



**В. О. Турченко**

*Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна*

## ПОКРАЩЕННЯ ВОДО- ТА ЕНЕРГОКОРИСТУВАННЯ НА РИСОВИХ ЗРОШУВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

Розроблено та запропоновано метод системної оптимізації для покращення водо- та енергокористування у функціонуванні рисових зрошувальних систем (РЗС). Сформульовано підходи до вибору критеріїв та умов економічної й екологічної оптимізації під час побудови комплексних оптимізаційних моделей у проектах їх реконструкції та експлуатації. Науково обґрунтовано сукупність різномірних та взаємопов'язаних показників (глибина рівнів ґрунтових вод у міжвегетаційний період для рису та у вегетаційний період для супутніх культур, мінералізація ґрунтових вод, тривалість періоду із стоянням рівня ґрунтових вод нижче від критичної глибини, ступінь засолення кореневмісного шару ґрунту, швидкість фільтрації з поверхні рисового чека, зрошувальна норма рису, загальний об'єм перекачаної води) як критеріїв оцінювання загальної ефективності водо- та енергокористування на функціональних РЗС. На основі системної оптимізації розроблено комплекс різномірних та взаємопов'язаних режимних, технологічних і технічних рішень, спрямованих на підвищення загальної ефективності функціонування РЗС відповідно до сучасних економічних й екологічних вимог, удосконалено методи обґрунтування параметрів. Економія водних та енергетичних ресурсів на РЗС становить 20...50 %.

**Ключові слова:** системна оптимізація; водо- та енергокористування; рисова зрошувальна система; еколого-економічний ефект.

**Вступ.** Важливим та актуальним завданням розвитку аграрного сектору економіки України на сучасному етапі є відновлення продуктивності та ресурсного потенціалу галузі рисівництва. Це є неможливим без підвищення загальної технічної, технологічної, економічної та екологічної ефективності функціонування наявних рисових зрошувальних систем (РЗС).

Посилення екологічних проблем у зрошуваному землеробстві і, особливо в рисівництві, потребує узгодження економічних та екологічних цілей, за яких можна досягти найбільшого сукупного еколого-економічного ефекту (Monaco & Sali, 2018; Van Niel & Mc Vicar, 2004). Для цього потрібно запровадити заходи, які спрямовані на формування екологічно стабільного природного середовища та його високу відтворювальну спроможність.

Вирішення цієї науково-практичної проблеми ґрунтується на необхідності підвищення загальної ефективності функціонування РЗС на основі використання науково обґрунтованих, ресурсоощадних технологій зрошувального землеробства. Відповідно, це потребує застосування відповідних комплексних і системних рішень з водо- та енергокористування під час проектування та експлуатації такого роду об'єктів з урахуванням сучасних економічних та екологічних вимог.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Постановка цієї проблеми, в принципі, не нова. Різні особливості – від режимних, технологічних, технічних до еколого-економічних – розглянуто в численних публікаціях відповідних фахівців різного профілю. Так, питан-

ня ефективного використання водних ресурсів під час вирощування рису в умовах дефіциту води та необхідності управління зрошувальною водою для підвищення продуктивності рисівництва висвітлено в роботах (Monaco & Sali, 2018; Van Niel & Mc Vicar, 2004; Botes, Bosch & Oosthuizen, 1996; Soundharajan & Sudheer, 2009; Yakuba, 2017). Позитивні результати виробництва основного продукту харчування більшої частини людства – рису та вплив на навколишнє природне середовище наведено в (Van Niel & Mc Vicar, 2004; Yakuba, 2017).

Щодо питань оптимізації водо- та енергокористування у створенні та функціонуванні меліоративних систем, зокрема і РЗС, то вони мають переважно пошуковий і постановочний характер. Так, за результатами досліджень (Botes, Bosch & Oosthuizen, 1996), запропоновано модель для оптимізації рішень з використання водних ресурсів під час вирощування рису для отримання високих врожаїв рису з меншою кількістю зрошувальної води. Оптимізаційну модель для розроблення оптимальних графіків зрошування для рисової культури протягом періоду вегетації в умовах дефіциту води запропоновано у дослідженні (Soundharajan & Sudheer, 2009).

Актуальні проблеми щодо зниження енергетичних затрат на рисових системах водогосподарського комплексу Нижньої Кубані розглянуто в (Yakuba, 2017). За результатами досліджень розроблено та наведено параметри оптимізації рисових зрошувальних систем, які дають змогу знизити енергозатрати на колекторно-дренажній мережі рисових систем.

### Інформація про автора:

**Турченко Василь Олександрович**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри водної інженерії та водних технологій.

Email: v.o.turchenuk@nuwm.edu.ua

**Цитування за ДСТУ:** Турченко В. О. Покращення водо- та енергокористування на рисових зрошувальних системах. Науковий вісник НЛТУ України. 2017. Вип. 27(10). С. 122–128.

**Цитування APA:** Turcheniuk, V. A. (2017). Improvement of Water and Energy Use on Rice Irrigation Systems. *Scientific Bulletin of UNFU*, 27(10), 122–128. <https://doi.org/10.15421/40271023>

Визначення оптимальних параметрів зрошувальної мережі рисових систем за оптимізаційним підходом розглянуто в роботі (Paudyal, Pandit & Goto, 1991). Відсутність відповідних технічних критеріїв для встановлення оптимальних розмірів зрошувальних каналів призводить до низької ефективності багатьох іригаційних схем. Тому на основі оптимізаційного підходу встановлюють такі розміри каналів, які є економічними і приводять до мінімальних втрат зрошувальної води.

Отже, дослідження на рисових системах зводяться, в основному, до вирішення окремих, переважно вузьких, питань функціонування. За минулий період головну увагу приділяли переважно питанню підвищення врожайності сільськогосподарських культур без урахування збереження та покращення родючості ґрунтів, раціонального використання земельних, водних й інших ресурсів, охорони довкілля (Kovalchuk & Michalska, 1994; Rokochinskiy, Mendus & Turcheniuk, 2016).

Це зумовлено виникненням широкого кола нагальних проблем щодо дефіциту водних ресурсів, підтоплення, неефективного використання водних, енергетичних й інших ресурсів, деградації меліорованих ґрунтів тощо.). Ця проблема значно посилюється в умовах зміни клімату.

Водночас підходи до обґрунтування комплексу заходів з оптимізації режимних, технологічних та технічних рішень під час створення та функціонування розроблено недостатньо через виражену специфічність РЗС (складні гідрогеологічні умови, засоленість ґрунтів, ґрунтових вод тощо). Це визначає необхідність поєднувати в одній оптимізаційній моделі різноманітні критерії. Зокрема, економічні критерії, що виражені у вартісному вигляді і характеризують економічну ефективність меліоративних заходів. А також екологічні критерії, що представлені сукупністю відповідних фізичних показників водного, сольового та інших режимів, які характеризують екологічну ефективність РЗС. Тому питання створення єдиної еколого-економічної оптимізаційної моделі є актуальним і потребує пошуку нових підходів до його вирішення.

**Мета та завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення загальної ефективності водо- та енергокористування на основі оптимізації режимних, технологічних і технічних рішень з водорегулювання під час створення та функціонування РЗС з урахуванням сучасних економічних й екологічних вимог.

Для досягнення зазначеної мети потрібно вирішити такі завдання:

- розвинути теоретичні засади й розробити сучасні підходи до оптимізації на еколого-економічних засадах технічних і технологічних рішень з водорегулювання у проектах реконструкції та експлуатації на РЗС;
- дослідити та оцінити режимні, технологічні та технічні особливості водорегулювання на РЗС у взаємозв'язку в змінних природно-агромеліоративних умовах на прикладі Придунайських РЗС (ПРЗС);
- розробити загальні принципи побудови й реалізації моделей оптимізації технічних і технологічних рішень з водорегулювання на РЗС на еколого-економічних засадах.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Наукові підходи та принципи реалізації моделі системної оптимізації на РЗС. Рисові системи мають низку особливостей, чим відрізняються від традиційних меліоративних об'єктів зони зрошення. Ці особливості зумовлені складними ґрунтовими, геологічними та гідрогеологіч-

ними умовами територій, що відведені під улаштування рисових систем, а також наявністю у сівозміні провідної культури затоплюваного рису.

Особливість технології водорегулювання під час вирощування затоплюваного рису полягає у створенні та підтриманні на рисових полях потрібного промивного водного режиму. Це забезпечує формування сприятливого природно-меліоративного режиму та формування задовільного еколого-меліоративного стану цієї території. Створення необхідного промивного водного режиму забезпечують відповідними режимами водоподачі та водовідведення на системі. Подана вода витрачається на створення шару на рисовому полі щодо біологічних потреб культури рису, транспірацію і фільтраційні втрати. Суть промивного водного режиму полягає тут у зниженні сезонної акумуляції солей у верхніх горизонтах та вимивання низхідними токами води в нижні горизонти і в дренажну мережу.

Отже, підтримання необхідного рівня промивності рисового поля в різні періоди вирощування рису є необхідною умовою підвищення продуктивності РЗС, покращення еколого-меліоративного стану в межах системи та на прилеглих територіях.

Вирішення означеної проблеми потребує переходу від традиційної практики розгляду РЗС не суто як технічних, а як складних природно-технічних систем. Це визначає відповідну зміну усієї методології, технічної та технологічної стратегії створення і функціонування. Окрім цього, необхідне безпосереднє врахування мінливих у часі та невизначених за своїм характером природно-кліматичних умов. Саме вони, разом з меліоративними чинниками, справляють визначальний вплив на загальний природно-меліоративний режим земель РЗС та створюваний відповідний еколого-економічний ефект (Rokochinskiy, Mendus & Turcheniuk, 2016; Turcheniuk, Frolenkova & Rokochinskiy, 2017).

Як показують практика і набутий досвід, вирішення такої складної проблеми для наявних РЗС, які по суті є також і еколого-економічними об'єктами (Turcheniuk, Frolenkova & Rokochinskiy, 2017), потребує застосування відповідних комплексних і системних рішень, насамперед щодо оптимізації природно-меліоративного режиму.

Природно-меліоративний режим (ПМР) – це сукупність водного, повітряного, теплового, поживного, окисно-відновного та інших ґрунтових режимів. Вони регулюються за допомогою гідромеліоративних, агротехнічних і організаційних заходів на фоні природних чинників в умовах зрошувальної, зокрема і рисової, системи.

На рисових системах ПМР визначається цілою низкою чинників, головними з яких є природні (кліматичні чинники), технологічні (подача та відведення води), конструктивні (конструкція та параметри зрошувальної і дренажно-скидної мережі й ін.). Результати досліджень (Mendus, 2016) свідчать про те, що найістотніший вплив на ПМР дієвих РЗС здійснює дренажно-скидна мережа. На рисових системах саме вона визначає інтенсивність та спрямованість фільтраційних процесів, що відбуваються внаслідок тривалого перезволоження ґрунтів в умовах застосування поливу затопленням. Ця мережа формує промивний, відповідно водний і сольовий режими, є визначальним чинником продуктивності, гарантом підтримання належного еколого-меліоративного стану зрошуваних земель рисової системи.

Як складна природно-технічна еколого-економічна система, РЗС потребує одночасного поєднання режимних, технологічних, технічних, економічних й екологічних інтересів на основі системної оптимізації. Суть цього полягає у знаходженні проміжних і локальних оптимумів за всіма основними елементами водо- та енергокористування. До них відносять основні змінні в просторі і часі чинники, що впливають на ефективність функціонування РЗС загалом. Тому, згідно з (Rokoshinskiy, Mendus & Turcheniuk, 2016), системна оптимізація на еколого-економічних засадах режимних, технологічних та конструктивних рішень на відповідних рівнях прийняття в часі (1 – стадія проекту, 2 – стадія планова експлуатація) може бути реалізована за такими комплексними моделями.

На стадії проекту під час обґрунтування оптимальних параметрів конструктивних рішень з урахуванням кліматологічної стратегії управління об'єктом модель має вигляд

$$\begin{cases} ZP_{is}^0 = \min_{\{i\}} \sum_{p=1}^{n_p} [(C_i + E_n K_i) + R_i] \cdot \frac{\alpha_p}{W_i}; s = \overline{1, n_s}; i = \overline{1, n_i}; \\ Z_{is}^0 = \min_{\{i\}} \sum_{j=1}^m |Z_{jks} - \hat{Z}_j| \cdot \alpha_p; j = \overline{1, n_j}; s = \overline{1, n_s}; i = \overline{1, n_i}, \end{cases} \quad (1)$$

де:  $ZP_{is}^0$  – мінімальне значення приведених витрат за прийнятою умовою обраного критерію економічної оптимальності, що відповідає оптимальному проектному рішенню із сукупності можливих варіантів  $I = \{i\}, i = \overline{1, n_i}$ ;  $Z_{js}$  – сукупність  $J = \{j\}, j = \overline{1, n_j}$  критеріїв (фізичних показників) екологічної ефективності водорегулювання на РЗС за сукупністю проектних рішень  $\{i\}, i = \overline{1, n_i}$ , відповідною технологією водорегулювання  $\{s\}, s = \overline{1, n_s}$ ;  $\hat{Z}_j$  – відповідні розглядувані лімітуючі показники екологічної ефективності;  $\alpha_p$  – відомі (встановлені або задані) значення повторюваності чи часток можливого стану типових метеорологічних режимів у розрахункові періоди вегетації сукупності  $\{p\}, p = \overline{1, n_p}$  у межах проектного терміну функціонування об'єкта,  $\sum_{p \in n_p} \alpha_p = 1$ ;  $W_i$  – обсяг (вартість) отриманої продукції за відповідними варіантами режимних, технологічних та технічних рішень сукупності  $\{i\}, i = \overline{1, n_i}$ ;  $C_i$  – поточні витрати на отримання продукції за варіантами проектних рішень (ПР);  $E_n$  – нормативний коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень  $K_i$  за відповідними варіантами ПР;  $R_i$  – погодно-кліматичний ризик за відповідними варіантами ПР, що визначають як

$$\bar{R}_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m (W_{ij} - \bar{W}_{nm})^2 \cdot \alpha_{pj}} = \sqrt{\sum_{j=1}^m R_{ij}^2 \cdot \alpha_{pj}}, i = \overline{1, n} \quad (2)$$

де:  $W_{ij}$  – вартість валової продукції за фактичною врожайністю, отриманою за  $i$ -тим варіантом ПР, грн/га;  $\bar{W}_{nm}$  – вартість валової продукції за потенційно можливою врожайністю на об'єкті, грн/га.

За аналогією, на стадії експлуатації для функціональних РЗС модель має такий вигляд:

$$\begin{cases} D_0 = \max_{\{s\}} \sum_{p=1}^{n_p} [W_i - C_i - R_i] \cdot \alpha_p; i = \overline{1, n_i}; s = \overline{1, n_s}; \\ Z_{is}^0 = \min_{\{i\}} \sum_{j=1}^m |Z_{jps} - \hat{Z}_j| \cdot \alpha_p; j = \overline{1, n_j}; i = \overline{1, n_i}; s = \overline{1, n_s}, \end{cases} \quad (3)$$

де  $D_0$  – максимальне значення показника чистого доходу, що досягається внаслідок отримання певного обсягу вирощуваної сільськогосподарської продукції під час застосування різних варіантів технологічних рішень.

Екологічну умову оптимізації на рисовому полі і на системі загалом розглядають як визначену, обґрунтовану і прийнятну сукупність фізичних показників (критеріїв) оцінювання водного, сольового і загального ПМР. Такими показниками для РЗС можуть бути: режим рівня ґрунтових вод (РГВ) у позавеgetаційний період ( $Hg$ ); тривалість знаходження РГВ нижче від критичної глибини ( $T$ ); швидкість фільтрації під затопленим рисовим полем ( $V$ ); ступінь засолення кореневмісного шару ґрунту ( $S$ ); мінералізація ґрунтових вод ( $G$ ); зрошувальна норма рису ( $M$ ) та ін.

$$Z_{jks} = (Hg_{ks}, T_{ks}, V_{ks}, S_{ks}, M_{ks}, G_{ks}), s = \overline{1, n_s}, \forall k \in n_k, j = \overline{1, n_j} \quad (4)$$

За такими показниками, порівняно із граничними значеннями щодо конкретних ґрунтово-меліоративних умов об'єкта, можна передбачати спрямованість процесів, які відбуваються на рисовому полі і системі загалом. Це дає змогу неявно оцінити екологічний ефект від реалізації меліоративних заходів.

Розглянуті показники мають досить високий рівень сполученості між собою, враховують динаміку і комплексність досліджуваних процесів, адекватно відображають різні позиції формування і виявлення водно-сольового, фільтраційного режимів за різних природно-меліоративних умов. Ці показники можуть бути визначені наявними методами експериментальним шляхом або за допомогою відповідних розрахункових методів і моделей для прогностичних розрахунків на довготерміновій основі. Запропонований підхід дає змогу використовувати ці показники у будь-якому сполученні, залежно від вирішуваного завдання, як критерії екологічної ефективності в комплексних моделях оптимізації водорегулювання на рисових системах.

Обґрунтування оптимального загального природно-меліоративного режиму, відповідно параметрів технологічних і технічних проектних рішень на РЗС за інтегральною оцінкою сукупності наведених показників екологічної ефективності, може бути достатньо ефективно виконано на основі підходу (Kaguk, 1989). Згідно з таким підходом характеристику екологічної надійності варіанта меліоративного проекту можна представити у вигляді вектора  $H$  з компонентами  $H_z$ .

$$H = H_z / z = 1, 2, \dots, N, \quad (5)$$

де  $N$  – кількість елементів (чинників), які характеризують екологічну надійність меліоративного проекту.

За припущення, що в системі чинників всі вони є однаково важливими, відсутність певного елемента можна вважати як відповідне зменшення міри екологічної надійності. Тому тут компоненти  $H_z$  приймають відповідні значення за умови, що

$$H_z = \begin{cases} 1, & \text{якщо } H_z \leq H_{nz}; \\ 0 & \text{якщо } H_z > H_{nz}, \end{cases} \quad (6)$$

де  $H_{nz}$  – нормативне, критичне або допустиме значення  $z$ -го елемента.

Тоді коефіцієнт екологічної надійності варіанта меліоративного проекту можна визначити за формулою

$$k_n = \frac{1}{N} \sum_{z=1}^N H_z \quad (7)$$



Такий коефіцієнт є наближеною оцінкою екологічної стійкості проекту і ступеня врахування чинників екологічної надійності його функціонування. Значення коефіцієнтів екологічної надійності меліоративного об'єкта за рекомендованою шкалою наведено в табл. 1.

**Табл. 1. Шкала коефіцієнтів екологічної надійності (Turchenyuk, Frolenkova, & Rokochinskiy, 2017)**

№ з/п	Коефіцієнт екологічної надійності	Найменування градаций рівня екологічної надійності
1	0-0,25	ненадійна
2	0,26-0,50	недостатньо надійна
3	0,51-0,75	достатньо надійна
4	0,76-1,0	надійна

На відміну від розглянутого підходу, запропоновано більш гнучкий інструмент визначення компоненти  $H_z$ , коли вона приймає всі можливі значення в інтервалі  $[0, 1]$  за умови, що

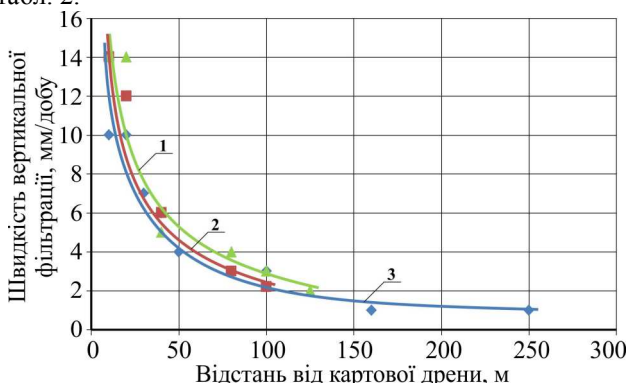
$$H_z = \begin{cases} 1 - \frac{H_{nz} - H_{\phi z}}{H_{nz}}, & \text{якщо } H_{\phi z} \leq H_{nz}; \\ 1 + \frac{H_{nz} - H_{\phi z}}{H_{nz}}, & \text{якщо } H_{\phi z} \geq H_{nz}; \end{cases} \quad (8)$$

де:  $H_{\phi z}$  – фактичне значення  $z$ -го показника екологічної ефективності;  $H_{nz}$  – відповідно нормативне, критичне або допустиме його значення, яке відповідає  $\hat{Z}_j$ .

Запропонований методичний підхід та методика його реалізації дає змогу підвищити загальну ефективність функціонування РЗС. Метод враховує економічні та екологічні вимоги через узгодження параметрів рівня конструктивної та екологічної надійності й, відповідно, вартості з рівнем створюваного загального ефекту прийнятих рішень.

**Результати досліджень системної оптимізації комплексу заходів з підвищення ефективності функціонування РЗС.** Як показують результати проведених досліджень, визначальним режимним показником, який характеризує фільтраційні процеси та необхідний рівень промивності на рисовому полі, є швидкість вертикальної фільтрації. Оптимальні параметри показника швидкості вертикальної фільтрації обґрунтовано за еколого-меліоративним підходом на основі визначення показника екологічної надійності за розглянутими формулами.

Для визначення оптимальних параметрів швидкості вертикальної фільтрації на рисовому чеку, яка відображає одночасно режимний та технологічний особливості водорегулювання на РЗС, розглядали зміну цього показника в реальних умовах від 0,5 до 18 мм/добу (рис. 1). Узагальнені результати такої оцінки наведено в табл. 2.



**Рис. 1.** Розподіл швидкостей вертикальної фільтрації на рисовій карті-чеку для умов ПРЗС

**Табл. 2. Визначення оптимальної швидкості вертикальної фільтрації на рисових картах-чеках ПРЗС**

Швидкість фільтрації $V$ , мм/добу	Компонента $H_z$ за $H_g$	Компонента $H_z$ за $T$	Компонента $H_z$ за $S$	Компонента $H_z$ за $G$	Компонента $H_z$ за $M$	Коефіцієнт екологічної надійності, $k_n$
0,5	0,80	0,82	0,51	0,43	0,24	0,56
1,0	0,95	0,98	0,55	0,50	0,28	0,65
2,0	1,00	1,00	0,67	0,60	0,33	0,72
4,0	0,93	0,93	0,73	0,75	0,50	0,77
6,0	0,87	0,89	0,80	0,86	0,61	0,80
8,0	0,80	0,93	0,89	1,00	0,74	0,87
10,0	0,67	0,86	1,00	0,83	0,77	0,83
12,0	0,70	0,86	1,00	0,73	0,77	0,81
14,0	0,65	0,86	0,75	0,67	0,83	0,75
16,0	0,59	0,82	0,63	0,50	0,96	0,70
18,0	0,50	0,79	0,50	0,33	0,91	0,61

Наведені результати засвідчують, що в досліджуваних умовах оптимальною швидкістю фільтрації, яка підтверджується оцінкою екологічної надійності  $k_n = 0,8 \dots 0,87$ , є швидкість  $V^o = 6 \dots 10$  мм/добу. Така швидкість забезпечує створення мінімально необхідного промивного водного режиму, з яким пов'язане загалом ефективне функціонування ПРЗС.

Отже, під час обґрунтування у подальшому оптимальних параметрів технологічних і конструктивних рішень за моделями оптимізації (1) та (2) в ролі екологічної умови оптимізації доцільно розглядати обмеження, що швидкість фільтрації приймає значення, наближені до оптимальних, тобто  $V_i \Rightarrow V^o$ . Розроблений для ПРЗС комплекс режимних, технологічних та конструктивних рішень з підвищення ефективності функціонування систем містить:

- заходи, що спрямовані на підвищення дренажності й рівномірності фільтрації по площі та профілю карти-чека на основі глибокого розпушення;
- повторне використання дренажно-скідних вод (ДСВ) як складника екологічно безпечної технології вирощування рису;
- промивку засолених ґрунтів на фоні глибокого розпушення;
- удосконалення конструкції рисових систем та інтенсифікацію роботи дренажу;
- захист дренажно-скідних каналів від деформацій русла.

Режимно-технологічні заходи передбачають запровадження розробленого й обґрунтованого ресурсоощадного режиму зрошення рису (рис. 2), що забезпечує сприятливіші умови вирощування та отримання врожайності рису на рівні 7...10 т/га і вище



**Рис. 2.** Схема реалізації ресурсоощадного режиму зрошення в разі поверхневого затоплення за фазами розвитку рису

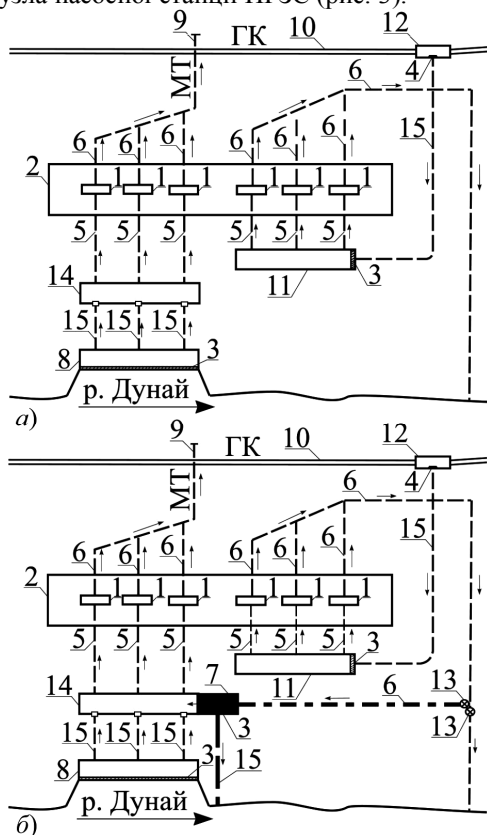
Виконані розрахунки з визначення оптимальних технологічних параметрів за економічним критерієм ефективності функціонування РЗС показали, що оптимальною часткою рису в сівозміні є  $\delta = 50 \dots 60\%$ , а оптимальною зрошувальною нормою рису –  $M^o = 18$  тис.  $m^3/га$ , порівняно з проектною  $M_{np} = 25$  тис.  $m^3/га$ .

Оскільки водоподача та водовідведення на ПРЗС здійснюється тільки за допомогою насосних станцій, оптимальні параметри водокористування тут забезпечуються відповідними оптимальними параметрами енергокористування. Тому за оптимальною величиною зрошувальної норми рису  $M^o=18$  тис.  $m^3/га$  та відповідним

сумарним об'ємом перекачаної води  $W_{II}^0 = 27,5$  тис. м<sup>3</sup>/га, оптимальні затрати електроенергії становлять  $Q = 1,78$  тис. кВт·год/га.

Повторне використання ДСВ для зрошення рису та супутніх культур дає змогу вирішити іншу гостру проблему, пов'язану з необхідністю скиду ДСВ з рисової системи. Об'єм скиду становить 30...70 % від об'єму водозабору на зрошення. Мінералізація такої води, зазвичай, невисока і знаходиться в межах від 0,5 до 3...5 г/л. Водночас ДСВ можуть бути важливим чинником збільшення площі зрошуваних земель без зміни водозабору із джерел зрошення та зниження споживання води на зрошення рису і супутніх культур.

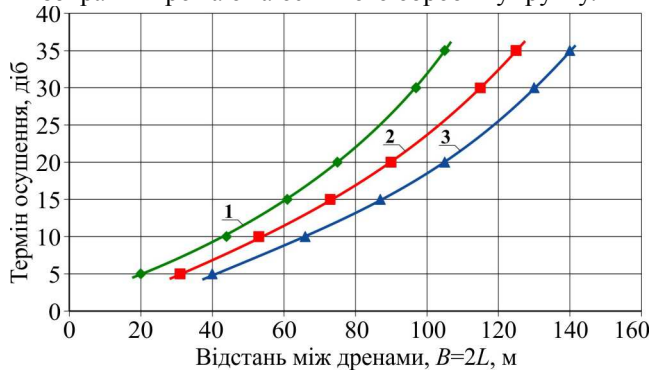
Для повторного використання ДСВ рисових систем за умови розбавлення прісною водою у співвідношенні 1:1 та 1:2 розроблено (Patent 115157 of Ukraine, IPC, 2017) та запропоновано конструктивні зміни водозабірної вузла насосної станції ПРЗС (рис. 3).



**Рис. 3.** Схеми подачі та відводу води на ПРЗС: а – наявна; б – запропонована; 1 – насос; 2 – насосна станція; 3 – сміттєзатримувальна решітка; 4 – шлюз; 5 – всмоктувальний трубопровід; 6 – напірний трубопровід; 7 – басейн для подачі ДСВ на зрошення; 8 – водозабір для прісної води; 9 – магістральний трубопровід; 10 – головний скидний канал; 11 – водозабір ДСВ; 12 – басейн для накопичення ДСВ; 13 – засувка; 14 – аванкамера; 15 – низьконапірний трубопровід

Проведені дослідження на ПРЗС показали, що на території лише Кілійської РЗС (3,5 тис. га) можна використати для зрошення додатково до 15 млн м<sup>3</sup> слабомінералізованих ДСВ або відповідно зменшити об'єм водозабору. Запровадження водооборотної технології водокористування на ПРЗС з розбавленням ДСВ прісною водою у співвідношенні 1:1 та 1:2 дає змогу отримати величину чистого прибутку від 27000 до 28000 грн/га відповідно. При цьому економічно обгрунтованою зрошувальною нормою рису також є норма  $M^0 = 18$  тис. м<sup>3</sup>/га.

Навний досвід і теоретичний аналіз свідчать, що ефективно регулювання водно-повітряного режиму ґрунтів за допомогою дренажу доцільне та технічно можливе у достатньо водопроникних ґрунтах ( $K_f \geq 0,5$  м/добу). Стосовно ґрунтів рисових систем проблема збільшення водопроникності верхніх шарів ґрунту є особливо актуальною. Внаслідок тривалого перезволоження водно-фізичні властивості ґрунтів погіршилися настільки, що останні стали своєрідним водоупором. Тому, для забезпечення необхідного рівня промивності ґрунтів ПРЗС по площі та профілю поливної карти пропонують, як ефективний агроеліоративний захід підвищення водопроникності важких ґрунтів, проведення глибокого розпушення. У період вирощування рису попередньо проведене розпушення ґрунту на рисовому полі забезпечує більш рівномірну фільтрацію поливної води по площі та профілю рисової карти. Створювані швидкості є достатніми для винесення легкорозчинних солей з активного шару та покращення його кисневого режиму. А в післяполивний осінній період забезпечується швидке пониження РГВ (рис. 4), пришвидшення збирання врожаю та осіннього обробітку ґрунту.



**Рис. 4.** Залежність часу осушення ( $H=1,5$  м) від відстані між дренами: 1 – без розпушення; 2 – несугільне розпушення; 3 – сугільне розпушення

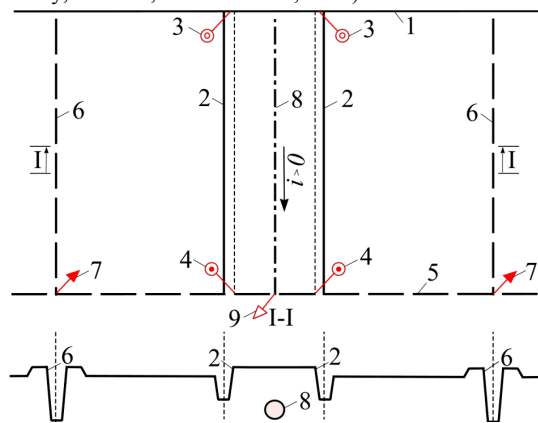
Так, за відстані між дренажними каналами  $B=100$  м осушення рисового поля на глибину 1,5 м після скиду води відбувається за 28-30 дб. У разі проведення несугільного розпушення на фоні дренажу з аналогічними параметрами, зниження РГВ до такої глибини відбувається за 23-25 дб, а в разі сугільного розпушення – за 16-18 дб. Отже, відстань між дренами в разі влаштування систематичного закритого дренажу на важких ґрунтах рисових систем завдяки проведенню періодичного розпушення та інтенсифікації його роботи, можна збільшити на 35...50 %.

Під час освоєння нових територій під РЗС або після тривалого вирощування супутніх культур може виникнути потреба в інтенсивному промиванні засоленних земель. Розроблено спосіб промивання засоленних земель рисових систем на фоні глибокого розпушення (Patent 112204 of Ukraine, IPC, 2016). Перевагою запропонованого способу є рівномірне розсолення ґрунтів по профілю та всій площі рисового поля та на більшу глибину, зменшення тривалості промивання, швидке пониження рівня ґрунтових вод у післяпромивний період.

Щодо конструкції та оптимальних параметрів дренажно-скидної мережі за розглянутими розробками, сформовано варіанти досліджень, за якими було здійснено оптимізацію основних конструктивних елементів РЗС з урахуванням оптимальних параметрів середньої швидкості вертикальної фільтрації на рисовому

чеку для встановленого оптимального показника частки рису в сівозміні – 50...60 %:

- варіанти 1...3 – конструкція та параметри дренажу, згідно з рекомендаціями С. П. Мендуса (Mendus, 2016);
- варіанти 4...8 – удосконалена конструкція дренажно-скидної мережі на картах-чеках шляхом улаштування проміжних закритих дренажних колекторів (рис. 5) (Patent 104000 of Ukraine, IPC, 2015);
- варіанти 9...12 – конструкція та параметри наявної дренажно-скидної мережі у вигляді відкритих каналів (Rokoshinskiy, Mendus, & Turcheniuk, 2016).



**Рис. 5.** Карта-чек широкого фронту загоплення, дооснащена закритою дреною-колектором: 1 – розподільчий зрошувальний канал; 2 – зрошувач-скид; 3 – водовипуск у зрошувач-скид; 4 – водовипуск із зрошувача-скиду; 5 – груповий скидний канал; 6 – картова дрена відкритого типу; 7 – підпірна споруда; 8 – закрыта дрена-колектор; 9 – регуляційна споруда

Узагальнені результати такої оцінки наведено в табл. 3.

**Табл. 3.** Основні результати оптимізаційних розрахунків для ПРЗС щодо обґрунтування оптимальних параметрів дренажу на рисових картах-чеках

Варіант ПР	Відстань між дренами, м	Глибина залягання РГВ в осінньо-зимовий період, м	Швидкість вертикальної фільтрації з поверхні рисового поля, мм/добу	Показник приведених витрат з урахуванням погодно-кліматичного ризику
1	50	1,86	27,1	1,86
2	75	1,78	12,0	1,32
3	85	1,75	9,4	0,84
4	100	1,59	6,8	0,74
5	125	1,49	4,7	0,94
6	150	1,35	3,0	1,16
7	175	1,23	2,2	1,55
8	200	1,11	1,7	1,83
9	225	0,95	1,3	2,50
10	250	0,83	1,0	2,80
11	300	0,60	0,7	4,60
12	500	0,40	0,2	5,34

Наведені результати засвідчують, що економічно вигідний та екологічно прийнятний варіант проектних рішень щодо розрахункової відстані між дренажно-скидними каналами і додатковими закритими дренами-колекторами для умов ПРЗС є варіант з відстанню 100 м. Така міждренна відстань, на відміну від наявної 200...500 м, забезпечує створення та підтримання на рисовому полі промивного водного режиму з оптимальною інтенсивністю вертикальної фільтрації 6...10 мм/добу.

**Обговорення результатів дослідження, запровадження оптимізаційного методу щодо ефективності функціонування РЗС.** Дотепер у теорії та практиці створення і функціонування водогосподарсько-меліоративних об'єктів методи та моделі оптимізації розглядали та використовували в основному для обґрунтування

локальних одиничних рішень. Переважно це стосувалось окремих елементів системи або режимів чи технологій водорегулювання, зокрема оптимальних параметрів дренажу, магістральних каналів, режимів зрошення тощо.

За результатами проведених теоретичних та експериментальних досліджень удосконалено наукові підходи до системної оптимізації на еколого-економічних закладах водо- та енергокористування на РЗС за різнорідними критеріями оптимізації щодо різних рівнів прийняття в часі, які ґрунтуються на системному розгляді рисової системи як складної природно-технічної еколого-економічної системи.

На основі системної оптимізації розроблено комплекс режимних, технологічних та технічних заходів щодо необхідності й доцільності переходу від традиційного ресурсозатратного на раціональний та ресурсощадний рівні водо- та енергокористування. Режимно-технологічні заходи передбачають повторне використання дренажно-скидних вод, застосування глибокого розпушення з використанням відповідних малоенергозатратних насосних агрегатів, періодичного промивання засолених ґрунтів на фоні глибокого розпушення. Конструктивні заходи передбачають дооснащення наявної відкритої дренажно-скидної мережі закритими дренами-колекторами, влаштування приукісного дренажу для захисту дренажно-скидних каналів від деформацій русла. Цей комплекс заходів спрямований на підвищення загальної ефективності функціонування РЗС відповідно до сучасних економічних й екологічних вимог.

Системна оптимізація режимних, технологічних і конструктивних рішень на РЗС дає змогу підвищити загальну ефективність функціонування. При цьому враховують економічні та екологічні вимоги через узгодження параметрів, рівня конструктивної та екологічної надійності й відповідно вартості цих рішень з рівнем створюваного загального ефекту під час реалізації.

### Висновки

1. Набули подальшого розвитку теоретичні засади щодо системної оптимізації різнорідних та взаємопов'язаних режимних, технологічних і технічних рішень з водо- та енергокористування на функціональних РЗС як складних природно-технічних еколого-економічних системах. Цей підхід забезпечує комплексне оцінювання різних аспектів функціонування РЗС.

2. Удосконалено науково-методичні підходи до побудови та реалізації комплексних моделей оптимізації з різнорідними критеріями економічної й екологічної оптимальності. Це дає змогу у взаємозв'язку оцінити загальну режимну, технологічну та технічну економічну й екологічну ефективність функціонування РЗС.

3. На основі системної оптимізації розроблено комплекс різнорідних та взаємопов'язаних режимних, технологічних і технічних рішень, спрямованих на підвищення загальної ефективності функціонування РЗС відповідно до сучасних економічних й екологічних вимог, удосконалено методи обґрунтування параметрів. Економія водних та енергетичних ресурсів на РЗС становить 20...50 %.

### Перелік використаних джерел

Botes, J. H. F., Bosch, D. J., & Oosthuizen, L. K. (1996). A simulation and optimization approach for evaluating irrigation information. *Agricultural Systems*, 51(2), 165–183.



- Karuk, B. P. (1989). *Environmental substantiation of projects of meliorative systems: Summary of lectures*. Izd-e VIPK Minvodstroy USSR. 110 p.
- Kovalchuk, P. I., & Michalska, T. O. (1994). System modeling for estimation of efficiency of resource-saving technologies of watering control. *Reclamation and water economy*, 81, 30–35.
- Mendus, S. P. (2016). Measures to improve the efficiency of drainage work on rice systems. *Bulletin of the National University of Water Management and Natural Resources*, 2, 3–8.
- Monaco, F., & Sali, G. (2018). How water amounts and management options drive Irrigation Water Productivity of rice. A multivariate analysis based on field experiment data. *Agricultural Water Management*, 195(1), 47–57.
- Patent 104000 of Ukraine, IPC. (2015). E02V 13/00, E02V 11/00. Map-check of a rice system with a closed drain collector. A. Rokochinskiy, V. Turcheniuk, S. Kropivko; owner of NUVGP. № 2015 06186; stated. June 23, 2015; Publications Jan 12, 2016, Bul. №1. 6 p. [in Ukrainian].
- Patent 112204 of Ukraine, IPC. (2016). E02V 11/00. A method of washing saline rice systems. A. Rokochinsky, V. Turchenyuk, S. Mendus, N. Prikhodko; owner of NUVGP. No. 2016 05373; stated. May 18, 2016; Publications 12.12.2016, Byul. No. 23. 5 p. [in Ukrainian].
- Patent 115157 of Ukraine, IPC. (2017). A.01G16/00, A.01G 25/16 (2016.01), A.01G27/00, E.02B 13/00. Rice irrigation system with recyclable drainage and waste water. V. Turcheniuk, A. Rokochinskiy, S. Kropivko; owner of NUVGP. Application No. U2016 08960; application dated 22.08.2016; Publications Apr 10, 2010, Bul. No. 7. 4 p. [in Ukrainian].
- Paudyal, G. N., Pandit, D. S., & Goto, A. (1991). Optimization of design of on-farm channel network in an irrigation area. *Irrigation and Drainage Systems*, 5(4), 383–395.
- Rokochinskiy, A., Mendus, S., & Turcheniuk, V. (2016). Substantiation of evaluation criteria for overall functioning efficiency of Ukrainian Danube rice irrigation systems. *International Journal of New Economics and Social Sciences*, 1(3), 154–161.
- Soundharajan, B., & Sudheer, K. P. (2009). Deficit irrigation management for rice using crop growth simulation model in an optimization framework. *Paddy and Water Environment*, 7(2), 135–149.
- Turchenyuk, V., Frolenkova, N., & Rokochinskiy, A. (2017). Environmental and economic foundations of system optimization of operational, technological and construction parameters of rice irrigation systems. *Environmental Economics*, 8(2), 76–82.
- Van Niel, T. G., & Mc Vicar, T. R. (2004). Current and potential uses of optical remote sensing in rice-based irrigation systems: a review. *Journal of Agricultural Research*, 55(2), 155 p.
- Yakuba, S. (2017). Parameters of Optimization of Rice Irrigation Systems for Ensuring Energy Safety of the Water Utility Complex of the Lower Kuban. *Polytechnic Network Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University*, 34, 109–113.

**В. А. Турченко**

*Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно, Украина*

## УЛУЧШЕНИЕ ВОДО- И ЭНЕРГОПОЛЬЗОВАНИЯ НА РИСОВЫХ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Разработан и предложен метод системной оптимизации для улучшения водо- и энергопользования при функционировании рисовых оросительных систем (РОС). Сформулированы подходы к выбору критериев и условий экономической и экологической оптимизации при построении комплексных оптимизационных моделей в проектах их реконструкции и эксплуатации. Научно обоснована совокупность разнородных и взаимосвязанных показателей (глубина уровня грунтовых вод в межвегетационный период – для риса и в вегетационный период – для сопутствующих культур, минерализация грунтовых вод, длительность периода со стоянием уровня грунтовых вод ниже критической глубины, степень засоления активного слоя почвы, скорость фильтрации из поверхности рисового чека, оросительная норма риса, общий объем перекачанной воды) как критериев оценивания общей эффективности водо- и энергопользования на действующих РОС. На основе системной оптимизации разработан комплекс разнородных и взаимосвязанных режимных, технологических и технических решений, направленных на повышение общей эффективности функционирования РОС в соответствии с современными экономическими и экологическими требованиями, усовершенствованы методы обоснования параметров. Экономия водных и энергетических ресурсов на РОС составляет 20...50 %.

**Ключевые слова:** системная оптимизация; водо- и энергосбережение; рисовая оросительная система; эколого-экономический эффект.

**V. A. Turcheniuk**

*National University of Water Management and Natural Resources, Rivne, Ukraine*

## IMPROVEMENT OF WATER AND ENERGY USE ON RICE IRRIGATION SYSTEMS

Taking into consideration scientific research and engineering materials which embrace half century period and reflect weather-climatic changes, mode-technological and socio-economic conditions on acting rice irrigation systems in Ukraine, theoretical foundations as for systemic optimization of varied and interrelated mode, technological and technical solutions of water and energy management on acting rice irrigation systems received future development; number of indexes as estimated criteria of their general efficiency and their parameters considering nature-ameliorative changing conditions in fixed time periods and possible efficiency levels was scientifically determined; character and contact level among them were established. Based on systemic optimization series of interrelated modes, technological and technical measures as for necessity and expediency of trans-passing from traditional resource-cost to rational resource-saving level of water and energy management, re -usage of drainage-waste waters, performing deep earth loosening with improved low-cost techniques, periodic saline soils flushing including deep soil loosening, upgrading existing open drainage-waste network on close drain-collectors, arrangement off-cannel drainage system to protect drainage-waste canals from their route deviation were worked out. These measures are directed on rising general efficiency of acting rice irrigation systems considering modern economic and ecologic requirements. Sustainable mode methods were improved. Scientific approaches to systemic optimization based on ecology-economic measures of general nature-amelioration mode of rice systems, technological and technical solutions of water and energy management which sustain it in various criteria in different time levels based on systemic observation of rice systems as a complex nature-technical ecology-economic system were upgraded. On ecology-economic principles general notions formation and implementation of systemic optimization complex models which are interrelated with regime, technology and constructive water and energy management solutions on rice irrigation systems for a long term period were worked out. Optimal parameters of various indexes: mode (speed filtration), technological (irrigated rice standard, rice quota in crop rotation, dilution degree of reused drainage-waste waters) and constructive solutions (construction and drainage parameters of check-maps including deep earth loosening) for the developed complex of measures to increase efficiency of acting rice systems were substantiated.

**Keywords:** systematic optimization; water and energy management; rice irrigation system; ecology-economic effect.