

**АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ КЫРГЫЗСТАН  
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ**

На правах рукописи

**МУКАМБАЕВ НУРБЕК ЖЭЭНБАЕВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИБЛИЖЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИМИ  
И ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОЛИВАХ ПО БОРОЗДАМ**

(Специальность 01.02.05 — Механика жидкостей,  
газа и плазмы)

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

Бишкек — 1992



Работа выполнена в Институте автоматике АН Республики Кыргызстан.

Научные руководители : член-корр. АН Республики Кыргызстан, доктор физико-математических наук, профессор БИЙБОСУНОВ И. Б.  
канд. физ.-мат. наук, доцент  
МАМБЕТКУЛОВ Ж.

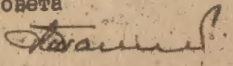
Официальные оппоненты : член-корр. АН Республики Казахстан, доктор технических наук, профессор ЕРШИН Ш. А.  
канд. физ.-мат. наук, доцент  
ИСМАНБАЕВ А.

Ведущая организация - Институт кибернетики с ВЦАН Республики Узбекистан.

Защита состоится " 28 " апреля 1992 г. на заседании Специализированного совета К 009.04.02. в Институте автоматике АН Республики Кыргызстан, в 15<sup>00</sup> час.

Автореферат разослан " 28 " марта 1992 г.

Ученый секретарь  
Специализированного совета  
к. ф. - м. н.

 Р. ТАБЫШОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Наиболее распространенным способом орошения для республик Средней Азии и, в частности, для республики Кыргызстан являются поверхностные способы орошения. В настоящее время поверхностным способом орошения поливается более 80% всех орошаемых земель республики. Из-за слабой механизированности, несовершенности применяемой техники поверхностного полива и режимов орошения КПД полива не превышает 60%, иными словами, около 40% подаваемой воды теряется безвозвратно, ухудшаются мелиоративные свойства воды.

В последние годы были заложены технологические принципы и проведены экспериментальные исследования по принципиально новому способу поверхностного орошения - дискретному способу полива по бороздам. Однако, внедрение прогрессивной технологии, обладающей несомненными достоинствами : значительное сокращение продолжительности полива, высокая равномерность увлажнения, значительная экономия ресурсов и т.п. сдерживается по ряду причин. Одной из них, по нашему мнению, является отсутствие научно обоснованных элементов технологии и техники дискретного способа орошения.

Полив по бороздам в том числе и дискретный, условно можно разбить на два основных взаимосвязанных процесса : впитывание и дальнейшее просачивание воды в почву, через боковые стенки, дно борозды и движения воды вдоль борозды.

Решение задачи о впитывании и просачивании позволяет надежно предсказать степень насыщения корнеобитаемой зоны, глубину и интенсивность просачивания, объем впитавшейся воды, также выявить основные закономерности процессов влагопереноса, степень влияния различных факторов, формирующих процесс движения влаги в почвах, что в конечном счете способствует повышению эффективности использования предлагаемого способа орошения.

Исследование движения струи воды по руслу борозды требует разработку методик расчета его основных элементов, основанных на формировании математической модели, методов их анализа и решения, что позволяет избежать применения большого количества эмпирических и полуэмпирических зависимостей, страдающих неполнотой и про-



тиворечивостью.

Таким образом, исследования и решение подобных вопросов теории инфильтрации и движения воды в малых каналах представляются актуальными как с точки зрения теории гидродинамики, так и с точки зрения развития мелиорации, орошения и сельского хозяйства.

Цель работы - исследование процессов инфильтрации, как в общем случае, так и применительно к конкретным объектам, а также расчет гидродинамических характеристик движения воды по руслу с учетом инфильтрационных потерь, с целью рационализации элементов технологии дискретного способа орошения по бороздам.

Методика исследования. При разработке математических моделей, алгоритмов и программ использованы основные законы гидродинамики и приближенные методы. Сформулированные задачи решались применением приближенно-аналитических и вариационно-разностным методами. При решении задачи напорной инфильтрации в одномерном случае применялся метод малого параметра, с последующим использованием метода группового анализа. Для решения системы, моделирующей движение воды по руслу, применялась минерализация, основанная на методе малых возмущений. Реализация численных алгоритмов и составление пакета программ проводились на ЭВМ типа ЕС и использованием алгоритмического языка ФОРТРАН-4.

Научная новизна. Предложены зависимости для скоростей впитывания, просачивания и глубины увлажнения в зависимости от инфильтрационных характеристик среды и начального состояния.

Предложена и численно реализована математическая модель влагопереноса для описания процесса инфильтрации через боковые стороны борозды, проведено сравнение полученных результатов с данными натурных наблюдений для почв республики.

Получено аналитическое решение системы уравнений, построенных на уравнениях Сен-Венана, для случая дискретного полива по бороздам, на основе которых предложены зависимости для расчета рациональных элементов технологии орошения. Разработан алгоритм расчета геометрических характеристик борозды, обеспечивающих размерность увлажнения по ее длине.

Практическая ценность выполненных исследований определя-

ется возможностью использования полученных результатов и созданных алгоритмов для проектирования систем орошения и оптимальных элементов технологии полива применительно к конкретным почвенно-климатическим условиям.

На защиту выносятся:

- математические модели нестационарных процессов инфильтрации в почвогрунтах через боковые грани и дно борозды в случае полива по бороздам;
- формулировку и решение задачи для определения элементов технологии бороздкового полива в случае дискретного способа подачи воды на входном створе;
- разработанные алгоритмические и программные комплексы для ЭВМ, позволяющие прогнозировать и рассчитывать мелиоративное состояние почвогрунта с учетом основных природных факторов;
- зависимости для скоростей впитывания и просачивания процесса инфильтрации в зависимости от начального состояния почвогрунтов;
- численные эксперименты на ЭВМ по реальной полевой информации.

Достоверность полученных результатов. Построение математических моделей процесса инфильтрации в пористых средах через боковые стороны и дно борозды базируются на фундаментальных положениях механики сплошных сред. Сравнение полученных результатов хорошо согласуется с данными других авторов и данными полевых экспериментов.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационной работы были доложены и обсуждены на: VI Всесоюзном семинаре "Численные методы решения задач фильтрации многофазной несжимаемой жидкости" (Фрунзе, 1982 г.), Всесоюзном семинаре "Современные проблемы и методы теории фильтрации" (Москва, 1984), Всесоюзной конференции "Современные проблемы фильтрации" (Душанбе, 1988), на республиканских конференциях механиков и математиков Кыргызстана (Фрунзе, 1987, 1990), на семинаре по гидродинамике под руководством П.Я.Кочиной (Москва, 1983), на городских семинарах по механике сплошных сред г.Бишкека.

Публикации. Основные результаты и содержание диссертацион-



ной работы опубликованы в 10 научных статьях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 2-х глав и заключения, изложенных на страницах машинописного листа, включает таблиц и рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается обзор публикаций отечественных и зарубежных ученых, близких к теме диссертации, посвященных теории инфильтрации, движения жидкости в открытых руслах, применительно к поливам по бороздам; сформулирована тема диссертации, кратко изложена ее структура и содержание; изложена научная и практическая ценность полученных результатов.

Первая глава посвящена приближенно-аналитическому и численному методу исследования процессов влагопереноса в одно- и двумерной постановке. В § I приводится основное уравнение влагопереноса, описывающего процесс напорной инфильтрации. Обоснованы некоторые предпосылки, упрощающие основное уравнение для реальных условий. Приводятся основные виды зависимостей коэффициентов переноса и установлены их явные виды для некоторых типов почв республики.

Второй параграф посвящен построению приближенно-аналитического алгоритма решения одномерного уравнения влагопереноса, записанного относительно влагосодержания полуограниченной прямой :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D(w) \frac{\partial w}{\partial x} \right] - \frac{\partial K(w)}{\partial x} + f(x,t), \quad (I)$$

где  $t$  - время,  $x$  - вертикальная координата, направленная вниз,  $D(w)$ ,  $K(w)$  - коэффициенты диффузии и влагопроводности, - функция, учитывающая наличие источников или стоков.

На полубесконечности  $x \geq 0$  уравнение (I) ставится следующая начально-краевая задача

$$w(x,0) = H_0, w(0,t) = H_1, t \geq 0, 0 < x < x(t). \quad (2)$$

Для единственности решения задачи (I) - (2) задается некоторое дополнительное условие, а именно условие ограниченности функции

$$w(x,t) < M, \quad x > 0, t > 0, \quad (3)$$

причем, в качестве  $M$  можно взять число  $H_1 + \epsilon^2$

Упрощение задачи (I) - (2) с дополнительным условием (3) производится следующим образом: коэффициенты переноса  $D(w)$  и  $K(w)$  представляются в виде степенных рядов по функции  $w$ , затем, путем растяжения переменных  $x, t, w$  и представления искомой функции  $w$  в виде разложения по малому параметру приходим к системе рекуррентных линейных дифференциальных уравнений в частных производных, где решение каждого последующего уравнения определяется через предыдущее. В процессе вышеизложенного алгоритма соответствующим образом изменяются и начально-краевые условия.

В результате решения исходной задачи получены аналитические зависимости для скоростей впитывания, глубины просачивания влаги и мощности впитывающего слоя. Анализ результатов показывает, что предложенные формулы для расчета инфильтрации в почво-грунт хорошо согласуются с данными, приведенными в работах других исследователей, в частности, уравнение  $x(t)$  как результат решения задачи (I) - (2) имеет вид

$$x(t) = 4 \cdot \sqrt{\frac{D_0}{\pi}} \cdot (H_1 - H_0) \cdot t^{1/2} + K_0 t \quad (4)$$

структурно совпадает с известным решением Дж. Филипа

$$x(t) = d_1 \cdot t^{1/2} + d_2 \cdot t + d_3 \cdot t^{3/2} + \dots \quad (5)$$

где  $d_i = d_i(w)$  и требуют дополнительных вычислений.

Третий параграф первой главы посвящен исследованию процессов впитывания воды через боковые грани сечения борозды. В данном случае процесс инфильтрации моделируется двумерным уравнением влагопереноса



$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left[ D(w) \frac{\partial w}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ D(w) \frac{\partial w}{\partial x} - K(w) \right]. \quad (6)$$

В уравнении (6) приняты те же обозначения, что и для (1), а  $y$  - горизонтальная координата.

Область решения представляет собой правильный многоугольник, на границах которого задаются краевые условия. На боковых границах области в виду симметричности задачи (в предположении однородности почво-грунта) задаются условия непроницаемости, а именно

$$\frac{\partial w}{\partial y} = 0, \quad x \in L_1, \quad x \in L_2 \quad (7)$$

на границе раздела "почва-воздух" и на нижней границе

$$D(w) \frac{\partial w}{\partial x} - K(w) = X(t), \quad y \in L_3$$

$$D(w) \frac{\partial w}{\partial x} - K(w) = 0, \quad y \in L_4 \quad (8)$$

причем  $X(t) = 0$ , если поверхность мульчирована.

Естественно задавать условие  $w = w_{нас}$  на границе "вода-почва", т.е. при  $(x, y) \in L_5$ .

Начальное распределение влажности в области  $G$  ограниченной границами  $L_1, L_2, L_3, L_4$  и  $L_5$  задавалось из эксперимента на реальных полевых объектах.

Для решения уравнения (6) при заданных начально-краевых условиях применялся вариационно-разностный метод, согласно которому сформулированная задача при помощи вариационного принципа и метода сеток сводится к нахождению минимума функционала

$$J = - \int_G \left\{ \frac{\partial}{\partial y} \left[ D^k \frac{\partial w^k}{\partial y} \right] \cdot w^k + \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D^k \frac{\partial w^k}{\partial x} - K(w^k) \right) \right] \cdot w^k + Q_k (w^k)^2 \right\} dG - 2 \int_{L_3} \Psi_k \cdot w^k dG, \quad (9)$$

где  $D^k = D(w^k)$ ,  $w^k$  - значение функции времени в  $k$ -ый момент времени,  $Q = 1/\tau$ ,  $\Psi_k = w^k/\tau$ .

Далее функционал (9) расщепляется на два одномерных функционала, которые довольно просты для численной реализации. Для расщепления функционала (9) должно выполняться условие представленной функций  $Q_k$  и  $\Psi_k$  в виде алгебраических сумм некоторых функций, в частности, двух, т.е.

$$Q_k = Q_{k1} + Q_{k2},$$

$$\Psi_k = \Psi_{k1} + \Psi_{k2}. \quad (10)$$

Прямоугольная область  $G$  разбивалась на сеточную область  $G_i$  путем введения разбиения  $x_i = h_1, x_{i-1}, y_i = h_1, y_{i-1}$ ,  $i, j = 1, 2, 3$  причем, не обязательно  $h_1 = h_2$ . На каждом интервале  $[x_i - x_{i-1}]$  либо  $[y_i - y_{i-1}]$  на  $k$ -ом временном слое искомая функция аппроксимировалась линейной функцией с погрешностью аппроксимации  $O(h^2)$  с переменными коэффициентами через узловые значения искомой функции. В конечном счете, приходим к системе алгебраических уравнений относительно неизвестной функции, решение которой проводилось методом прогонки. В виду нелинейности исходного уравнения, тем самым коэффициентов алгебраических уравнений, применялся итерационный процесс: в начальном приближении в коэффициентах  $D(w^k)$  и  $K(w^k)$  функция  $w^k$  заменялась функцией  $w^{k-1}$ , что приводило к линеаризации коэффициентов. Итерационный процесс продолжался до тех пор, пока не выполнялось условие сходимости.

Апробация предложенной модели проводилась на реальных объектах. Сравнение результатов показывает, достаточно точное описание предложенной модели реальных процессов инфильтрации влаги через боковые грани борозды.

В четвертом параграфе приводятся данные полевых экспериментальных работ с целью установления начального распределения влажности для сформулированных выше задач, изучения различных факторов на (мульчирование, ширина междурядья) процессы влагопереноса при бороздковых поливах.

В главе 2 рассмотрена задача движения воды по руслу борозды с целью определения элементов технологии полива.



Поток по борозде считается одномерным, достаточно плавно изменяющимся, открытым и происходящим с потерями воды на инфильтрацию.

Вопросам теоретического решения задач полива по бороздам посвящено достаточно много работ, основой решения в которых является балансовое уравнение относительно расхода. В это уравнение не входят такие важные характеристики как уклон дна, сила трения, переменность живого сечения.

Эти характеристики вводятся дополнительно и, как правило, на основе эмпирических формул. В последних работах показано, что для теоретического решения бороздкового, может быть использована модель нестационарного движения открытого потока, построенная на уравнениях Сен-Венана:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial z} + g \frac{\partial H}{\partial z} = g i + q \frac{v}{\omega} - g \frac{v^2}{C^2 R},$$

$$\frac{\partial Q}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = -q, \quad (II)$$

где  $z$  - текущая координата,  $t$  - время,  $v$  - скорость,  $g$  - ускорение свободного падения,  $i$  - уклон дна,  $C$  - коэффициент Шези,  $R$  - гидравлический радиус,  $Q$  - расход через поперечное сечение,  $\omega$  - живое сечение,  $q$  - потери на единицу длины.

Потери воды на единицу длины канала определяется по формуле Павловского

$$q = K_0 \cdot (B + 2H)$$

где  $K_0$  - коэффициент фильтрации;  $B$  - ширина канала по урезу воды.

При выводе системы (II) допускались следующие допущения: уклон борозды по всей ее длине считается постоянной величиной, испарением с водной поверхности пренебрегают в виду ее малости, а также уравнения системы записаны относительно переменных усредненных по высоте потока.

Система уравнений (II) замыкается заданием зависимостей  $\omega = f(H)$ , которая для треугольного сечения имеет вид  $\omega = H^2 \alpha g d$  для трапециевидального сечения  $\omega = (B + H \alpha g d) \cdot H$ , где  $\alpha$  - ук-

лон при основании.

Линеаризация системы (II) при соответствующих начально-краевых условий относительно функций  $v$  и  $H$ , производится методом малых возмущений. Далее, линеаризованная система сводится к линейному дифференциальному уравнению второго порядка, которая инвариантно относительно следующих преобразований:

$$z_1 \rightarrow z + \beta, t_1 \rightarrow t + \beta/v_0, H_1 \rightarrow H$$

отсюда следует, что существует решение вида  $H_1 = \psi(\theta)$ , где  $\theta = z - v_0 t$ . В результате получены функциональные зависимости, имеющие достаточно простой вид для скорости и движения лба струи, длины пробега и ее обратной функции: времени до бега до заданной длины  $L$ . Расчеты проведены для двух видов поперечного сечения борозды как с учетом сил сопротивления, так и без учета таковых.

Результаты расчета показали, что элементы технологии бороздкового полива существенно зависят от таких характеристик как начальные значения скорости и расхода в начальном створе, а также фильтрационных характеристик почво-грунта. С увеличением времени зависимость  $z = z(t)$  стремится к прямой, т.е. имеет свои асимптоты. Функция длины слабо реагирует на впитывание при малых  $t$ , а для больших  $t$  уменьшение,  $q$  в пять раз увеличивает длину пробега в 1,5 раза. В целом уменьшение величины  $q$  ведет к росту  $z(t)$ , следовательно для эффективного проведения импульсных поливов по проточным бороздам, необходимо их проводить на почвах с малым значением  $q$  или создавать искусственные мероприятия по уменьшению потерь на впитывание.

Показана возможность применения полученных решений к расчету элементов технологии импульсного полива по бороздам.

Второй параграф посвящен расчету геометрических характеристик борозды, обеспечивающих равномерность увлажнения по ее длине. Расчеты проводились исходя из нетрадиционного требования поиска максимального значения площади поперечного сечения, которое приводит к расчету геометрических характеристик, при фиксированном значении смоченного периметра  $p$ , а из требования минимальности времени до бега струи до заданной точки с координатой  $L$ . Минимальные значения времени до бега обеспечивает максимальное значение скорости движения, что видно из полученного решения. Предложенная методика апробирована на тес-



товом примере для прямоугольного канала, для которого, как известно, справедливо следующее соотношение между параметрами борозды

Основные результаты и выводы.

1. Разработан приближенно-аналитический метод решения одномерного уравнения влагопереноса с учетом гравитационных и капиллярных сил в случае напорной инфильтрации. Получены аналитические зависимости для важнейших характеристик процесса инфильтрации: скорость впитывания, скорость просачивания и глубина увлажнения, как функции, содержащие в качестве параметров почвенные характеристики. Изучена и выявлена степень влияния указанных параметров на скорости впитывания и просачивания.

2. Предложена и численно реализована математическая модель процесса влагопереноса при бороздковых поливах для процесса инфильтрации через боковые грани русла для его произвольного сечения. Аprobация модели проведена на конкретном объекте. Построены контуры увлажнения с учетом различных сил, формирующих процесс движения влаги в почвах, выявлена степень их взаимодействия. Изучен вопрос испарения на процесс влагопереноса.

3. Исследована динамика движения воды по руслу, в случае импульсного способа подачи воды в начальном створе. Получены качественные и количественные оценки изменений основных характеристик гидродинамического потока в русле: функция длины пробега, функция времени добега и др., осложненной потерями воды на инфильтрацию. Расчеты проведены для двух типов русел. Сформулирован подход, основанный на анализе полученных решений, позволяющих определить область применения предложенной методики.

4. Предложен алгоритм расчета рациональных значений геометрических характеристик потока, основанный на принципе максимальной скорости движения. Расчитаны значения геометрических параметров для треугольного и трапециевидного русла. Указанный алгоритм проведен на текстовом примере для случая прямоугольного канала, для которого известно классическое решение.

5. Установлены конкретные виды коэффициентов диффузии и влагопроводности для некоторых типов почв республики, позволяющие реализовать предложенные алгоритмы и модели на реальных объектах.

Основное содержание работы опубликовано:

1. Бийбосунов И.В., Мамбеткулов Ж., Мукамбаев Н.Ж. Численное решение нелинейной задачи тепло-и влагопереноса в почве при бороздковых поливах. - В кн.: Исследования по теории плоских и осесимметричных течений жидкости и газа. Фрунзе, Илим, 1981, с. 99 - 107.
2. Мамбеткулов Ж., Мукамбаев Н.Ж. Об одном методе определения коэффициентов влагопереноса в почвогрунтах. - В кн.: Исследования по теории плоских и осесимметричных течений жидкости и газа. Фрунзе, Илим, 1981 г., с. 107 - 110.
3. Мукамбаев Н.Ж., Акжолов М., Казыбаев А., Бабашов А. Экспериментальное изучение бороздкового полива. - В кн.: Плоские и пространственные задачи механики сплошной среды. Фрунзе, Илим, 1983, с. 79 - 85.
4. Акжолов М., Бийбосунов И.В., Бабашов А.С., Мамбеткулов Ж., Мукамбаев Н.Ж. Исследование тепло-и влагопереноса в ненасыщенных грунтах. - В сб.: Динамика многофазных сред. - Новосибирск, 1983, с. 57 - 65.
5. Акжолов М., Бийбосунов И.В., Бабашов А., Мукамбаев Н.Ж. О разработке математической модели тепло-и влагопереноса в почве с целью оптимизации орошения. - "Современные проблемы и математические методы теории фильтрации". Тезисы докладов - М., 1984, с. 30.
6. Мукамбаев Н.Ж. Моделирование импульсного полива. - В кн.: Материалы УП республиканской научной конференции молодых ученых АН Кирг. ССР. - Фрунзе, 1985 г.
7. Акжолов М.Ж., Мукамбаев Н.Ж. Расчет основных параметров бороздкового полива и подпочвенного орошения. - В кн.: Материалы УШ республиканской научной конференции молодых ученых. - Фрунзе, Илим, 1986.
8. Бийбосунов И.В., Мамбеткулов Ж., Мукамбаев Н.Ж. Моделирование движения жидкости в открытых каналах с учетом потерь на инфильтрацию. ВИНТИ, № 849 - В 87, с. 7.
9. Иманалиева Г., Мукамбаев Н.Ж. Расчет элементов технологии полива по бороздам на основе математического моделирования. - В кн.: Материалы научно-практической конференции по проблемам экологии, охраны и рационального использования при-



родных ресурсов. Оп., 1990. с. 85 - 87.

Ю. Мамбеткулов Ж., Мукамбаев Н.Ж. Приближенно-аналитические исследования процесса инфильтрации.- Тезисы докладов Респуб. конф. "Математическое моделирование и проблемы автоматизации", Фрунзе, 1990г., с. 72 - 73.

Подписано к печати 23.03.92. Формат бумаги 60x84 1/16.

Объем 1,0 п.л. Тираж 80 экз. Заказ 53.

720001, Бишкек, ул. Пушкина, 144,  
типография АН Республики Кыргызстан