);COD('ZBZ',R5,R6);A(1):=
071 1(1)+C5(1);A(2):=C1(2)+C5(2);A(3):=C1(3)+C5(3);A(4):=
072 1(4)+C5(4);B1(1):=T5(2*N-1);B1(2):=T5(2*N);COD('ZBZ',
073 13,R4);B1(1):=B(3)-B(1);B1(2):=B(4)-B(2);COD('ZBZ',R7,R8);
074 COD('ZBZ',R3,R4);U(N):=B(1);C(N):=B(2);_I_F I2=2_T_H_E_N
075 _E_G_I_N _I_F C(N)>HN_T_H_E_N HN:=C(N)_E_N_D J:=N;PROG:A1(1)
076 :=L(4*J-3);A1(2):=L(4*J-2);A1(3):=L(4*J-1);A1(4):=
077 L(4*J);B1(1):=U(J);B1(2):=C(J);COD('ZBZ',R3,R4);U(J-1)
078 :=B(1)+T5(2*J-1);C(J-1):=B(2)+T5(2*J);_I_F I1=2_T_H_E_N
079 _E_G_I_N _I_F C(N)<20_T_H_E_N C(N):=20;
080 _I_F C(0)<20_T_H_E_N C(0):=20;
081 _E_N_D J:=J-1;_I_F J>Q_T_H_E_N _G_O_T_O PROG;PROG1:
082 COD('RETURN');BOR:
083 _E_G_I_N INOUT('P2-10',P);W2:=W2/SQRT(10);W3:=
084 W3*10;W5:=W5/36;W7:=W7*100;W8:=W8/100;DS0:=6/10;
085 BOR1;LA:=981*W5*W6*3600*W4;LA1:=2*LA;M:=981*W5;
086 HM:=2*M;R:=2*W2+2*981*(5/2);AA:=R*3/2;G1:=981*W1;
087 E:=W5*W6*3600*W4/(1-W4);AG1:=981*W3*3;XNK:=W7/4;
088 C0:=SQRT(981)*(W3+2*W2+2*10000)+(1/7);U0:=981*W3/C0+2;
089 D:=XNK/N;TAU:=D/U0;TK(0):=0;I:=1;T:=D/U0;
090 MET11:COD('ZBZ',R1,R2);TK(I):=T;I:=I+1;_I_F I<N
091 _T_H_E_N _G_O_T_O MET11;_E_O_R J:=0
092 _S_T_E_P 1-U_N_T_I_L N_D_O
093 _E_G_I_N U(I):=U0;C(I):=C0;_E_N_D ;
094 V1:=TAU;
095 T:=TK(N);I1:=J1:=I2:=1;Q:=HN:=0;MET16:
096 _I_F I2=2_T_H_E_N TAU:=D/(2*U(N));
097 _I_F TAU>V1_T_H_E_N V1:=TAU;
098 XNK1:=XNK+U(N)*TAU;_I_F I2=2_T_H_E_N _G_O_T_O MET20;
099 _I_F XNK1<W7_T_H_E_N
100 _E_G_I_N TKS:=T+TAU;XNK:=XNK1;_G_O_T_O MET20_E_N_D ;I2:=2;
101 TAU:=TAU/10;AG:=10*TAU;V:=T+10*TAU;AL(1):=XNK/100;AL(2):=
102 TKS/3600;INOUT('P2-10',AL);_I_F I1=1_T_H_E_N
103 _E_G_I_N W8:=W8*5/6;RQ:=W8*100;INOUT('P2-10',RQ);_G_O_T_O
104 BOR1_E_N_D ;MET20:T:=T+TAU;_I_F I2=2AT>V_T_H_E_N
105 TAU:=AG;D1:=XNK/N;_I_F I1=2
106 _T_H_E_N _G_O_T_O AD;_I_F T*W3>W7*W8_T_H_E_N
107 _E_G_I_N AG1:=0;DA(1):=XNK/100;DA(2):=T/3600;
108 DA(3):=AG1;DA(4):=T*W3*100/W7;I1:=2;INOUT
109 ('P2-10',DA)_E_N_D ;AD:J:=1;_I_F I2=2_T_H_E_N _G_O_T_O AR;
110 MET21:COD('ZBZ',IN,IN1);TK(J):=TX;J:=J+1;_I_F J<N
111 _T_H_E_N _G_O_T_O MET21;TK(N):=T;AR:
112 _E_O_R J:=Q_S_T_E_P 1-U_N_T_I_L
113 N-1_D_O TA(J):=T-TK(J);TA(N):=_I_F I2=1_T_H_E_N TA(N-1)*
114 1_E_L_S_E (T-TKS);COD('ZBZ',LEV,PROG1);
115 _I_F C(0)>C0_T_H_E_N C0:=C(0);
116 C:=D1;_I_F C(0)=20^I2=2vC(N)=20^I2=2_T_H_E_N
117 _E_G_I_N W8:=W8*6/5;RQ:=W8*100;INOUT('P2-10',RQ);
118 _G_O_T_O BOR1_E_N_D ;_I_F C(0)=20vC(N)=20_T_H_E_N
119 _E_G_I_N _E_O_R J:=0_S_T_E_P 1-U_N_T_I_L N_D_O
120 H(J):=100*(E*TA(J)+(1-W4)+W5*TA(J));MK:=HN+2/981;
121 DA(1):=C0+2/981;DA(2):=MK;DA(3):=TA(0)/3600;DA(4):=TA(N)/3600;
122 INOUT('P2-10',DA);W7:=W7/100*100;
123 INOUT('P2-10',W7);W2:=W2*SQRT(10);W3:=W3/10;
124 INOUT('P2-10',AG,V1);
125 W5:=W5*36;W8:=W8*100;_G_O_T_O BOR
126 _E_N_D ;_G_O_T_O MET16;_E_N_D _E_N_D _E_N_D ;

```



В/О "СОЮЗВОДПРОЕКТ"

ОСОИТД

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА  
ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПОВЕРХНОСТНЫХ  
СПОСОБАХ ПОЛИВА

Редактор П.Я. Левых

Технический редактор Л.Г. Юматова

Корректор И.П. Пономарева

---

Л - 100221 Сдано в набор 3.01.79 Подписано в печать  
30.01.79. Формат 60x90<sup>1</sup>/16 Тираж 200 экз.  
Объем 7,25 печ.л. Уч.-изд. л. 6,5 Цена 50 коп.

Зак. 160

---

Отпечатано в Отделе составления, обработки, издания  
технической документации (ОСОИТД) института "Союзгипро-  
водхоз". Москва, Енисейская, 2