

УДК 628.17+330.
101.52(075.8)

ШАХНОВСЬКИЙ А. М., КВІТКА О. О., ОВСЯНКИНА В. О.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

ПРАКТИКА ПЕРЕДПРОЕКТНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПІД ЧАС ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СХЕМ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА

Мета. Удосконалення процесу підготування початкових проектних даних на етапі попереднього проектування сталих технологічних схем водного господарства під час проектування та модернізації промислових підприємств. Ефективний синтез оптимальних технологічних систем на основі парадигми інтеграції процесів вимагає, насамперед, належної якості початкових даних для проектування.

Методика. Запропоновано науково обґрунтовані засади збирання і опрацювання початкових даних на основі методів математичної статистики.

Результати. Розроблено процедури підготування вихідних даних для проектування (насамперед, для створення проектів із модернізації промислових підприємств). Метою зазначених процедур є, зокрема, складання водних балансів, параметрична ідентифікація математичних моделей складових частин водного господарства та ін.

Наукова новизна. Поставлено проблему збирання та опрацювання «вхідних даних» для проектного розрахунку схем водного господарства в умовах відсутності систематичного накопичення такої інформації на підприємстві. Запропонований системний науковий підхід на основі методів математичної статистики забезпечує формалізацію знань, необхідну для створення систем автоматизованого проектування сталих технологічних схем водного господарства.

Практична значимість. Для цілей підтримки прийняття рішень на етапі передпроектних досліджень було розроблено програмне забезпечення як компонент системи автоматизованого проектування сталих технологічних схем водного господарства на принципах інтеграції процесів у відповідності до парадигми сталого розвитку. Запропоновані концепції апріорного аналізу вихідної інформації для цілей проектування проілюстровано промисловим прикладом. У якості прикладу представлено ідентифікацію математичних моделей одиниць водоспоживання ділянки водного господарства фармацевтичного підприємства.

Ключові слова: водне господарство, стале проектування, підготування початкових даних, структурна оптимізація, математична модель, статистичні методи.

Вступ. Практика проектування та модернізації промислових підприємств передбачає синтез ефективної хіміко-технологічної системи (ХТС), що покликана забезпечити високу продуктивність, низькі експлуатаційні витрати, низьке споживання ресурсів, вимоги екологічної безпечності, додержання належних умов праці, тощо. Створення проекту у згаданих умовах передбачає використання спеціальних процедур, методів, програмного забезпечення для автоматизації проектування. Так звана «інтеграція процесів» (process integration, ПІ) – фундаментальна парадигма, призначена забезпечити належний рівень енерго- та ресурсоефективності об'єкта проектування. Інтеграція процесів передбачає розгляд проектованої ХТС в цілому, з всебічним врахуванням процесів і обладнання, матеріальних та енергетичних потоків системи у їх взаємодії. У певному розумінні, ПІ протистоїть незалежному оптимальному проектуванню компонентів ХТС. Інтеграція технологічних процесів дозволяє використовувати «внутрішні резерви» технології

(наприклад, нагрівання реагентів з використанням надлишкової теплоти продуктів реакції [1]).

Внаслідок поширення концепції сталого розвитку пріоритети проектування промислових підприємств дещо змінилися. «Проектування ХТС на засадах сталого розвитку» або «стале проектування» нині слід тлумачити як систему «... проектних заходів, які ведуть до економічного зростання, охорони навколишнього середовища та соціального прогресу для поточного покоління, не зачіпаючи потенціал майбутніх поколінь» [2].

Необхідність урахування парадигми сталого розвитку поряд із специфічними особливостями вітчизняного промислового виробництва (включаючи економічний стан та рівень технологічної оснащеності) робить актуальною задачу сталого проектування та модернізації («retrofit design») систем водного господарства промислових підприємств.

Запропоновано багато підходів на основі концепцій інтеграції процесів та структурної оптимізації до сталого технологічного проектування схем водного господарства, як складової підсистеми виробничого підприємства [3]. При цьому, незалежно від запропонованого підходу, проблема збирання та накопичення потрібних для подальших розрахунків даних є критично важливою. Адекватність «вхідних» початкових даних для розрахунку безпосередньо визначає ефективність рішень, що можуть бути запропоновані на наступних етапах проектування. Під збиранням даних для проектування розуміємо насамперед складання балансу водоспоживання та водовідведення, структурну та параметричну ідентифікацію математичного опису складових частин схем водного господарства.

Досвід показує, що проблема збирання на виробництві даних для проектування (модернізації) є неординарною проблемою, насамперед через те, що потрібна інформація не завжди визнається за важливу керівництвом підприємства (тобто фахівцями з експлуатації виробництва); вказані дані часто не підлягають регулярному контролю; подекуди виявляються неповними, неузгодженими, і т.п. Тому процес збирання та накопичення «вхідних даних» для розрахунку схем водного господарства вимагає системного наукового підходу із застосуванням специфічних методів «видобування даних і знань» («data mining and knowledge discovery») [4, 5].

Постановка завдання. Дана стаття присвячена аналізу практичних аспектів збирання та опрацювання «вхідних даних» для проектного розрахунку схем водного господарства в умовах відсутності систематичного накопичення такої інформації на підприємстві. Задачею дослідження є розроблення системного наукового підходу на основі методів математичної статистики, що забезпечував би формалізацію знань, необхідну для створення систем автоматизованого проектування сталих технологічних схем водного господарства.

Результати дослідження:

1. Аналіз даних на етапі передпроектних досліджень. Використовувані авторами методи збирання інформації можна умовно розділити на «непрямі» («за нормою») методи та методи безпосереднього вимірювання («за фактом») стану технологічної схеми.

Під «непрямими» методами збирання інформації розуміємо аналіз наявної (на підприємстві та у сховищах інформації) технічної документації (технологічні регламенти, протоколи випробувань, технічні паспорти апаратів тощо). Очевидним недоліком вказаного способу збирання даних є його теоретичний характер: «непрямі» методи переважно

дозволяють визначити стан технології (витрати, склад потоків, тощо) «за нормою». Визначені таким чином характеристики можуть суттєво відрізнятися від фактичних. Адаптувати результати теоретичних розвідок до конкретного випадку модернізації підприємства дає змогу опитування експертів–виробничників. Опитування експертів виявилось слухним, зокрема, під час поділу забруднюючих домішок у схемі водоспоживання на технологічні групи (передпроектної кластеризації забруднювачів), під час відсіювання порівняно незначимих забруднювачих домішок (передпроектної дискримінації забруднювачів), при об'єднанні процесів-водоспоживачів у групи, тощо. Так, з метою оцінки значимості забруднюючих домішок та їх ранжування і групування може бути використано опитування думок експертів та статистичні процедури узагальнення експертної інформації (рангову кореляцію і т.п.) [6]. Для задач опитування було використано комп'ютерні форми опитування на основі розроблених раніше аркушів опитування [7]. Зауважимо, що використання аркушів опитування цілком відповідає практиці проектування схем водного господарства – див. наприклад, [8].

2. Ідентифікація математичних моделей складових частин водного господарства.

Комп'ютерно-інтегрований розрахунок та оптимізація підсистем водного господарства базується на адекватних математичних моделях процесів споживання, відведення та очищення води. Побудова згаданих моделей передбачає, зокрема, визначення параметрів моделей (параметричну ідентифікацію) за результатами експериментальних досліджень. Зокрема, найпростішою моделлю процесу-водоспоживача є рівняння матеріального балансу цього технологічного процесу. У припущенні про відсутність систематичних похибок вимірювання, про стаціонарність процесів водоспоживання, тощо, ідентифікація даної моделі зводиться до знаходження параметру масового навантаження m_{ci} (1). При цьому значення величин $C_{C,BX}$, $C_{C,BIX}$, f можуть бути отримані безпосереднім вимірюванням.

$$m_{ci} = f(C_{C,BX} - C_{C,BIX}), c = \overline{1, Nc}, i = \overline{1, No}, \quad (1)$$

де m_{ci} – масове навантаження за забруднювачем c (масове навантаження – характеристика масообміну; кількість маси даної забруднюючої домішки, яка має перейти з технологічного потоку до води при заданій витраті води); f – масова витрата води; $C_{C,BX}$, $C_{C,BIX}$ – концентрації забруднювача у воді на вході та на виході з процесу-водоспоживача; No – кількість споживачів води; Nc – кількість груп забруднювачів.

Усереднюючи за часом значення вимірів для потреб параметричної ідентифікації моделей водоспоживачів, автори виходили з відомого факту, що в разі, коли генеральна сукупність, з якої взято вибірку, є розподіленою нормально, вибіркове середнє є ефективною оцінкою генерального середнього. Аргументовано судити про відповідність (або невідповідність) даних вибірки теоретичному нормальному розподілу можна, застосувавши до результатів вимірювання відомі методи встановлення типу закону розподілу вибіркової сукупності (статистичні критерії узгодженості Пірсона, Колмогорова (Колмогорова-Смирнова), Райена-Джойнера (Шاپіро-Вілка), Андерсона-Дарлінга, тощо [9]). У разі негативного результату статистичної перевірки автори змушені були вдаватися до спеціального апарату опрацювання похибок вимірювання (див., наприклад [10, 11]).

Статистичний аналіз результатів вимірювань для перевірки узгодженості розподілу досліджуваної величини з нормальним законом було виконано у два етапи:

- 1) оціночний (якісний) графічний або графоаналітичний аналіз;
- 2) розрахункова перевірка гіпотези про нормальність розподілу (кількісний аналіз).

Для автоматизації кількісного аналізу експериментальних даних було застосовано програмний пакет супроводження передпроектних досліджень WaterStat, створений авторами у межах дослідницького проекту «Розроблення сталих промислових схем водного господарства». Також у даному дослідженні було використано статистичний пакет Minitab (переважно для графічного аналізу вибірок, а також для верифікації результатів розрахунків у пакеті WaterStat на етапі його відлагоджування).

3. Розрахунковий приклад. Нижче представлено приклад ідентифікації математичних моделей процесів водоспоживання фармацевтичного підприємства. Параметрична ідентифікація моделі автоматичної машини миття тари (водоспоживача) вимагала вимірювання вхідної та вихідної концентрацій забруднювача (завислі речовини) із паралельним вимірюванням витрати води. У відповідності до виразу (1), значення параметру моделі може бути визначене за усередненими значеннями виміряних концентрацій і масової витрати (у разі відповідності статистичного розподілу виміряних величин нормальному розподілу).

На рис 1 проілюстровано застосування поширеного способу графоаналітичної перевірки гіпотези про належність виборки до нормальної сукупності – співставлення результатів вимірювань із теоретичним Гаусівським (нормальним) розподілом. Вказане порівняння у традиційних координатах «частота» – «ймовірність» наведено на рис. 1 а. Емпіричний розподіл величин масового навантаження репрезентовано у вигляді діаграми відносних частот (за згрупованими даними).

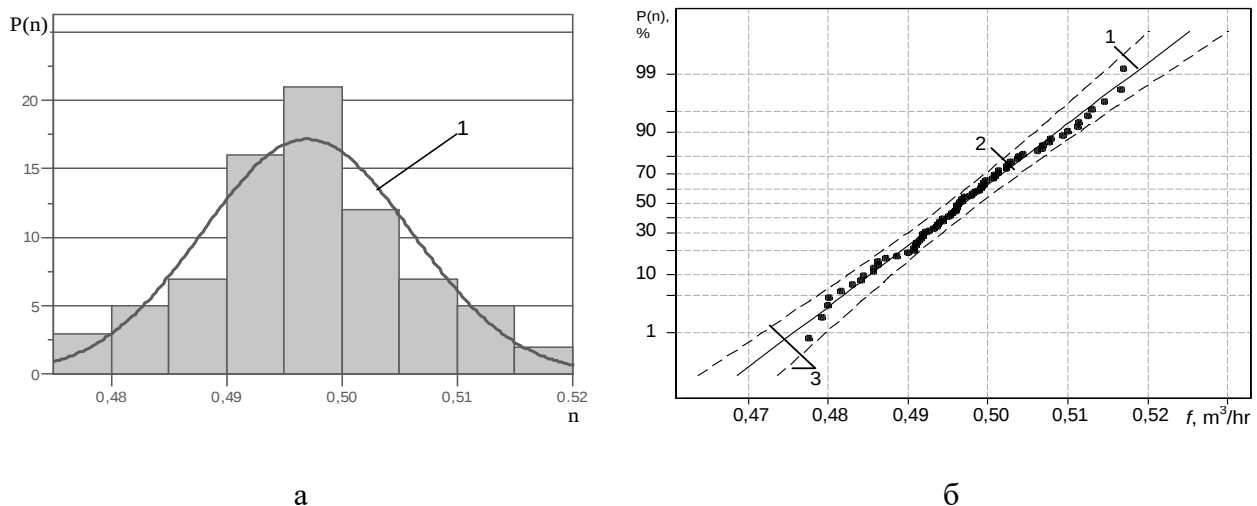


Рис. 1. До графоаналітичного визначення статистичного розподілу параметру моделі водоспоживача: а – діаграма відносних частот масового навантаження (згруповані дані, традиційні координати); б – порівняння емпіричного розподілу значень масового навантаження із теоретичним розподілом (лінеаризовані координати); 1 – емпіричний розподіл (точки); 2 – теоретичний розподіл (лінія); 3 – границі довірчого інтервалу; n_i – частота i -тої варіанти; $P(n)$ – ймовірність; m – параметр моделі (масове навантаження)

Діаграми відносних частот побудовано виходячи із наступних міркувань [8]:

1) Діапазон вимірювань випадкової величини у виборці поділено на d інтервалів, причому значення d обрано за емпіричною формулою $d = 1 + 3,2 \cdot \lg N$.

де N -об'єм вибірки. У даному випадку $d = 7,0647 \approx 7$.

2) Довжини інтервалів взято однаковими $\Delta_q = \frac{m_{\max} - m_{\min}}{d} = \frac{0,5170 - 0,4776}{7,0647} = 0,0056$.

На рис. 1 б представлено порівняння значень масового навантаження із теоретичним Гаусівським розподілом у лінеаризованих координатах (еталонну криву Гауса лінеаризовано шляхом нелінійного перетворення масштабу по вертикальній осі). Варто зауважити: представлений вище «традиційний» графічний підхід видається менш зручним і зрештою менш точним за графоаналітичний підхід на основі «нормального ймовірнісного паперу».

Оскільки очевидно, що на графіку рис. 1 б, емпірична функція розподілу досить добре апроксимується прямою лінією (особливо у центральній частині графіку), можна зробити наближений висновок про нормальний розподіл генеральних сукупностей, із яких узято вибірки.

Розрахункову (кількісну) перевірку гіпотези про нормальність розподілу отриманого варіаційного ряду було здійснено здійснюється за допомогою критерію згоди Пірсона [9, 12].

Розрахункове значення критерію Пірсона $\chi^2_{\text{дїс}} = 6,83$. Теоретичне значення критерію Пірсона (для кількості ступенів свободи $f = 7$ та рівню значимості 5 %) складає $\chi^2_{\text{дїдї}} = 14,067$. Оскільки умова $\chi^2_{\text{дїс}} < \chi^2_{\text{дїдї}}$ виконана, гіпотеза про нормальність закону розподілу величини масового навантаження приймається. Отже, у якості оцінки величини масового навантаження може бути прийняте вибіркове середнє $\bar{m}$ відповідних вимірів.

Висновки. У результаті проведених досліджень було запропоновано процедури підготування вихідних даних для проектування, як складову частину систем сталого автоматизованого проектування технологічних схем водного господарства промислових підприємств. Застосовані у дослідженні методи прикладної статистики дали змогу автоматизувати розрахунки під час складання водних балансів, ідентифікації математичних моделей складових частин водного господарства, та на інших погано формалізованих стадіях передпроектних досліджень. Перспективу подальших досліджень автор вбачають у розширенні концепцій, запропонованих для структурної оптимізації схем водного господарства, на випадок параметричної оптимізації вказаних схем.

Подяки. Автори присвячують цю статтю пам'яті професорів Яцека Марії Єжовського (Жешувський технологічний університет) та Геннадія Олексійовича Статюхи (Національний технічний університет України, «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»).

Представлена стаття є частиною дослідницького проекту «Розроблення сталих промислових схем водного господарства» (номер державної реєстрації 0117U005297).

Література

1. Smith R. Chemical process design / Robin Smith – New York: McGraw-Hill, 1999. – 459 p.
2. El-Halwagi M. Sustainable Design Through Process Integration : 2nd Edition / Mahmoud M. El-Halwagi. – Amsterdam-Oxford-Cambridge: Elsevier, 2017. – 448 p.
3. Shakhnovsky A., Kvitka O. Design of sustainable industrial water networks: 1. Genesis of the systematic methods // Water and water purification technologies. Scientific and technical news. – Kyiv, 2019. – No. 1 (24). – C. 34-44.
4. Santen A., Koot G.L.M., Zullo L.C. Statistical data analysis of a chemical plant // Computers and chemical engineering. – 1997. – V. 21., Suppl. – pp. S1123-S1129. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(97\)87653-3](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(97)87653-3)
5. Sebzalli Y.M., Li R.F., Chen F.Z., Wang X.Z. Knowledge discovery from process operational data for assessment and monitoring of operator's performance // Computers & Chemical Engineering. – Volume 24, Issues 2–7, 15 July 2000, Pages 409-414. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(00\)00430-0](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(00)00430-0)
6. Єжовська А., Єжовський Я., Квітка О.О., Статюха Г.О., Шахновський А.М. Збирання та обробка вихідних даних для проектування технологічних схем водоспоживання та водовідведення // Вісник Житомирського державного інженерно-технологічного університету. – 2007. – № 1 (40). – с. 213-218.
7. Рекомендации по составлению опросных листов, протоколов согласований и других документов для заказа оборудования, применяемого в проектах водоснабжения и канализации. БЗ-62. – М.: Госстрой СССР, 1981. – 40 с.
8. Shakhnovsky A., Kvitka A., Statyukha G., Jeżowski J., Jeżowska A. On the statistical analysis of data for the water usage network design // Chemical and process engineering. – 2007. – v. 28. – p. 493-503.
9. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Анализ данных на компьютере. Изд. 3-е, перераб. и доп./Под ред. В. Э. Фигурнова — М.: ИНФРА-М, 2002. — 528 с
10. Martins M. A. F., Amaro C. A., Souza L. S., Kalid R/ A., Kiperstok A. New objective function for data reconciliation in water balance from industrial processes // Journal of Cleaner Production, Volume 18, Issue 12, August 2010, Pages 1184-1189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.03.014>

References

1. Smith, R. (1999). *Chemical process design*. New York: McGraw-Hill.
2. El-Halwagi, M. (2017). *Sustainable Design Through Process Integration* : 2nd Edition. Amsterdam-Oxford-Cambridge: Elsevier.
3. Shakhnovsky, A., Kvitka, O. (2019). Design of sustainable industrial water networks: 1. Genesis of the systematic methods. *Water and water purification technologies. Scientific and technical news.*, No. 1 (24), 34-44.
4. Santen, A., Koot, G.L.M., Zullo L.C. (1997). Statistical data analysis of a chemical plant. *Computers and chemical engineering*, V. 21., Suppl, S1123-S1129. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(97\)87653-3](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(97)87653-3)
5. Sebzalli, Y.M., Li, R.F., Chen, F.Z., Wang, X.Z. (2000). Knowledge discovery from process operational data for assessment and monitoring of operator's performance. *Computers & Chemical Engineering*, V. 24, Iss. 2–7, 409-414. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(00\)00430-0](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(00)00430-0)
6. Jeżowska, A., Jeżowski, J., Kvitka, O., Statyukha, G., Shakhnovsky, A. (2007). Zbyrannya ta obrobka vykhidnykh danykh dlya proektuvannya tekhnolohichnykh skhem vodospozhyvannya ta vodovidvedennya [Collecting and processing of initial data for industrial water networks design]. *Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnoho inzhenerno-tekhnolohichnoho universytetu – Journal of Zhytomyr state technological university*, No 1 (40), 213-218 [in Ukrainian].
7. Rekomendatsii po sostavleniyu oprosnnykh listov, protokolov soglasovaniy i drugikh dokumentov dlya zakaza oborudovaniya, primenyayemogo v proyektakh vodosnabzheniya i kanalizatsii [Recommendations on the preparation of questionnaires, coordination protocols and other documents for ordering equipment used in water supply and sewage projects]. Moscow, 1981. 40 p [in Russian].
8. Shakhnovsky, A., Kvitka, A., Statyukha, G., Jeżowski, J., Jeżowska, A. (2007). On the statistical analysis of data for the water usage network design. *Chemical and process engineering*, v. 28, 493-503.
9. Tyurin, Yu. N. & Makarov, A.A. *Analiz dannykh na komp'yutere* [Computer data analysis], Moscow [in Russian].
10. Martins, M. A. F., Amaro, C. A., Souza, L. S., Kalid, R. A., Kiperstok, A. (2010). New objective function for data reconciliation in water balance from industrial processes. *Journal of Cleaner Production*, V. 18, Iss. 12, 1184-1189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.03.014>

11. Behnami A., Shakerkhatibi M., Dehghanzadeh R., Zoroufchi B. K., Derafshi S. Fatehifar E. The implementation of data reconciliation for evaluating a full-scale petrochemical wastewater treatment plant // Environmental Science and Pollution Research. – 2016. – 23(22). – pp. 22586–22595. DOI: 23. 10.1007/s11356-016-7484-5.
12. Статистический анализ и теория планирования эксперимента : учебное пособие / Н.И. Сидняев. — Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 195 с.

10.1016/j.jclepro.2010.03.014

11. Behnami, A., Shakerkhatibi, M., Dehghanzadeh, R., Zoroufchi, B. K., Derafshi, S., Fatehifar, E. (2016). The implementation of data reconciliation for evaluating a full-scale petrochemical wastewater treatment plant. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(22), 22586–22595. DOI: 10.1007/s11356-016-7484-5.

12. Sidnyayev, N.I. (2017). *Statisticheskiiy analiz i teoriya planirovaniya eksperimenta* [Statistical analysis and theory of experimental design]. Moscow [in Russian].

ПРАКТИКА ПРЕДПРОЕКТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА ШАХНОВСКИЙ А. М., КВИТКА А. А., ОВСЯНКИНА В. А.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»

Цель. Совершенствование процесса подготовки начальных проектных данных на этапе предварительного проектирования устойчивых технологических схем водного хозяйства при проектировании и модернизации промышленных предприятий. Эффективный синтез оптимальных технологических систем на основе парадигмы интеграции процессов требует, в первую очередь, надлежащего качества исходных данных для проектирования.

Методика. Предложены научно обоснованные принципы сбора и обработки исходных данных на основе методов математической статистики.

Результаты. Разработаны процедуры подготовки исходных данных для проектирования (прежде всего, для создания проектов по модернизации промышленных предприятий). Целью указанных процедур является, в частности, составление водных балансов, параметрическая идентификация математических моделей составных частей водного хозяйства и др.

Научная новизна. Поставлена проблема сбора и обработки исходных данных для проектного технологического расчета схем водного хозяйства в условиях отсутствия систематического накопления такой информации на предприятии. Предложенный системный научный подход на основе методов математической статистики обеспечивает формализацию знаний, необходимую для создания систем автоматизированного проектирования устойчивых технологических схем водного хозяйства.

Практическая значимость. Для целей поддержки принятия решений на этапе предпроектных исследований было разработано программное обеспечение как компонент системы автоматизированного проектирования технологических схем водного хозяйства на принципах интеграции процессов в соответствии с парадигмой устойчивого развития. Предложенные концепции априорного анализа исходной информации для целей проектирования проиллюстрированы промышленным примером. В качестве примера представлена идентификация математических моделей единиц водопотребления участка водного хозяйства фармацевтического предприятия.

Ключевые слова: водное хозяйство, устойчивое проектирования, подготовка исходных данных, структурная оптимизация, математическая модель, статистические методы.

PRACTICES OF WATER NETWORKS PRELIMINARY DESIGN STUDIES

SHAKHNOVSKY A. M., KVITKA A. A., OVSYANKINA V. A.

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

Purpose. Improving the process of initial design data preparation at the stage of preliminary design of sustainable industrial water networks (including natural water and wastewater treatment networks, water usage networks, as well as waste collection & disposal networks). An effective synthesis of optimal chemical-engineering systems based on the process integration paradigm requires, first of all, the proper quality of the initial data for the design.

Methodology. Evidence-based principles for the collection and processing of input data based on methods of mathematical statistics were proposed.

Findings. Procedures for the preparation of initial grassroots/retrofit design data were developed. The purpose of procedures developed was compilation of water balances, parametric identification of mathematical models of water users, water treatment units and other units of the water management networks, etc.

Originality. The problem of collecting and processing the initial data for the industrial water economy networks design (including water usage networks, wastewater collection, disposal and treatment networks as well as water conditioning and purification networks) in the absence of a systematic accumulation of such data at the enterprise was raised. The proposed systematic scientific approach was based on the methods of mathematical statistics. The proposed approach provides the formalization of knowledge for creating computer-aided systems of water economy sustainable design.

Practical value. In order to support decision-making at the preliminary design research stage, the specialized software was developed. The developed software was a component of a computer-aided system of water networks design based on the principles of process integration in accordance with the sustainable development paradigm. The proposed concepts of a priori analysis at the preliminary design stage was illustrated by an industrial case study. As an example, the identification of mathematical models of a pharmaceutical enterprise water usage units was presented.

Keywords: water economy, sustainable design, initial data preparation, structural optimization, mathematical model, statistical methods.