

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202101-277>

Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/277>

УДК 631.6: 631.432

## МОДЕЛІ СИСТЕМНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ДЛЯ СТВОРЕННЯ Й ФУНКЦІОНУВАННЯ ДРЕНАЖНИХ СИСТЕМ У СУЧАСНИХ УМОВАХ

А.М. Рокочинський<sup>1</sup>, докт. техн. наук, П.П. Волк<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0002-5248-6394>; e-mail: [a.m.rokochinskiy@nuwm.edu.ua](mailto:a.m.rokochinskiy@nuwm.edu.ua)

<sup>2</sup> Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0001-5736-8314>; e-mail: [p.p.volk@nuwm.edu.ua](mailto:p.p.volk@nuwm.edu.ua)

**Анотація.** Виклики сучасності та зміни клімату визначають за необхідне розробку нових підходів, методів та моделей на основі розвитку загальної теорії оптимізації для обґрунтування оптимального типу, конструкції та параметрів дренажних систем на еколого-економічних принципах. Розроблено моделі системної оптимізації технологічних та конструктивних рішень при створенні й функціонуванні дренажних систем. Представляється, що дренажна система – це складна природно-технічна еколого-економічна система. Знаходження загального (глобального) оптимуму в такій системі на основі системної оптимізації полягає в обґрунтуванні проміжних локальних оптимумів для всіх її основних складових різномірних елементів (ефект, режим, технологія, конструкція) у їх взаємозв'язку. Розроблено загальні принципи побудови та реалізації комплексних моделей системної оптимізації, які включають в себе модель економічної оптимізації, що побудована за традиційним економіко-математичним підходом, а її екологічна складова, як обмеження, визначає прийнятність оптимального економічного рішення. Розглянуто критерії економічної та екологічної оптимізації щодо різних рівнів прийняття управлінських рішень у часі (1-проект, 2-планова експлуатація, 3-оперативне управління) та комплекс прогнозно-імітаційних моделей з їх визначення за довготерміновим прогнозом на багатоваріантній основі з урахуванням змінних природно-агро-меліоративних умов реального об'єкта. Практична реалізація прогнозно-імітаційних та оптимізаційних розрахунків виконується на основі застосування відповідного інструментарію, яким є САПР або сучасні BIM-технології. Використання системної оптимізації дозволить підвищити загальну технічну, технологічну та еколого-економічну ефективність створення й функціонування дренажних систем.

**Ключові слова:** системна оптимізація, створення та функціонування, дренажна система, еколого-економічні засади

**Актуальність дослідження.** Меліорації земель належить провідна роль у стабілізації ресурсного і продовольчого забезпечення нашої держави та світу загалом, роль потужного страхового фонду, передусім, в екстремальні за погодними умовами роки. Зважаючи на високу соціальну значущість меліорацій, особливо з огляду на глобальні кліматичні зміни та формування цивілізованих земельно-ринкових відносин, європейський та світовий досвід, водні, гідротехнічні, агротехнічні та інші види меліорацій, вимагають сучасних інноваційних рішень, спрямованих на досягнення сталої продовольчої, енергетичної, екологічної та економічної безпеки держави [1].

За узагальненими дослідженнями фахівців та вчених Укргідромету, Інституту водних проблем і меліорації НААН, Одеського державного екологічного університету [1; 2 та ін.], що підтверджено також і нашими дослідженнями [3; 6 та ін.], при наявних темпах та рівнях змін клімату вже відбуваються зміни

природно-меліоративних умов у зоні Полісся та України загалом. Підвищення температури повітря, збільшення кліматичного дефіциту та посилення посушливості в Поліському регіоні призводить до збільшення сумарного випаровування, загальної водопотреби та регулярного зволоження при вирощуванні сільськогосподарських культур, в тому числі й на осушуваних землях

Тому, надзвичайно актуальним постає питання щодо зміни підходів до створення й функціонування водогосподарсько-меліоративних об'єктів, удосконалення технологій водорегулювання відповідно їх типів, конструкції й параметрів, що адаптовані до цих змін [4].

Зважаючи на викладене, метою дослідження є подальший розвиток загальної теорії оптимізації, розробка методів й моделей для обґрунтування оптимальних режимних, технологічних та технічних параметрів дренажних систем (ДС) на еколого-

економічних засадах в їх взаємозв'язку для підвищення загальної ефективності при їх створенні та функціонуванні.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Проаналізувавши раніше проведені дослідження [5; 6; 7 та ін.], нами було розроблено загальні підходи, методи та моделі оптимізації технічних і технологічних рішень з водорегулювання осушуваних земель на еколого-економічних засадах шляхом:

- переходу від усталеної практики розгляду меліоративних об'єктів не суто як технічних, а як складних природно-технічних систем;

- визначення наявності в такій системі структурного зв'язку між різнорідними елементами виду *ефект*  $\Leftrightarrow$  *режим*  $\Leftrightarrow$  *технологія*  $\Leftrightarrow$  *конструкція*;

- розробки принципів побудови й реалізації комплексних моделей оптимізації режимно-технологічних та конструктивних рішень із водорегулювання осушуваних земель, які включають в себе модель економічної оптимізації, що побудована за традиційним економіко-математичним підходом, а її екологічна складова, як обмеження, визначає прийнятність оптимального економічного рішення:

$$\begin{cases} U_0 = \text{extr}_{\{i\}} U_i \cdot \alpha_p, i = \overline{1, n_i}; \\ Z_0 = \text{extr}_{\{j\}} Z_j \cdot \alpha_p, j = \overline{1, n_j}; i = \overline{1, n_i}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $U_0$ ,  $Z_0$  – відповідні екстремальні значення за прийнятою умовою обраних критеріїв економічної  $U$  та екологічної  $Z$  оптимальності, що відповідає оптимальному технічному або технологічному рішенню (ТТР) за сукупністю можливих варіантів  $I = \{i\}$ ,  $i = \overline{1, n_i}$ ;  $Z_j$  – сукупність  $\{j\}$ ,  $j = \overline{1, n_j}$  критеріїв (фізичних показників) екологічної ефективності відповідних варіантів ТТР;  $\alpha_p$  – відомі (визначені 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,  $\sum_{p=1}^{n_p} \alpha_p = 1$ ;

- обґрунтування критеріїв економічної та екологічної оптимізації щодо різних рівнів прийняття управлінських рішень у часі (1-проект, 2-планова експлуатація, 3-оперативне управління);

- розробки комплексу прогнозно-імітаційних моделей з прогнозою оцінки на довготерміновій основі змінних природно-агро-меліоративних умов реального об'єкта.

За такими принципами та науково-методичними підходами нами було розроблено, на відміну від економіко-математичного методу, що був застосований В.Г. Мурановим та М.О. Лазарчуком [8], методи та моделі для обґрунтування оптимальних параметрів сільськогосподарського дренажу при осушуванні земель із дотриманням сучасних економічних та екологічних вимог [6; 9].

При цьому, виходячи з визначення поняття гідромеліоративної системи (ГМС), які свого часу було представлено різними дослідниками як: *метеоролого-економічна система* (Жуковський Є.Є., 1981); *складна природно-технічна система* (Рекс Л.М., 1995; Рокочинський А.М., 2002, 2010 та ін.); *організована еколого-економічна система* (Фроленкова Н.А., 2006 та ін.); *соціо-природно-технічна система* (Ковальчук В.П., 2016); *складна природно-технічна еколого-економічна система* (Рокочинський А.М., 2016; Турченко В.О., 2018), встановлених нами зв'язків між різнорідними елементами та притаманних таким системам характерних технологічних, економічних та екологічних ознак, пропонуємо ДС, як невід'ємну складову сучасного водогосподарсько-меліоративного комплексу або водної галузі країни, розглядати як *водогосподарсько-меліоративну систему* (ВМС) та, відповідно, як *складну природно-технічну еколого-економічну систему* (СПТЕЕС).

Необхідною умовою є знаходження загального (глобального) оптимуму в таких системах тільки на основі застосування *системної оптимізації*, суть якої полягає в знаходженні проміжних локальних оптимумів для всіх її основних складових різнорідних елементів в їх взаємозв'язку [5; 6; 7]. При цьому, для сучасного рівня розвитку водогосподарсько-меліоративної та аграрної науки, системна оптимізація з обґрунтування оптимальних проектних рішень (ПР) щодо типу, конструкції й параметрів ДС та складових її технічних елементів здійснюється на наявний, визначений або заданий рівень економічної (врожайність сільськогосподарських культур) та екологічної ефективності функціонування досліджуваного об'єкта.

За такими принципами та науково-методичними підходами системної оптимізації нами (В.О. Турченко, А.М. Рокочинський, 2018) було виконано обґрунтування оптимальних параметрів режимних, технологічних та конструктивних рішень щодо водокористування на рисових зрошувальних системах у їх взаємозв'язку [10; 11]. При цьому, розглядаючи

окремі елементи щодо режиму та технології зрошення рису й конструкції карт-чеків при заданому рівні ефективності, нами не було отримано оптимального рішення щодо типу та конструкції рисової системи в цілому.

**Методи та матеріали дослідження.** Ґрунтуються на застосуванні теорії систем з основами системного аналізу та моделювання при розробці сучасних підходів до оптимізації режимних, технологічних та технічних рішень щодо створення та функціонування ДС на еколого-економічних засадах. Системний підхід включає в себе: розгляд ДС як СПТЕЕС; дослідження їх елементів, закономірностей функціонування і розвитку; декомпозицію складних цілей і задач переважно ієрархічної природи, притаманних таким системам; застосування методології низхідної ієрархії аналізу та висхідної ієрархії синтезу при розробці прогнозно-оптимізаційних моделей і методів їхньої реалізації.

**Результати дослідження та їх обговорення.** Виклики сучасності щодо енергетичної, продовольчої, водної та екологічної безпеки, а також зміни клімату визначають за необхідне розробку й реалізацію відповідних адаптивних заходів у зоні осушувальних меліорацій щодо удосконалення технологій водорегулювання відповідно їх типу, конструкції та параметрів ДС з урахуванням змінних кліматичних умов [5; 6].

У зв'язку з цим, виникає необхідність пошуку нових підходів, методів та моделей на основі розвитку загальної теорії оптимізації щодо застосування системної оптимізації для обґрунтування оптимальних ПР щодо типу, конструкції та параметрів ДС в цілому та окремих їх технічних елементів із дотриманням сучасних екологічних й економічних вимог.

Вирішення такого завдання потребує, насамперед, розробки моделі системи, де відбуваються складні природно-техногенні процеси з формування водного режиму осушуваних земель під дією зовнішніх як некерованих (природних), так і керованих (меліоративних) факторів, формуються загальний еколого-економічний ефект від їх сполученості та значення показників, що його характеризують.

За аналогією, та на відміну від моделі меліорованого поля на осушуваних землях, що розглянуто нами раніше [5; 6 та ін.], меліоративна система (МС) у складі системи сільськогосподарського виробництва (ССВ) (сільськогосподарських меліорованих полів із вирощуваними на них культурами) та конструктивно-технічних елементів ГМС або ДС, які виконують функцію регулювання водного й загального природно-меліоративного режимів у межах системи в їх взаємозв'язку, може бути представлено у такому вигляді (рис. 1).

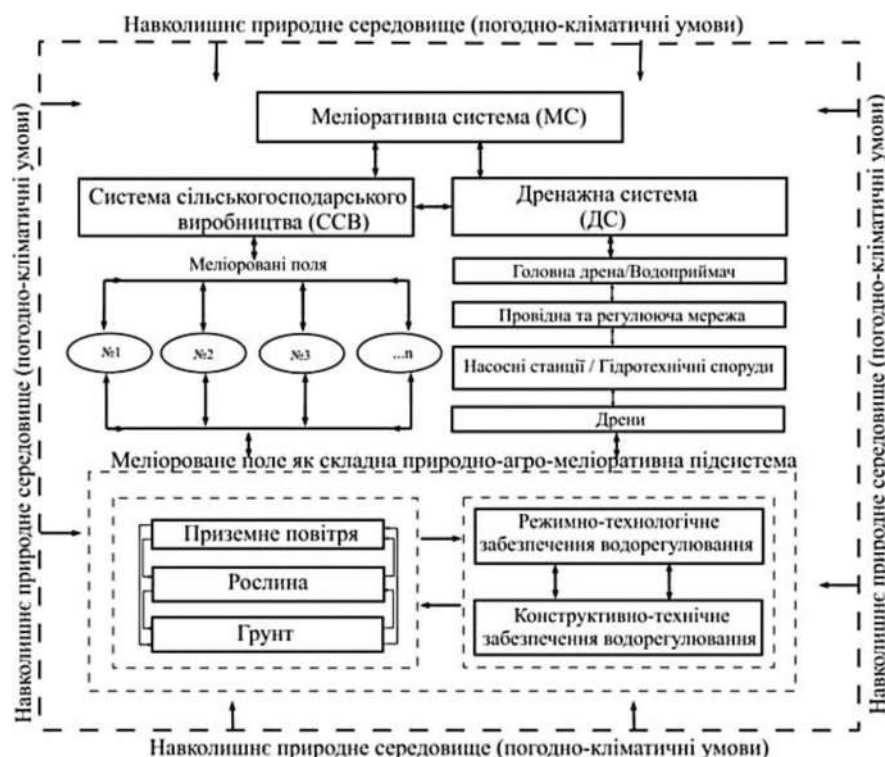


Рис. 1. Структурно-логічна схема взаємозв'язку основних різномірних складових та елементів ДС



Ланки такої системи (відповідні підсистеми) взаємопов'язані як різномірні складові елементи, що взаємодіють між собою та з оточуючим середовищем. В представленій системі в рамках кожного окремо взятого меліорованого поля ССВ реалізується водний режим осушуваних земель, який забезпечують регулюючі елементи ДС, вирощуються певні сільськогосподарські культури та формується загальний еколого-економічний ефект у межах полів та ДС в цілому у змінному часі та просторі.

Виходячи з представленої структурної моделі системи, сумарний (інтегральний) еколого-економічний ефект, який відповідає оптимальному рівню технічної, технологічної, економічної та екологічної ефективності роботи ДС, що створюється при її функціонуванні в часі ( $\tau$ ) та просторі ( $f$ ), в загальному випадку може бути визначений за моделлю виду

$$Y^o = \int_0^{T_{np}} \int_0^{F_s} y_i^o(T_i, F_i) d\tau df, \quad i = \overline{1, n_i}, \quad (2)$$

де  $Y^o$  – оптимальний інтегральний еколого-економічний ефект, створений при функціонуванні системи відповідно до діючих вимог;  $y_i^o$  – параметри оптимального загального еколого-економічного ефекту, який створюється від дії та взаємодії взаємозв'язаних між собою різномірних складових елементів ДС сукупності  $\{i\}$ ,  $i = \overline{1, n_i}$  та оточуючим середовищем;  $T_i$ ,  $T_{np}$  – відповідні періоди функціонування за  $i$ -ми різномірними елементами та системи в цілому;  $F_i$ ,  $F_s$  – відповідні площі за  $i$ -ми різномірними елементами та системи в цілому.

За аналогією з [10; 11 та ін.]

$$y_i^o = f_1^* \left( f_2^* \left( f_3^* \left( z_i^o \right) \right) \right), \quad i = \overline{1, n_i}, \quad (3)$$

де  $f_1^*$  – функція оптимізації параметрів природно-меліоративного режиму  $\theta R_i$ ,  $i = \overline{1, n_i}$  у межах системи;  $f_2^*$  – функція оптимізації параметрів технологій водорегулювання  $\theta S_i$ ,  $i = \overline{1, n_i}$  на системі;  $f_3^*$  – функція оптимізації параметрів конструктивних рішень щодо ДС  $\theta K_i$ ;  $z_i^o$  – оптимальні параметри відповідно різномірних елементів системи, що розглядаються, сукупності  $\{i\}$ ,  $i = \overline{1, n_i}$ , які взаємопов'язані між собою та оточуючим середовищем.

Пошук оптимальних параметрів складових складеної функції (3) і, в перш за все, параметрів режимів та пов'язаних з ними технологічних рішень щодо технологій водорегулювання і технічних рішень щодо типу,

конструкції та параметрів системи, що їх забезпечують, а також складових їх технічних елементів, залежно від створюваного загального еколого-економічного ефекту, формально може бути здійснений послідовно через відповідні обернені функції:

– щодо оптимальних параметрів режимів водорегулювання  $z_2^o$ ,

$$z_2^o = f_1^{*-1} \left( \hat{y}_i \right), \quad i = \overline{1, n_i}, \quad (4)$$

– щодо оптимальних параметрів технологій  $z_3^o$ ,

$$z_3^o = f_2^{*-1} \left( f_1^{*-1} \left( \hat{y}_i \right) \right), \quad i = \overline{1, n_i}, \quad (5)$$

– щодо оптимальних параметрів конструкції  $z_4^o$ ,

$$z_4^o = f_3^{*-1} \left( f_2^{*-1} \left( f_1^{*-1} \left( \hat{y}_i \right) \right) \right), \quad i = \overline{1, n_i}, \quad (6)$$

де  $\hat{y}_i$  – задані або прийняті параметри загального еколого-економічного ефекту за відповідними різномірними елементами системи.

Для реалізації функцій оптимізації (2)-(6) слід використовувати результати досліджень закономірностей взаємопов'язаних процесів руху води, як в основних складових елементах підсистем, так і в системі загалом, а також існуючі підходи до розв'язання оптимізаційних задач у СПТЕЕС.

У такій постановці моделі (2)-(6) у загальному неявному вигляді дають змогу теоретично обґрунтовувати можливість постановки задачі, пошуку та визначення послідовно сукупності оптимальних режимних, технологічних й конструктивних рішень щодо різномірних складових елементів та системи в цілому в їх взаємозв'язку. Бодай на емпіричному чи емпірико-функціональному рівні визначення залежності між ними.

За результатами розглянутих передумов та виконаного теоретичного аналізу щодо системної оптимізації технологічних й конструктивних рішень в СПТЕЕС, до яких відносяться ДС, управлінська модель оптимізації, що покладена в основу реалізації оптимізаційного підходу за економіко-математичним методом, згідно з [5; 6; 7; 9 та ін.], в загальному вигляді представляється як

$$Z_i^o = \text{extr}_{\{m_i\}} \left( Z_{m_i} \right), \quad m_i = \overline{1, n_{m_i}}, \quad i = \overline{1, n_i}, \quad (7)$$

де  $Z_i^o$  – екстремальні значення за прийнятими умовами обраних критеріїв оптимальності, що відповідають множинним оптимальним ТТР за сукупністю різномірних елементів  $\{i\}$ ,  $i = \overline{1, n_i}$  та системи в цілому;

$Z_{m_i}$  – значення критеріїв оптимальності за сукупністю можливих альтернативних варіантів реалізації  $i$ -того елемента в межах системи  $\{m_i\}$ ,  $m_i = \overline{1, n_{m_i}}$ ,  $i = \overline{1, n_i}$ .

Виходячи з структурної моделі ДС (див. рис.1.) та встановленого характеру зв'язків між різнорідними елементами системи взагалі за математичними моделями (2)–(6), складний внутрішній взаємозв'язок між її різнорідними елементами може бути представлений за такою структурно-ієрархічною схемою (рис. 2)

Отож, на підставі подальшого узагальнення характеру і структури зв'язків за загальними моделями оптимізації в неявному вигляді (2)–(6), принципів побудови комплексної моделі оптимізації (1) та структурно-ієрархічної схеми взаємозв'язку між основними складовими різнорідними елементами системи (рис. 2.), комплексна модель системної оптимізації з послідовного обґрунтування режимних, технологічних та конструктивних рішень у їх взаємозв'язку при створенні та функціонуванні ДС, з урахуванням сучасних економічних та екологічних вимог, у загальному вигляді може бути представлена як

$$\begin{cases} U_v^0 = \text{extr}_{\{i\}} \left\{ \sum_{ikgpls\phi\theta=1}^{n_{ikgpls\phi\theta}} \right\} \left( \sum_{p=1}^{n_p} \bar{U}_{ikgpls\phi\theta}^0 \times \alpha_p \right) \times \\ \times f_i \times f_k \times f_g \times f_p \times f_l \times f_s \times f_\phi \times f_\theta, v = \overline{1, n_v}, i = \overline{1, n_i}; \\ Z_v^0 = \text{extr}_{\{i\}} \left\{ \sum_{ikgpls\phi\theta=1}^{n_{ikgpls\phi\theta}} \right\} \left( \sum_{p=1}^{n_p} Z_{ikgpls\phi\theta} \times \alpha_p \right) \times \\ \times f_i \times f_k \times f_g \times f_p \times f_l \times f_s \times f_\phi \times f_\theta, v = \overline{1, n_v}, i = \overline{1, n_i}, \end{cases} \quad (8)$$

де  $U_v^0$ ,  $Z_v^0$  – відповідно екстремальні значення за прийнятою умовою обраних критеріїв економічної  $\bar{U}_{ikgpls\phi\theta}^0$  та екологічної  $Z_{ikgpls\phi\theta}$  оптимальності, що відповідають оптимальним режимним, технологічним та конструктивним параметрам ДС щодо різних рівнів ієрархії прийняття рішень за різнорідними елементами системи,  $v = \overline{1, n_v}$ ,  $n_v = 8$ : у загальному випадку на рівні культур проєктної сівозміни ( $v=1$ ), сукупності  $\{k\}$ ,  $k = \overline{1, n_k}$ ; на рівні ґрунтів ( $v=2$ ), сукупності  $\{g\}$ ,  $g = \overline{1, n_g}$ ; на рівні розрахункових років ( $v=3$ ), сукупності  $\{p\}$ ,  $p = \overline{1, n_p}$ ; на рівні ґрунтово-меліоративних різниць ( $v=4$ ), сукупності  $\{l\}$ ,  $l = \overline{1, n_l}$ ; на рівні технологій і схем водорегулювання на системі ( $v=5$ ),

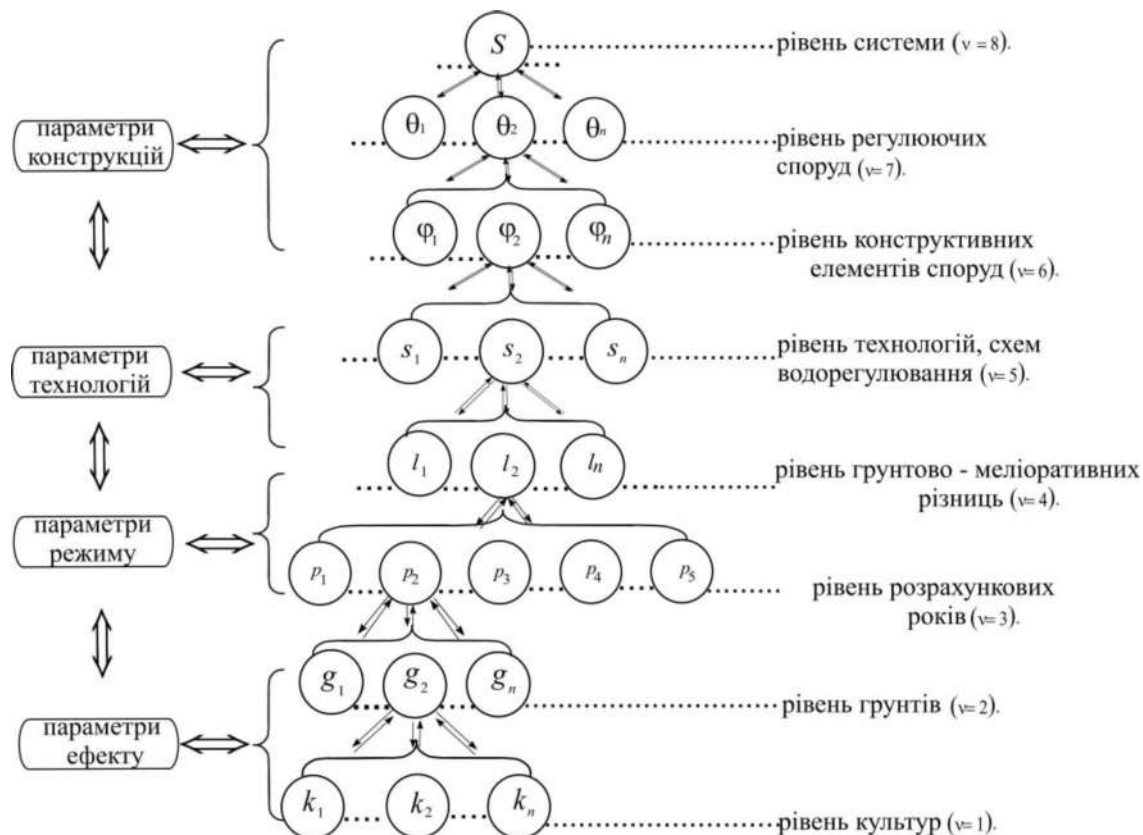


Рис. 2. Структурно-ієрархічна схема взаємозв'язку основних складових різнорідних елементів при функціонуванні ДС

сукупності  $\{s\}$ ,  $s = \overline{1, n_s}$ ; на рівні конструктивних елементів споруд ( $v = 6$ ), (наприклад дренажу – вид, конструкція, матеріал, фільтр та ін.), сукупності  $\{\phi\}$ ,  $\phi = \overline{1, n_\phi}$ ; на рівні регулюючих споруд системи ( $v = 7$ ) (магістральний канал, канали провідної мережі, шлюзи-регулятори, дренаж тощо), сукупності  $\{\theta\}$ ,  $\theta = \overline{1, n_\theta}$  та на рівні системи в цілому ( $v = 8$ );  $f_i \times f_k \times f_g \times f_p \times f_l \times f_s \times f_\phi \times f_\theta$  – частки поширення у межах системи, відповідно щодо культур проектної сівозміни  $\{k\}$ ,  $k = \overline{1, n_k}$ ; ґрунтових умов  $\{g\}$ ,  $g = \overline{1, n_g}$ ; розрахункових років  $\{p\}$ ,  $p = \overline{1, n_p}$ ; ґрунтово-меліоративних різниць  $\{l\}$ ,  $l = \overline{1, n_l}$ ; конструктивних елементів  $\{\phi\}$ ,  $\phi = \overline{1, n_\phi}$  регулюючих споруд  $\{\theta\}$ ,  $\theta = \overline{1, n_\theta}$  та системи в цілому  $S$  за відповідними технологіями та схемами водорегулювання.

Отже, загальні принципи побудови та реалізації комплексних моделей системної оптимізації також включають в себе модель економічної оптимізації, що побудована за традиційним економіко-математичним підходом та обґрунтовує економічно оптимальне ПР, а її екологічна складова, як обмеження, визначає екологічну прийнятність оптимального економічного рішення.

Відповідно послідовний пошук оптимального (раціонального) значення критерію оптимізації щодо різних рівнів ієрархії прийняття рішень за різнорідними елементами системи як на довготерміновій, так і короткотерміновій основі знаходиться аналогічно до моделей (4–6).

Узагальнена структура реалізації комплексної моделі системної оптимізації режимних, технологічних та конструктивних параметрів ДС та її складових технічних елементів на еколого-економічних засадах подана на (рис. 3).

Характерними особливостями розробленої структури є блочна побудова та послідовна циклічність їх реалізації.

При цьому можна виділити такі відносно самостійні узагальнюючі блоки:

– блок формування вихідних даних за сукупностями основних природно-кліматичних, ґрунтово-меліоративних, режимно-технологічних, конструктивно-технологічних й інших чинників, які визначально впливають на вибір оптимального типу, конструкції та параметрів ДС (блок 2, рис. 3);

– блок формування варіантів ПР сукупності  $\{i\}$ ,  $i = \overline{1, n_i}$  за множинними прогнозно-імітаційними, режимно-технологічними та

конструктивно-технологічними змінними параметрами ДС (блок 3, рис. 3);

– блок формування прогнозно-імітаційних множинних змінних досліджуваного об'єкта за сукупностями: метеорологічних режимів  $\{\omega\}$ ,  $\omega = \overline{1, n_\omega}$ ; розрахункових років  $\{p\}$ ,  $p = \overline{1, n_p}$ ; культур проектної сівозміни  $\{k\}$ ,  $k = \overline{1, n_k}$ ; ґрунтів  $\{g\}$ ,  $g = \overline{1, n_g}$ ; ґрунтово-меліоративних різниць  $\{l\}$ ,  $l = \overline{1, n_l}$  (блок 4, рис. 3.);

– блок прогнозно-імітаційних розрахунків на довготерміновій основі за сукупністю відповідних моделей: метеорологічних умов місцевості [13], водного режиму і технологій водорегулювання [14] та продуктивності осушуваних земель [15], за результатами яких визначаються необхідні *вартісні* техніко-економічні показники, як складові економіко-математичних моделей оптимізації, та *фізичні* показники екологічної ефективності водного і загального природно-меліоративного режимів осушуваних земель на рівні кожного меліорованого поля ССВ (вироснуваної культури), а також диференційовані значення врожайності вирощуваних культур за варіантами ПР [9] (блок 5, рис. 3);

– блок формування режимно-технологічних множинних змінних досліджуваного об'єкта щодо технологій та *схем* водорегулювання за сукупностями  $\{s\}$ ,  $s = \overline{1, n_s}$  (блок 6, рис. 3);

– блок режимно-технологічних розрахунків передбачає визначення технологій та схем водорегулювання в межах ДС за принципом їх дії та впливу на режим вологи ґрунту й РГВ, а також основними технічними характеристиками і параметрами (нормами осушення, елементами техніки зволоження тощо), сукупності  $s = \overline{1, n_s}$  ( $n_s = 6$ ): осушення,  $s = 1$ ; попереджувальне шлюзування,  $s = 2$ ; неперервне зволожувальне шлюзування тривалим підпором рівнів води,  $s = 3$ ; періодичне зволожувальне шлюзування (циклічне підґрундове зволоження),  $s = 4$ ; зрошення дощуванням на фоні осушення,  $s = 5$ ; зрошення дощуванням на фоні попереджувального шлюзування,  $s = 6$ , а також можливих їх комбінацій в умовах системи (блок 7, рис. 3);

– блок конструктивно-технологічних множинних змінних технічних елементів щодо регулюючих споруд (головна дрена, провідна та регулююча мережа, насосні станції, гідротехнічні споруди тощо) сукупності  $\{\theta\}$ ,  $\theta = \overline{1, n_\theta}$ , а також конструктивних елементів цих споруд (вид матеріалу, діаметр, конструкції, параметри фільтрів, дренаж тощо) сукупності  $\{\phi\}$ ,  $\phi = \overline{1, n_\phi}$  (блок 8, рис. 3);



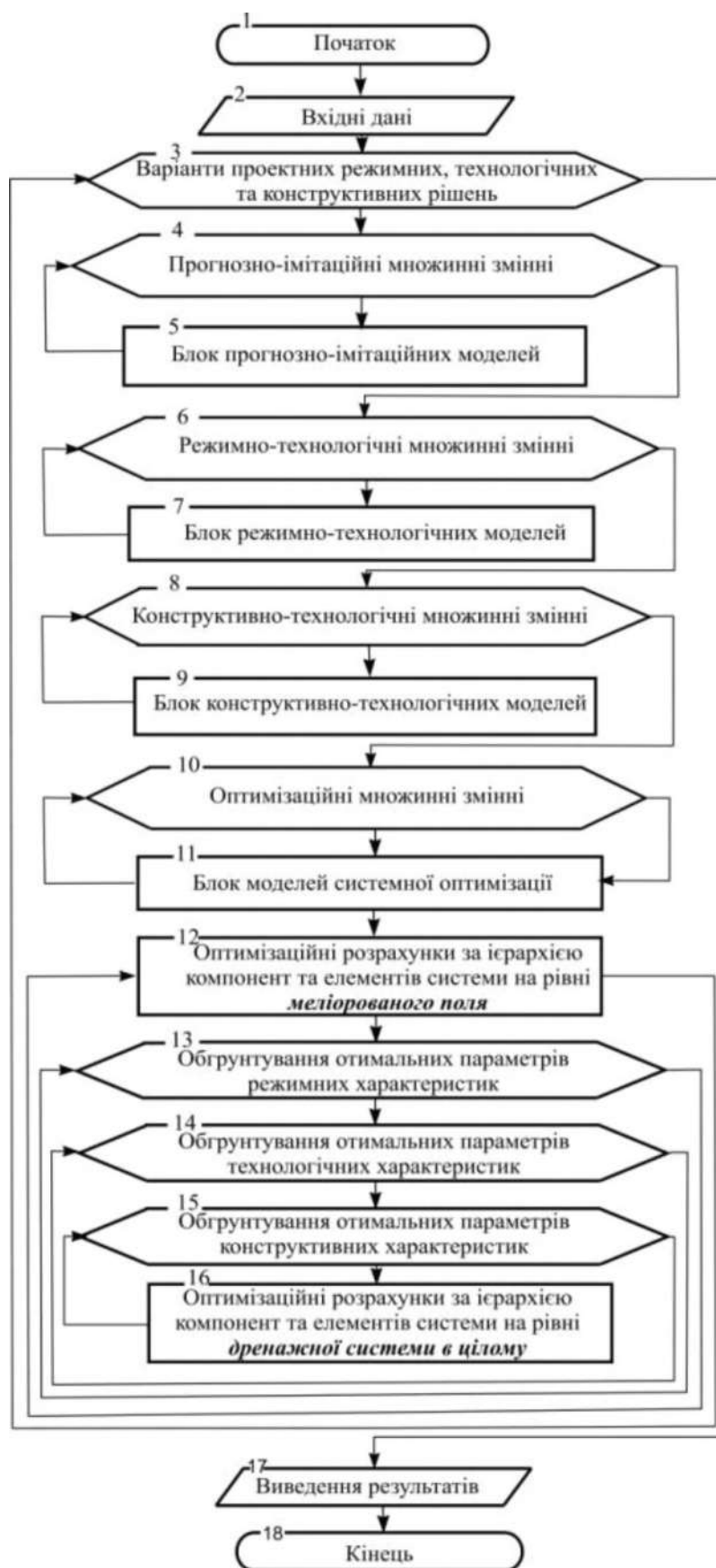


Рис. 3. Узагальнена блок-схема реалізації комплексної моделі системної оптимізації з обґрунтування типу, конструкції та параметрів ДС на еколого-економічних засадах

– блок конструктивно-технологічних моделей передбачає визначення типу, конструкції та параметрів ДС й складових їх технічних елементів на багатоваріантній основі за відповідними загальноприйнятими формулами на основі розрахункових значень показників витрат, напорів, рівнів води, модулів дренажного стоку, модулів водоподачі тощо [16 та ін.] (блок 9, рис. 3);

– блок формування оптимізаційних множинних змінних сукупності  $\{i_v\}, i_v = 1, n_v, v = 1, n_v$ , щодо множинних режимно-технологічних та конструктивно-технологічних альтернативних варіантів ПР відповідно до рівня розв'язання поставленої оптимізаційної задачі по системі (блок 10, рис. 3);

– блок оптимізаційних розрахунків передбачає послідовний пошук оптимальних значень прийнятих критеріїв оптимізації економічної та екологічної ефективності щодо параметрів різнорідних елементів системи (ТТР) відповідно до багаторівневої ієрархії їх знаходження, починаючи з найнижчого – рівня культури  $k, v = 1$ , через проміжні рівні щодо  $g, v = 2; p, v = 3; l, v = 4; s, v = 5; \phi, v = 6; \theta, v = 7$  і, зрештою, до найвищого її рівня системи  $S, v = 8$ , відповідно до необхідного рівня прийняття рішення в часі як на довготерміновій, так і короткотерміновій основі їх виконання (1-проект, 2-планова експлуатація, 3-оперативне управління). За ними реалізується загальна умова системної оптимізації та остаточний вибір оптимального рішення, що здійснюється неформальним шляхом через експертну оцінку відповідним спеціалістом на стадії проекту або планової експлуатації ДС, яке враховує, з одного боку, економічну ефективність, а з іншого – екологічну прийнятність його реалізації (блок 11, рис. 3);

– блок формування й виведення будь-яких проміжних (за необхідності) та остаточних результатів прогнозно-оптимізаційних розрахунків на будь-якому етапі їх виконання (блок 12, рис. 3).

По-друге, це необхідність дотримання визначеного порядку ієрархічно підпорядкованої послідовності виконання прогнозно-оптимізаційних розрахунків за відповідними моделями й узагальнюючими блоками, коли результати, отримані за відповідними моделями на нижчих рівнях ієрархії (зворотний порядок розташування блоків моделей на рис. 3), є вихідними даними для виконання подальших розрахунків.

Безумовно, що наведена на (рис. 3) загальна універсальна структура прогноз-

но-оптимізаційних розрахунків буде дещо змінюватися в кожному конкретному випадку її застосування залежно від рівня оптимізаційної задачі, що розв'язується та прийнятої до розгляду, згідно сформульованого завдання,  $n_v$ -рівневої структури їх виконання, конкретних природно-меліоративних й інших умов об'єкта управління.

У свою чергу, реалізація комплексних моделей системної оптимізації потребує визначення показників й критеріїв економічної та екологічної ефективності ПР, що формуються безпосередньо як по окремих різнорідних елементах, так і в межах системи в цілому.

Як показали практика та накопичений досвід постановки й реалізації оптимізаційних задач з водорегулювання осушуваних земель [5–7; 9; 14 та ін.], в якості економічного критерію та умови оптимізації на стадії проектування доцільно розглядати мінімізацію приведених витрат  $ZP_i$  з урахуванням погодно-кліматичного ризику  $R_i$  та похідних від нього показників. Відповідно на стадії експлуатації доцільно розглядати максимізацію чистого доходу  $D_i$ , а також похідні від них показники та умови, що досягаються на меліорованих землях за рахунок реалізації різних варіантів ПР.

В якості критеріїв екологічної оптимальності доцільно використовувати сукупність фізичних показників екологічної ефективності, які висвітлюють різні сторони складного характеру умов формування водного режиму осушуваних земель під дією кліматичних і меліоративних факторів й можуть бути визначені на стадії проекту за довготерміновим прогнозом [5; 6; 7; 14 та ін.]:  $H_g$  – глибина РГВ (середня за період вегетації), м;  $\beta_s^{vh}$  – відносний (відношення фактичної до оптимальної) показник вологості найбільш активного (розрахункового) шару ґрунту  $h$  (середній за період вегетації);  $N'$  – показник надійності (тривалості) підтримання сприятливого водного режиму активного шару ґрунту протягом періоду вегетації, %;  $N^*$  – аналогічний показник надійності щодо критичного періоду розвитку (відповідно найбільшого водоспоживання) вирощуваних культур, %;  $WRPh + M$  – сумарна за вегетацію величина живлення активного шару ґрунту  $h$  з нижчезрозташованих шарів й РГВ ( $VRPh$ ) та витрат води на зволоження осушуваних земель ( $M$ ) відповідним способом, мм;  $\beta_k^y$  – відносний (відношення фактичного до потенційно можливого або максимально досягнутого врожаю) показник урожаю вирощуваних



культур;  $Vh$  – вологообмін активного шару ґрунту  $h$  з нижчезрештованими шарами й РГВ (сумарний за вегетацію), мм;  $KKД\Phi AP$  – фактичне значення коефіцієнта корисної дії (ККД) використання фотосинтетичноактивної радіації (ФАР) вирощуваною культурою, %;  $fr$  – відносний рівень погодно-кліматичного ризику щодо врожайності – та похідні від них узагальнені показники, зокрема коефіцієнт екологічної надійності  $k_n$ .

Визначення показників та критеріїв економічної й екологічної оптимізації спирається на розроблений нами комплекс прогнозно-імітаційних моделей, які реалізуються за довготерміновим прогнозом, щодо кліматичних умов місцевості чи метеорологічних режимів, водного режиму та технологій водорегулювання осушуваних земель, а також розвитку й формування врожаю вирощуваних культур. Практичне їх застосування регламентоване відповідними галузевими нормативами Держводагентства України [13–15].

Отже, перехід на оптимізаційні методи визначає необхідність зміни технології проєк-

тування водогосподарсько-меліоративних об'єктів на основі використання багатоваріантного підходу, застосування сучасних інформаційних та комп'ютерних технологій. Практична реалізація комплексу прогнозно-імітаційних та оптимізаційних розрахунків у проєктах нового будівництва, реконструкції та модернізації ДС, на основі розробленого нами науково-методичного, інформаційного та програмного забезпечення, може бути використана при реалізації відповідного інструментарію, яким є САПР або сучасні BIM-технології [4].

**Висновки.** Отже, застосування системної оптимізації дасть можливість підвищити обґрунтованість і загальну технічну, технологічну та еколого-економічну ефективність створення й функціонування ДС при реалізації адаптивних заходів щодо зміни кліматичних умов у найближчій та віддаленій перспективі в зоні осушувальних меліорацій, насамперед у поліському регіоні, відповідно до прийнятої «Стратегії зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року» [17].

#### Бібліографія

1. Балюк С.А., Ромащенко М.І., Трускавецький Р.С. Охорона ґрунтів і розвиток меліорації в Україні. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 2018. Вип. 87. С. 5–10.
2. Воропай Г., Яцик М., Мозоль Н. Сучасний стан та перспективи розвитку осушувальних меліорацій в умовах змін клімату. *Меліорація і водне господарство*. 2019. (2), 31–39. <https://doi.org/10.31073/mivg201902-180>
3. Evaluation of climate change in Polissia region and ways of adaptation to it. Kovalenko Peter et al. *Journal of Water and Land Development*. 2019. Volume 41. Issue 1. pp. 72–82. DOI: 10.2478/jwld-2019-0030
4. Reclamation projects development improvement technology considering optimization of drained lands water regulation based on BIM. Rokochinskiy A. et al. *Review Engineering and Environmental Sciences*. 2019. Volume 28 Issue 3(85). 432–443. DOI 10.22630/PNIKS.2019.28.3.40
5. Рокочинський А.М. Наукові та практичні аспекти оптимізації водорегулювання осушуваних земель на еколого-економічних засадах : монографія / за ред. академіка УААН Ромащенко М.І. Рівне : НУВГП. 2010. 351 с.
6. Меліорація та облаштування Українського Полісся: Том 1. / за ред. Я.М. Гадзала, В.А. Сташука, А.М. Рокочинського. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2017. 932 с.
7. Рокочинський А.М. Системна оптимізація водорегулювання як необхідна умова створення та функціонування водогосподарсько-меліоративних об'єктів на еколого-економічних засадах. *Меліорація і водне господарство*. Вип. 104. С. 67–71.
8. Лазарчук М.О. Черенков А.В., Рокочинський А.М. та ін. Оптимізація розрахунку осушувальних систем та управління ними. Рівне : НУВГП. 2009. 354 с.
9. Науково-методичні рекомендації до обґрунтування оптимальних параметрів сільськогосподарського дренажу на осушуваних землях за економічними та екологічними вимогами / Рокочинський А.М. та ін. Рівне : НУВГП, 2013. 34 с.
10. Турченко В.О., Рокочинський А.М. Системна оптимізація водо- та енергокористування на екологоекономічних засадах на рисових зрошувальних системах : монографія / за наук. ред. А.М. Рокочинського. Рівне : НУВГП. 2020. 333 с.
11. Підвищення ефективності функціонування рисових зрошувальних систем України : науково-методичні рекомендації / заг. ред. В.А. Сташука, Р.А. Вожегової, В.В. Дудченка, А.М. Рокочинського, В.В. Морозова. Рівне : НУВГП. 2020. 203с. <http://ep3.nuwm.edu.ua/16836/>

12. Жуковский Е.Е. Метеорологическая информация и экономические решения. Львов : Гидрометеиздат. 1981. 304 с.
13. Посібник до ДБН В.2.4.-1-99 «Меліоративні системи та споруди» (розділ 3. Осушувальні системи). Метеорологічне забезпечення інженерно-меліоративних розрахунків у проектах будівництва й реконструкції осушувальних систем / А.М. Рокочинський та ін. Київ : БАТ «Укрводпроект». 2008. 63 с.
14. Тимчасові рекомендації з прогнозування оцінки водного режиму та технологій водорегулювання осушуваних земель у проектах будівництва й реконструкції меліоративних систем / А.М. Рокочинський та ін. Рівне, 2011. 54 с.
15. Тимчасові рекомендації з обґрунтування ефективної проектною врожайності на осушуваних землях при будівництві й реконструкції меліоративних систем / Шалай С.В. та ін. Рівне : НУВГП. 2004. 44 с.
16. ДБН В.2.4.-1-99 Меліоративні системи та споруди. Київ, 1999. 174 с.
17. Стратегія зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 14.08.2019 р. № 688-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/688-2019-%D1%80> (дата звернення: 21.11.2020).

#### References

1. Baliuk, S.A., Romashchenko M.I., & Truskavetskyi, R.S. (2018). Okhorona gruntiv i rozvytok melioratsii v Ukraini [Soils protection and reclamation development in Ukraine]. *Ahrokhimiia i gruntoznavstvo*, 87, 5–10. [in Ukrainian]
2. Voropai H., Yatsyk, M., & Mozol, N. (2019). Suchasnyi stan i perspektyvy rozvytku drenazhatsiinykh mekhanizatsii v zminnyi klimat [Modern state and perspectives of drainage mechanization development under the climate changes conditions]. *Melioratsiia ta upravlinnia vodnymy resursamy*, 2, 31–39. Retrieved from: <https://doi.org/10.31073/mivg201902-180> [in Ukrainian]
3. Kovalenko, P., Rokochynskiy, A., Jeznach, J., Volk, P., Koptiuk, R., & Prykhodko, N. (2019). Evaluation of climate change in polissia region and ways of adaptation to it. *Journal of Water and Land Development*, vol. 41, iss. 1, 72–82. doi: 10.2478/jwld-2019-0030
4. Rokochynskiy A., Jeznach J., Volk P., Turcheniuk V., Frolenkova N. & Koptiuk R. (2019). Reclamation projects development improvement technology considering optimization of drained lands water regulation based on BIM. *Review Engineering and Environmental Sciences*, Volume 28. Issue 3(85). 432–443. doi: 10.22630/PNIKS.2019.28.3.40
5. Rokochynskiy, A.M. (2010). Naukovi ta praktychni aspekty optymizatsii vodrehulivannia osushuvanykh zemel na ekoloho-ekonomichnykh zasadakh [Scientific and practical aspects of optimization of water regulation of drained lands on ecological and economic principles]. M.I. Romashchenko (Ed.). Rivne : NUVHP. [in Ukrainian]
6. Hadzalo, Ya.M. Stashuk, V.A., & Rokochynsky, A.M. (2017). Melioratsiia ta oblashtuvannia Ukrainskoho Polissia [Reclamation and arrangement of Ukrainian Polissya]. (Vol. 1). Kherson : OLDI-PLIUS. [in Ukrainian]
7. Rokochynsky, A.M. (2016). Systemna optymizatsiia vodrehulivannia yak neobkhidna umova stvorennia ta funktsionuvannia vodohospodarsko-melioratyvnykh ob'ektiv na ekoloho-ekonomichnykh zasadakh [System optimization of water regulation as a necessary condition for the creation and operation of water management and reclamation facilities on an ecological and economic basis]. *Melioratsiia i vodne hospodarstvo*, 104, 67–71. [in Ukrainian]
8. Lazarchuk, M.O. Cherenkov, A.V., & Rokochynskiy A.M. (2009). Optymizatsiia rozrakhunku osushuvanykh system ta upravlinnia nymy [Optimization of drainage systems calculation and management]. Rivne : NUVHP. [in Ukrainian]
9. Rokochynsky, A.M., Cherenkov, A.V., Muranov, V.H., & Volk, P.P. (2013). Naukovometodychni rekomendatsii do obgruntuvannia optimalnykh parametriv silskohospodarskoho drenazhu na osushuvanykh zemliakh za ekonomichnymy ta ekolohichnymy vymohamy [Scientific and methodological recommendations for substantiation of optimal parameters of agricultural drainage on drained lands according to economic and ecological requirements.]. Rivne : NUVHP. [in Ukrainian]
10. Turcheniuk, V.O. & Rokochynskiy, A.M. (2020). Systemna optymizatsiia vodo- ta enerhokorystuvannia na ekolohoekonomichnykh zasadakh na rysovykh zroshuvalnykh systemakh [System optimization of water and energy use on the basis ekolohoekonomichnykh in rice irrigation systems] / A.M. Rokochynskiy (Ed.). Rivne : NUVHP. [in Ukrainian]

11. Stashuk, V.A., Vozhehova, R.A., Dudchenko, V.V., Rokochyskyi, A.M., & Morozov, V.V. (2020). Pidvyshchennia efektyvnosti funktsionuvannia rysovykh zroshuvalnykh system Ukrainy : naukovo-metodychni rekomendatsii [Improving the efficiency of rice irrigation systems in Ukraine : scientific and methodological recommendations]. Rivne : NUVHP. [in Ukrainian]
12. Zhukovskiy, E.E. (1981). Meteorolohicheskaia ynformatsiya y ekonomycheskye resheniya. [Meteorological information and economic solutions.] Lviv : Hydrometeoyzdat. [in Ukrainian]
13. Rokochynskiy, A.M. (2008). Posibnyk do DBN V.2.4.-1-99 «Melioratyvni systemy ta sporudy» (rozdil 3. Osushuvalni systemy). Meteorolohichne zabezpechennia inzhenerno-melioratyvnykh rozrakhunkiv u proektakh budivnytstva y rekonstruktsii osushuvalnykh system [Meteorological provision of engineering calculations reclamation projects in construction and reconstruction of drainage systems]. Kyiv : VAT «Ukrvodproekt». [in Ukrainian]
14. Rokochynskiy, A.M., Stashuk, V.A., Dupliak, V.D., & Frolenkova, N.A. et al. (2011). Tymchasovi rekomendatsii z prohnozhnoi otsinky vodnoho rezhymu ta tekhnolohii vodorehuliuвання osushuvanykh zemel u proektakh budivnytstva y rekonstruktsii melioratyvnykh system [Interim recommendations on forecast assessment of water regime and water regulation technologies of drained lands in projects of construction and reconstruction of reclamation systems]. Rivne : NUVHP. [in Ukrainian]
15. Shalai, S.V., Rokochynskiy, A.M., Stashuk, V.A., & Bezhu, V.M. (2004). Tymchasovi rekomendatsii z obgruntuvannia efektyvnoi proektnoi vrozhaivosti na osushuvanykh zemliakh pry budivnytstvi y rekonstruktsii melioratyvnykh system [Interim recommendations for substantiation of effective design yield on drained lands during construction and reconstruction of reclamation systems]. Rivne : NUVHP. [in Ukrainian]
16. Melioratyvni systemy ta sporudy. [Reclamation systems and structures]. (1999). DBN V. 2.4-1-99. Kyiv. [in Ukrainian]
17. Stratehiia zroshennia ta drenazhu v Ukraini na period do 2030 roku [Irrigation and drainage strategy in Ukraine until 2030]: Skhvaleno rozporiadzhenniam Kabinetu Ministriv Ukrainy № 688-p. (2019, August 14). Uriadovyi kurier, 170. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/688-2019-%D1%80> [in Ukrainian]

А.Н. Рокочинский, П.П. Волк

#### Модели системной оптимизации при создании

#### и функционировании дренажных систем в современных условиях

**Аннотация.** Вызовы современности и изменения климата определяют необходимым разработку новых подходов, методов и моделей на основе развития общей теории оптимизации для обоснования оптимального типа, конструкции и параметров дренажных систем на эколого-экономических принципах. Разработаны модели системной оптимизации технологических и конструктивных решений при создании и функционировании дренажных систем. Представляется, что дренажная система – это сложная природно-техническая эколого-экономическая система. Нахождение общего (глобального) оптимума в такой системе на основе системной оптимизации заключается в обосновании промежуточных локальных оптимумов для всех ее основных составляющих разнородных элементов (эффект, режим, технология, конструкция) в их взаимосвязи. Разработаны общие принципы построения и реализации комплексных моделей системной оптимизации, которые включают в себя модель экономической оптимизации, построенной на основе традиционного экономико-математического подхода, а ее экологическая составляющая, как ограничение, определяет экологическую приемлемость оптимального экономического решения. Рассмотрены критерии экономической и экологической оптимизации на всех стадиях принятия решений во времени (1-проект, 2-техническая эксплуатация, 3- оперативное управление объектом) и комплекс прогнозно-имитационных моделей с их определения за долгосрочным прогнозом на многовариантной основе с учетом переменных агромелиоративных условий реального объекта. Практическая реализация комплекса прогнозно-имитационных и оптимизационных расчетов в проектах нового строительства, реконструкции и модернизации ДС на основе разработанного нами научно-методического, информационного и программного обеспечения может быть использовано при применении соответствующего инструментария, которым является САПР и современные ВИМ-технологии. Использование системной оптимизации позволит повысить общую техническую, технологическую и эколого-экономическую эффективность создания и функционирования дренажных систем.

**Ключевые слова:** системная оптимизация, создание и функционирование, дренажная система, эколого-экономические принципы



A.M. Rokochinskiy, P.P. Volk

**Models of system optimization for constructing  
and functioning drainage systems in current conditions**

**Abstract.** *The today challenges and climate change are the reasons of the need to develop new approaches, methods and models based on a general theory of optimization to ground the optimal type, design and parameters of drainage systems on ecological and economic principles. Models of system optimization of technological and constructive decisions when constructing and functioning of drainage systems have been developed. Drainage system is considered to be a complex natural-technical and ecological-economic system. Finding the general (global) optimum in such a system on the basis of system optimization is to substantiate the intermediate local optimums for all its main components of heterogeneous elements (effect, mode, technology, design) in their relationship. General principles of construction and implementation of complex models of system optimization have been developed, which include the model of economic optimization, built on the traditional economic-mathematical approach, and its ecological component, as a limitation factor, which determines the acceptability of the optimal economic solution. The criteria of economic and environmental optimization for different levels of management decisions over time (1-project, 2-planned operation, 3-operational management) and a set of forecasting and simulation models to determine them on a long-term forecast on a multivariate basis, taking into account variables of natural, agro-nomical and reclamation conditions of a real object. The practical implementation of forecast-simulation and optimization calculations is performed on the basis of applying the appropriate tools, which are CAD or modern BIM-technologies. The use of system optimization will increase the overall technical, technological, environmental and economic efficiency of constructing and functioning drainage systems.*

**Key words:** system optimization, constructing and functioning drainage system, ecological and economic principles