

Національна академія наук України
Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова

На правах рукопису

ЄВДОКИМОВ Валерій Володимирович

**ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ РУХОМ ВОДИ
В БАГАТОЯРУСНИХ ЛИМАНАХ З УРАХУВАННЯМ
ІНФІЛЬТРАЦІЇ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ДОМІШОК
І СОЛЕЙ**

05.13.01 — системний аналіз і теорія оптимальних рішень

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ — 1995

006.91

7633.493

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті кібернетики НАН України.

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00761578 (У)

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор ЛАДІКОВ-РОЄВ Ю. П.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор НОВІКОВ О. М.

кандидат фізико-математичних наук СЕМЕНОВ В. М.

Провідна організація: Інститут гідромеханіки НАН України.

Захист відбудеться 21 грудня 1995 р. о 14 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 01.39.03 при Інституті кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України за адресою:

252022 Київ 22, проспект Академіка Глушкова, 40.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічному архіві інституту.

Автореферат розісланий А.Г. Мисюга 1995 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради

ЯКОВЛЕВ О. С.

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Багатоярусні лимани можуть використовуватися за різними призначеннями, зокрема, для поповнення запасів підземних вод, лиманного зрошення, промивання засоленних ґрунтів, запобігання руйнівним діям водно-ерозійних процесів та змиву шкідливих речовин у русла рік, озера, ставки, водосховища. У зв'язку з цим виникають потреби розв'язання задач раціонального використання водних ресурсів, оптимального водорозподілу, тощо. Так, наприклад, при лиманному зрошенні, яке широко застосовується в Казахстані, Калмикії, Поволжі, виникають проблеми підтримки необхідного для рослин водосолевого режиму ґрунтів, запобігання змиканню фронту збирання інфільтраційних вод з ґрунтовими водами, рівномірного зволоження активного шару ґрунту. Нерегульоване поповнення ґрунтових вод інфільтраційними водами при зрошенні може призвести до небажаного засолення ґрунтів, порушення солевого балансу в живленні рослин і, як наслідок, зменшення зборів рослинних культур і несприятливого екологічного оточення в районі проведення заходів. Судячи з розглянутих літературних джерел та практики проектування, вивчення цих та подібних задач не приділяється достатньої уваги. Тому виникає необхідність проробки питань прогнозування наслідків інфільтраційного живлення ґрунту водами лиманів, побудови оптимального програмного керування розподілом об'ємів води між ярусами.

Метою роботи є розробка і дослідження математичних моделей тепломасопереносу в талих і мерзлих ґрунтах з урахуванням інфільтрації фізико-хімічних домішок і солей, методів і алгоритмів для оптимального програмного керування режимами роботи багатоярусних лиманів, а також відповідних комплексів програм для ЕОМ.

Для досягнення вказаної мети було за потрібним вирішити такі задачі.

1. Обрати математичний апарат для опису процесів оптимального розподілення води між ярусами лиманів, тепломасопереносу в талих, змерзлих ненасичених і насичених водою ґрунтах.

2. Розробити метод, який дозволяє вирішувати за допомогою ЕОМ задачі оптимального програмного керування режимами робо-

ти багатоярусних лиманів з урахуванням інфільтрації фізико-хімічних домішок і солей в ґрунт.

3. Створити алгоритми і програми для проведення обчислювальних експериментів, показати збігаємість до рішення цих алгоритмів, перевірити адекватність математичних моделей, що розглядаються, фізичному експерименту або аналітичному рішенню.

4. Втілити розроблені комплекси програм для ЕСМ в практику проектування і експлуатації об'єктів лиманного зрошення.

Методи досліджень. Для математичного опису роботи власне багатоярусних лиманів (підсистема I) використовується система нелінійних диференціальних звичайних рівнянь, а для опису просторово-одновимірного ненасиченого середовища (підсистема II) та тривимірного насиченого середовища (підсистема III) - системи нелінійних диференціальних рівнянь з частинними похідними у відповідних постановках.

Для розв'язування задач оптимізації застосовуються методи динамічного програмування, покоординатного спуску з релаксацийними коефіцієнтами. Розв'язання систем диференціальних рівнянь зводиться до рішення їх кінцево-різницевих аналогів.

Наукова новизна роботи:

1. Розроблена математична модель тепловологопереносу в талому і змерзлому ґрунті, яка базується на модифікованому рівнянні Гріна - Смита для напорної інфільтрації води, рівнянні теплопереносу і нелінійному рівнянні для опису зміни кількості льоду в ґрунті.

2. Підтверджено, за результатом обчислювального експерименту, гіпотеза про наявність "запираючого" прошарку при інфільтрації води в змерзлий ґрунт на границі фазових переходів "лід-вода", "вода-лід".

3. Запропоновано засіб побудови оптимальних граничних умов для програмного керування водосолевым режимом талих і змерзалих ґрунтів у зоні аерації.

4. Розроблено метод і алгоритм оптимального керування водорозподіленням між ярусами лиманів з урахуванням інфільтрації фізико-хімічних домішок і солей, який базується на двохетапному підході до оптимізації.

Практична цінність та реалізація результатів роботи:

1. Запропоновані метод та розроблені відповідні алгоритми розв'язування задачі оптимального керування рухом води у багатоярусних лиманах з урахуванням інфільтрації фізико-хімічних домішок і солей були апробовані на проєктованих об'єктах.

2. Створені пакети комп'ютерних програм, що дозволяють проводити розрахунки з метою одержання оптимальних програмних керувань розподіленням води між ярусами лиманів.

3. Створений пакет комп'ютерних програм побудови ідеалізованої оптимальної траєкторії верхньої граничної умови для змерзлого або талого ґрунту (одновимірний випадок) з можливим застосуванням різних залежностей відносно коефіцієнта вологопровідності й капілярно-сорбційного потенціалу.

Всі програми тестувались і можуть практично застосовуватися при проєктуванні лиманів для прийняття якісних рішень відносно прогнозування водосольового стану ґрунтів, поведінки рівня ґрунтових вод та інших критеріальних оцінок господарської діяльності.

Пакети комп'ютерних програм упроваджені в проєктних інститутах Казахстану та Росії. Зокрема, "Каздіпрорсільгоспвод" користується пакетом програм для оптимізації параметрів багатоярусних лиманів. У "Каздіпрорводгоспі" та "Південуралдіпрорводгоспі" використовувалась програма для розрахунків мінералізації води в ярусах-ставках, нагромаджувачах.

Вірогідність одержаних результатів. Дані обчислювального експерименту відносно ненасиченого середовища зіставлялися з результатами відповідного фізичного експерименту, при цьому була одержана задовільна їх збіжність. Задовільною виявилася також збіжність розрахунків за моделлю насиченого середовища до існуючих відповідних аналітичних розв'язків. Побудова за допомогою моделей оптимальних траєкторій водорозподілу між ярусами лиманів згоджувалася з положеннями теорем В.Г. Болтянського.

Для побудови математичних моделей та числових процедур використовувалися відомі фізичні закони та математичні методи опису реальних процесів і їх оптимізації, а також методи обчислювальної математики.

Апробація роботи та публікації. Основні положення роботи обговорювалися на трьох наукових конференціях та шести семінарських засіданнях, зокрема, на Всесоюзній школі-семінарі "Автоматизація наукових досліджень та проектування АСУ ТП в меліорації" (м.Фрунзе, 1988 р.); Науково-технічній конференції при ВДНГ СРСР з розробки та впровадження програмних засобів (м. Москва, 1990 р.); Науково-технічній конференції наукових працівників, спеціалістів та студентів (м.Акмолла, 1992 р.); Республіканській конференції з проблеми "Моделювання та стійкість систем" (м.Київ, 1994 р.); семінарських засіданнях відділу "Розподілених систем управління" інституту кібернетики ім.В.М.Глушкова НАН України (1990-1994 рр.).

Загальний зміст дисертації опубліковано у 6 друкованих працях.

Основні положення, що пропонуються до захисту:

1. Математична модель тепловологопереносу в талому і змерзлому ґрунті, яка базується на модифікованому рівнянні Гріна - Смита для напорної інфільтрації води, рівнянні теплопереносу і нелінійному рівнянні для опису зміни кількості льоду в ґрунті.

2. Результати обчислювального експерименту, який підтверджує гіпотезу про наявність "запираючого" прошарку при інфільтрації води в змерзлий ґрунт на границі фазових переходів "лід-вода", "вода-лід".

3. Засіб побудови оптимальних граничних умов для програмного керування водосольовим режимом талих і змерзлих ґрунтів у зоні аерації, а також алгоритми і програми для ЕОМ і через них результати розрахунків.

4. Метод і відповідний алгоритм оптимального керування водорозподіленням між ярусами лиманів з урахуванням інфільтрації фізико-хімічних домішок і солей, заснований на двоетапному підході до оптимізації; результати обчислювального експерименту, який було проведено на ЕОМ.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається з вступу, трьох глав, висновку, списку літератури, який налічує 179 найменувань, 29 рисунків і 6 таблиць в основному тексті, п'яти додатків. Матеріали дисертації викладені на 240 сторінках, у тому числі основний текст - на 116 сторінках, додатки - на 70

сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі показана актуальність вибраної теми дослідження, запропоновані методи розв'язування задач та розглянуті питання, які виникають при цьому. Проведений огляд наукових і практичних розробок з даної теми дозволяє зробити висновок про ступінь складності проблеми та відмітити недостатню увагу дослідників до неї. Описані сучасні уявлення про фізичні процеси, що проходять у ґрунті, мотивується необхідність розробки підходів до розв'язання питання оптимізації параметрів системи багатоярусних лиманів.

В главі I викладено процес розробки математичних моделей тепломасопереносу для підсистеми II, які дозволяють оцінювати деякі динамічні параметри ґрунту адекватно фізичному експерименту. До таких параметрів віднесені вологість, склад солей, капілярно-сорбційний потенціал. Ґрунтове середовище розглядається як система, яка складається з води (ґрунтового розчину), льоду та солей (щодо солей враховується тільки один інгредієнт). При описі розглядається одновимірний випадок відносно координати z з додатним напрямком вісі вниз від поверхні ґрунту. Таке спрощення багато в чому пов'язане з відсутністю даних для вимірів по x і y , а також виправдовується рівнинним розташуванням лиманів, де нахили поверхні ґрунту є незначними. Для моделей 1.2 наведені рівняння вологопереносу у ненасиченому середовищі з деякими їх відмінностями: модель 1 описується рівнянням відносно сумарної вологості, а модель 2 - рівнянням відносно капілярно-сорбційного потенціалу. Модель 3 включає рівняння опису процесу напірної інфільтрації води в ґрунт:

$$[\omega_{пв}(z) - \omega_0(z)] \frac{d\ell(z,t)}{dt} = K_{05}(W,z) \frac{h(t) + \ell(z,t) + 1/4r(W,z)}{\ell(z,t)}, \quad (1)$$

де $\omega_{пв}$ - повна вологоємність; ω_0 - початкова вологість; $\ell(z,t)$ - шлях інфільтрації; t - час; $W(z)$ - сумарна вологість ($W = \omega_B + 0,92 \cdot \omega_A, \omega_B(T,z)$ - рідинна волога, $\omega_A(T,z)$ - лід); $T(z,t)$ - температура; $K_{05}(W,z)$ - узагальнений коефіцієнт вологопровідності, який дорівнює $2 \cdot K_H \cdot K_M / (K_H + K_M)$. Тут $K_H(z), K_M(W,z)$ - коефіцієнти відповідно для талого насиченого

і мерзлого ґрунтів: $k(t)$ - напір води: $|\Psi_k(w, z)|$ - абсолютне значення капілярного потенціалу тало-мерзлого ґрунту.

Наведені рівняння теплопровідності для моделей.

Широкому опису коефіцієнтів K_H, K_M та залежностей Ψ_k присвячено додаток I.

Для визначення кількості наявного в системі льоду використовується рівняння:

$$\Psi(w, z) - a \cdot |T|^b = 0, \quad (2)$$

в якому a, b - емпіричні параметри, які залежать від механічного складу ґрунту, $|T|$ - абсолютне значення температури, $\Psi(w, z)$ - капілярно-сорбційний потенціал.

Третім рівнянням моделі є рівняння переносу солей або інгредієнта.

Початкові умови для задачі визначаються на основі фізичного експерименту. Граничні умови у моделях I, 2 вибираються за результатами розрахунків по моделях підсистем I та III.

Одержання аналітичних розв'язків систем рівнянь, наведених у главі I, неможливе через сильну нелінійність коефіцієнтів. Тому пошук розв'язків проводився з залученням різних схем, розрахунки по яких здійснювалися за допомогою як прямих, так і ітераційних методів.

Для розв'язування різницевих рівнянь моделей I, 2, 3 були побудовані відповідні чисельні алгоритми, написана програма WWT та проведені розрахунки при різних значеннях коефіцієнтів K_H, K_M і залежності Ψ . Для тестування моделей був використаний гіпотетичний ярус. Одержані результати вказують на велику чутливість реагування моделі I на зміну граничних умов і значень коефіцієнтів фільтрації.

Через відсутність аналітичних залежностей для моделей I, 2 виникла потреба використання у розрахунках результатів експериментальних спостережень за процесами відтавання, промерзання ґрунтів. Констатувавши задовільну збіжність результатів обчислювального та фізичного експериментів для розглянутого прикладу, слід, однак, відмітити, що на відміну від фізичного обчислювального експерименту при визначених умовах показав наявність на глибині 20 см у ґрунті "запираючого" шару (зона з великим вмістом льоду при нульвій температурі).

який перешкоджає вільному прониканню води).

При вивченні гіпотетичної залежності $\Psi(w, z) - 12000 \cdot |T| = 0$, використуваної для обчислення кількості льоду у ґрунті при близькій до нуля температурі і визначеній вологості, було встановлено, що вибір лінійної залежності відносно температури не завжди є виправданим, особливо у випадку інтенсивної інфільтрації води для різних за механічним складом ґрунтів. Більш відповідним у даному разі буде використання рівняння (2). Обчислювальний експеримент показав, що для деяких ґрунтів при використанні нової залежності кількість незамороженої води буде більшою, ніж при молекулярній вологості. Цей факт підтверджується й експериментом фізичним.

Виявлено, що модель 3 для процесів збирання води при напірній інфільтрації найбільш обґрунтована і перспективна; рівняння (1) не має обмежень на швидкість потоку води за умовами рівноважної термодинаміки. Одержані криві глибин збирання за моделлю 3 показали чотири періоди інфільтрації води в змерзлий ґрунт, можлива збіжність в швидкості руху границі повного насичення ґрунту і границі фазових переходів.

Тестувалися моделі 1, 2 за хлором, який є менш сорбованим і добре розчинним інгредієнтом. Зазначений непоганий збіг обчислювального та фізичного експериментів.

В главі 2 описуються граничні підсистеми, котрі виявляють прямий чи побічний вплив на підсистему II зі змінюваних основних функціональних параметрів і структур, а також вибраних критеріїв якості. Очевидно, що як підсистема I, так і підсистема III приводять до зміни стану зони аерації ярусів лиману (підсистеми II).

У 2.1 у підсистемі I для води виділяються три етапи зміни граничних умов. Перший з них - етап повільно змінюваних умов (з невеликою інтенсивністю опадів та випаровування), другий - етап інтенсивного сніготанення з можливими додатковими рідинними атмосферними опадами та утворенням невеликого шару поверхневих вод. І останній етап - утворення шару води в ярусах, що перевищує 10 см.

Кожен етап має свій математичний опис умов і спосіб залучення даних фізичних експериментальних досліджень та спостережень. Звідси випливає, що різні етапні значення граничних умов дозволяють проводити розрахунки за моделями 1, 2, 3

глави 1 з перемиканням моделей з однієї на іншу.

Алгоритм реалізується на EOM комплексом програм LIMANO і використовується в главі 3 з метою оптимізації.

Метод прогнозування мінералізації води в ярусах лиману базується на використанні рівняння солевого і водного балансів. З метою розробки стійких алгоритмів були використані формули А.П.Браславського і Я.Ф.Плешкова з аналізом критичних точок цих формул. Як наслідок створена програма MINERAL, за якою були проведені численні розрахунки об'єктів проектування, які підтвердили фізичну спроможність розглянутої моделі.

У 2.2 описана просторова модель насиченого середовища, яка ґрунтується на рівнянні Лапласа для води й дифузійному рівнянні для солей. Для розв'язування задачі використовується кінцево-різницевий метод із залученням схем покомпонентного розщеплення рівняння солепереносу. На базі цього методу створено алгоритм та складено відповідну програму під назвою PLANOWS. Наведені відповідні тестові розрахунки для порівняння їх результатів із існуючими аналітичними розв'язками. Для прикладу, наведемо один із них, у якому розглядається суглиниста ділянка розміром $1500 \times 1500 \times 4$ (м³) з коефіцієнтом фільтрації $K = 0.6$ м/доб. З метою виявлення величини підняття рівня ґрунтових вод протягом різних періодів часу на різних площадках інфільтраційне живлення задавалося також рівним. Виконані розрахунки динаміки розтікання пагорбів ґрунтових вод у випадку як одного, так і трьох ярусів лиману. Задовільною є збіжність результатів розрахунків та аналітичних розв'язків при піднятті рівня ґрунтових вод в інтервалі від 0,15м до 0,30м у центрі пагорба з 50-ї доби до 260-ї доби при інфільтраційному живленні $\omega = 0,0008$ м/доб. Головне, тут підтверджується лінійна залежність підняття рівня ґрунтових вод (величина підняття складає приблизно ω/μ на добу, де μ - коефіцієнт нестачі насичення).

Важливим аргументом на користь математичної моделі були позитивні результати розрахунку моментів утворення пагорбів ґрунтових вод та тенденції їх розтікання після деякого періоду часу, що, до речі, також підтверджується існуючими аналітичними розв'язками.

В главі 3 розглянуті питання оптимізації деяких пара-

метрів підсистеми I, II.

У 3.1 для розрахунку оптимальних керувань підсистемами запропоновано алгоритм і дане обґрунтування доцільності його застосування до розв'язування конкретних задач, зокрема до однієї з задач лиманного зрошення - одноразового припливу весняних вод танучого снігу в ненасиченій зоні ярусів.

У цьому випадку критерій якості має вигляд

$$J(q^{un.}) = \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i=1}^n [q_i^{un.}(k_i, w, T, \varphi_{ro}, t) - I_i^*(t)]^2 dt \rightarrow \min_{q^{un.}} \quad (3)$$

де t_0, t_1 - початкове та кінцеве значення часу; n - кількість ярусів; $q^{un.} = (q_1^{un.}, \dots, q_n^{un.})$, $q_i^{un.}$ - розрахункова інфільтраційна витрата води за одиниць часу в зоні аерації i -го ярусу, що залежить, наприклад, від рівня води (змінної стану) $k_i(t)$, сумарної вологості w , температури T , рівня ґрунтових вод φ_{ro} ; $I_i^*(t)$ - запланована службов експлуатації витрата для зони аерації i -го ярусу.

Зміна $k = (k_1, \dots, k_n)$ описується системою диференціальних рівнянь

$$F(k_i) \frac{dk_i}{dt} = f_i(t) - \sum_{r \in R_i} Q_{ri}(k_i, k_j) - \sum_{s \in S_i} Q_{si}(k_i, k_j, u_{si}) - q_i^{un.}(k_i, w, T, \varphi_{ro}, t), \quad i = \overline{1, n} \quad (4)$$

з початковими умовами

$$k(t_0) = (k_1^*(t_0), \dots, k_n^*(t_0)). \quad (5)$$

Тут F - функція площини водної поверхні i -го яруса:

$$F(k_i) = b_i \cdot k_i + c_i \cdot k_i^2, \quad i = \overline{1, n}, \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n (\sum_{r \in R_i} Q_{ri} + \sum_{s \in S_i} Q_{si}) = 0, \quad S_i \subseteq S, R_i \subseteq R, \quad (7)$$

b_i, c_i - емпіричні коефіцієнти; Q_{ri}, Q_{si} - витратні характеристики множин R нерегульованих і S регульованих споруд; $f_i(t)$ - сумарна функція приток, опадів, випаровування; $u_{si}(t)$ - керування (висота підйому щитів S -і споруди); k_j - рівень води у суміжному j -м ярусі.

I. нарешті, обмеження

$$k_i^- \leq k_i \leq k_i^+, u_{si}^- \leq u_{si} \leq u_{si}^+, s \in S_i \subseteq S, i = \overline{1, n}, \quad (8)$$

де $k_i^-, k_i^+, u_{si}^-, u_{si}^+$ - нижні та верхні обмеження на рівень води і керування в ярусі.

За структурою задача (3)-(8) відноситься до класу задач оптимального керування Лагранжа з закріпленим лівим і вільним правим кінцями та фіксованим часом. Для замикання системи (3)-(8) необхідно додати залежності $q_i^{ун.}$, які без попереднього визначення $k_i, w, T, \tau_{гв}$ залишаються невідомими. Як правило, $w, T, \tau_{гв}$ знаходяться із розв'язків диференціальних рівнянь з частинними похідними для ненасиченого і насиченого середовищ, про що повідомляється в главах 1,2. Це є витрати чи об'єми води, якими слід підживити зону аерації для сприятливого проростання рослин після скидання води з ярусів. Разом з тим, увібраний об'єм води не повинен впливати на зміну рівня ґрунтових вод $\tau_{гв}$. Загалом кажучи, задача є некоректною. Перехід до коректного формулювання задачі виконується у два етапи, тобто задача (3) - (8) розбиває ься на дві за критеріальними ознаками. У випадку, коли у сформульованій задачі доводиться врахувати наявність ґрунтових вод, її слід розбити за критеріальними ознаками на три задачі.

Першим етапом з них є пошук оптимальної траєкторії, наприклад зволоження зони аерації (підсистема II) у кожному ярусі системи без урахування їхньої взаємодії за допомогою методу динамічного програмування (МДП).

Для цього слід перетворити неперервний функціонал (3) у дискретний для ζ -го яруса

$$\tilde{J}(q_i^{ун.}) = \sum_{m=0}^{M-1} [q_i^{ун.}(k_i(\zeta_m), w_{im}, T_{im}, \zeta_m) - J_{im}^*(\zeta_m)] (\zeta_{m+1} - \zeta_m) \rightarrow \min_{q_i^{ун.} \in Q_i^{ун.}} \quad (9)$$

з обмеженнями $k_i \in \tilde{H}_i$, де ζ_m - нсьвий дискретний аргумент (час); M, m - кількість і індекс інтервалів за часом; $\tilde{H}_i, Q_i^{ун.}$ - дискретні множини рівнів води і витрат на ζ -му ярусі.

Допустимо однозначну залежність змінної стану від керування в системі, відмовившись від урахування через зону аерації ярусів водяних потоків при напірній інфільтрації, оскільки в даному випадку переважають гравітаційні сили і

рівнинне розташування лиманів. Покажемо, що обчислення $q_{im}^{ун.}$ і мінімізація функціоналу в (9) може бути здійснена за допомогою адекватної моделі тепловологопереносу та МДП.

Дійсно, процес вбирання вологи у насиченому середовищі можна представити як багатокроковий процес. При цьому результати, що одержані на $K-1$ -му кроці часу, будуть початковими умовами для K -го кроку. Верхня гранична умова буде призначатися у відповідності зі змінюю змінної стану, а нижня - умовами зміни рівня ґрунтових вод. Природньо допустити вибір моделі тепловологопереносу на кожному кроці процесу. Звідси очевидна можливість застосування принципу оптимальності Беллмана і складення рекурентного співвідношення для i -го яруса

$$\tilde{w}_{ik}(q_{ik}^{ун.}) = \min_{h_i \in \tilde{H}_{ik}} [\tilde{J}_{ik}(q_{ik}^{ун.}) + \tilde{w}_{i,k-1}(q_{i,k-1}^{ун.})], \quad (10)$$

де \tilde{H}_{ik} - множина дискретних значень h_i на K -м кроці, $K=1, 2, \dots, M$, $\tilde{H}_{ik} \subseteq \tilde{H}_i$, $\tilde{w}_{i,k-1}$ - найменше значення із величин

$$\sum_{m=0}^{K-1} (q_{im}^{ун.} - \bar{I}_{im}^*)^2 \Delta \bar{t}_m; \quad \tilde{J}_{ik} = (q_{ik}^{ун.} - \bar{I}_{ik}^*)^2 \Delta \bar{t}_k.$$

Звідси знаходимо таку послідовність $h_i = (h_{i0}, \dots, h_{iM})$, при якій величина (9) з урахуванням $h_i \in \tilde{H}_{ik} \subseteq \tilde{H}_i$ буде мінімальною.

Другий етап - оптимальний розподіл водних мас між ярусами.

Визначений на першому етапі вектор h_i^0 є ідеалізованим дискретним оптимумом, до якого повинне прямувати наповнення кожного яруса. Цей вектор дає нам можливість виключити $q_i^{ун.}$ з системи рівнянь (4) і використати його в якості параметра у функціоналі.

Редукована форма основної задачі керування в коректній постановці матиме вигляд

$$J(h) = \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i=1}^n (R_i + \beta_i) dt \rightarrow \min_h, \quad (11)$$

$$F(h_i) \frac{dh_i}{dt} = f_i(t) - \sum_{r \in R_i} Q_{ri}(h_i, h_j) - \sum_{s \in S_i} Q_{si}(h_i, h_j; u_{si}), \quad (12)$$

З початковими умовами (5) і рівняннями (6), (7) при

$$u_{si}^- \leq u_{si} \leq u_{si}^+, s \in S_i \subseteq S, i = \overline{1, n}.$$

Тут $P_i = (h_i - \bar{h}_i)^2$. β_i - функція штрафу для i -го ярусу.

$$\beta_i(h_i) = \begin{cases} \theta_i \cdot (h_i - h_i^+)^2 / |h_i - h_i^+|, & |h_i - h_i^+| > h_i^+ - h_i^-, \\ 0, & |h_i - h_i^+| \leq h_i^+ - h_i^-, \\ \theta_i \cdot (h_i - h_i^-)^2 / |h_i - h_i^-|, & |h_i - h_i^-| > h_i^+ - h_i^-, \end{cases} \quad (13)$$

де θ_i - коефіцієнт штрафу для i -го ярусу.

В подальшому для підсистеми II можуть встановлюватися такі критеріальні оцінки, як прибуток, витрати господарства, оцінки, які відбивають екологічні й соціальні аспекти, а також оцінки сольового змісту, потенціалу вологості, температури.

У 3.2 розглядається порядок виконання першого етапу. Застосувавши критерій якості процесу оптимізації як мінімальне відхилення розрахункового профілю вологості від необхідного, спершу розв'язуємо питання вибору кроку інтегрування рівнянь моделі 3 для різних типів ґрунтів. Це важливо з точки зору економії процесорного часу при рішенні задачі оптимізації. Важливим є також налагодження моделі відносно залежності $\Psi(w, z)$ та знаходження додаткових точок перемикання в керуваннях шляхом подрібнення інтервалу часу.

Оптимізація відносно вологи та хлору здійснювалась за моделями 1.2. Пр цьому для хлору призначався критерій мінімального відхилення розрахункового від заданого. Одержані профілі інфільтрації є оптимальні.

У 3.3 розглянена процедура другого етапу оптимізації - пошук оптимальних керувань при розподілі водних мас у підсистемі I. Наведена дискретна форма запису основної задачі керування в її коректній постановці, за допомогою якої виконувались розрахунки. Пошук оптимальних керувань здійснювався за допомогою методу Ейлера та алгоритму циклічної релаксації з прискореним кроком в напрямках u_{si} . Розглянуто два конкретні приклади лиманів Каракудук і Костобе. Розрахунки по об'єкту Костобе вказують на добру поведінку створеного алгоритму при переведенні підсистеми I з одного стану в ін-

ший.

У 3.4 викладені питання узгодження розрахунків для об'єкта Костобе з положеннями теореми В.Г.Болтянського. Знайдена залежність $\delta \dot{u} \text{ grad}_u \mathcal{H}(k(t-1), u(t))$ у дискретному випадку, де $\delta \dot{u}$ - вектор одержаних керувань, \mathcal{H} - гамільтоніан системи (II)-(I3), (5)-(7), яка має переважно від'ємні значення, що підтверджує близькість одержаних результатів до необхідних умов оптимальності.

В Додатку I надані емпіричні залежності, які описують коефіцієнти вологопровідності, дифузії, потенціалу ґрунту, відбору води кореневою системою рослин та ін.

В Додатках 2,3 наведено інструкції і початкові дані для програмного комплексу.

Додаток 4 містить теореми В.Г.Болтянського для дискретних систем оптимального керування.

Додаток 5 складається з акту впровадження програмного комплексу для ЕОМ і рекомендацій по застосуванню програми розрахунку мінералізації води в ярусах.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Розроблена математична модель тепловологопереносу напорної інфільтрації води в талий і змерзлий ґрунти і програми ЕОМ, які базуються на модифікованому рівнянні Гріна - Смита, рівнянні теплопереносу і нелінійному рівнянні для опису зміни кількості льоду в ґрунті. Проведено обчислювальний експеримент, який продемонстрував наявність чотирьох часових періодів швидкості інфільтрації води в мерзлий ґрунт: перший - збігаючої інфільтрації, другий - відсутності збирання, третій, четвертий - відповідно нестала і стала швидкості інфільтрації. Цей результат дозволив "звузити" часову межу оптимізації від 70 % до 30 %, встановити точку перемикання керування водосольовим режимом ґрунтів.

2. Підтверджена, за результатами обчислювального експерименту, гіпотеза про наявність "запираючого" прошарку при інфільтрації води в змерзлий ґрунт на границі фазових переходів "лід-вода", "вода-лід", що підвищує точність прогнозування динаміки проникнення вод лиману в мерзлий ґрунт.

3. Запропоновано засіб побудови оптимальних граничних

умов для програмного керування водосольовим режимом талих і змерзлих ґрунтів у зоні аерації, який базується на методи динамічного програмування і вирішенні систем нелінійних диференційних рівнянь з частинними похідними, які матимуть універсальність у виборі критеріїв якості і математичних моделей тепломасопереносу з емпіричними коефіцієнтами на кожному часовому кроці процесу оптимізації.

4. Запропоновано і випробувано метод і алгоритми побудови оптимальних програмних керувань водорозподіленням між ярусами лиману з урахуванням інфільтрації фізико-хімічних домішок і солей, який базується на двохетапній оптимізації через зведення некоректної задачі до коректної за допомогою методу динамічного програмування і методу циклічної релаксації з релаксаційним критерієм, що не перевищує значення 1.2.

На базі вказаного методу розв'язані задачі з нелінійним і неявним входженням станів (розміру підйомів щитів споруджень) і змінних станів (рівнів або обсягів води в ярусах) в критерії якості і еволюційну систему рівнянь, отримані оптимальні профілі вологості, солів талих і мерзлих ґрунтів.

5. Розроблено моделі, методи і алгоритми, які покладено за основу комплексу програм ЕОМ. Як результат застосування вказаних комплексів побудовано оптимальні програмні траєкторії і керування рухом води в двоюрисному і чотириюрисному лиманах. Отримані результати використовувались при проектуванні лиманних систем в Костобе і Каракудуку (Казахстан).

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНІ В ТАКИХ РОБОТАХ

1. Евдокимов В. В. Постановка задачі оптимального управління дривжением воды в многоярусном лимане // Тез. докл. Всесоюз. шк.-семинара "Автоматизация научных исследований и проектирования АСУ ТП в мелиорации", -Фрунзе : ВНИИКА мелиорации .- 1988. -С. 77-79.

2. Евдокимов В. В. Расчет минерализации воды в изолированном водохранилище // "Информационный листок" Целиноградский ЦНТИ. - 1990.

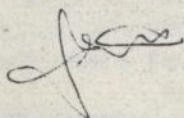
3. Евдокимов В. В. Один из способов сведения некорректной задачи

оптимального управления к корректной //Автоматика. -1992. -№3. -
С. 51-54.

4. Евдокимов В. В. Математическое моделирование некоторых про-
цессов оптимального управления в многоярусных лиманах с помо-
щью ЦВМ//Материалы научно-технической конференции научных ра-
ботников, специалистов и студентов. -Акмола, 1993. -С. 103-104.

5. Евдокимов В. В. Об одном решении задачи оптимального управле-
ния// Модели и алгоритмы многоуровневого управления
эколого-экономическими системами региона:Сб.науч.тр./НАН
Украины. Ин-т кибернетики им.В.М.Глушкова. - Киев, 1994. -
С. 44-51.

6. Евдокимов В. В. О тепловлагодпереносе в ненасыщенной среде//
Науч. тр. АСИ. - Акмола, 1994. -С. 56-64.



ЕВДОКИМОВ В. В. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ВОДЫ В МНОГОЯРУСНЫХ ЛИМАНАХ С УЧЕТОМ ИНФИЛЬТРАЦИИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ И СОЛЕЙ. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01- системный анализ и теория оптимальных решений. Защищается в институте кибернетики имени В. М. Глушкова НАН Украины, Киев, 1995.

В работе впервые рассмотрен комплексный подход в получении оптимальных программных управлений щитовыми сооружениями лимана для водораспределения воды между ярусами с учетом водно-солевого инфильтрационного питания почв.

Предлагается способ расчета и построения оптимальных программных управлений щитовыми сооружениями лиманов с учетом инфильтрации физико-химических примесей и солей, основанный на сведении некорректной задачи к корректной с помощью метода динамического программирования и методе циклической релаксации для математических моделей с нелинейным вхождением управлений и переменных состояний.

Разработанные комплексы компьютерных программ применяются в водном хозяйстве для прогнозирования водно-солевого состояния почв лиманов при моделировании различных ситуаций водораспределения между ярусами.

Ключевые слова: багатоярусні лимани, модель ґрунтового середовища, оптимальне керування, щитові споруди, вологість.

The work for the first time treats complex approach in the obtaining of optimal programme operations of lagoon shield constructions for water distribution between stories considering soil water and salt infiltration feeding.

The way of calculating and constructing optimal programme operations of shield lagoons construction considering physic and chemic admixtures and salts infiltration, based upon transformation of incorrect task into correct one, with the help of dynamic programming and the method of cyclic relaxation for mathematic models with non-linear introduction of operations and variable states is suggested.

Computer programme elaborated complexes are applied into water economy for water and salt lagoon soil state forecasting at simulating various situations of water distribution between stories.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН Україна

Підп. до друку 15.11.95. Формат 60×84/16. Папір для розмнож. апар.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 0,93. Ум. фарбо-відб. 1,05. Обл.-вид. арк. 1,0.
Тираж 100 прим. Зам. 837.

Редакційно-видавничий відділ з поліграфічною дільницею
Інституту кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України
252022 Київ 22, проспект Академіка Глушкова, 40

447022

