

ВИКОРИСТАННЯ ЛОГІКО-ГРАФІЧНИХ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ РИЗИКІВ В СИСТЕМАХ ВОДОПОСТАЧАННЯ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИРОБНИЦТВ

Інга Уряднікова

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, проспект Повітряних Сил, Київ, 03037, Україна
канд. техн. наук, uryadnikova.iv@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-3750-876X

DOI: 10.32347/2524-0021.2024.47.47-55

Анотація. Актуальними питаннями сьогодення у водопостачанні теплоенергетичних виробництв є підвищення ефективності виробничих процесів, зниження енергетичних витрат, впровадження інноваційних технологій, а також забезпечення екологічної безпеки та стійкого розвитку. Аналіз причин промислових аварій і пошкоджень показує, що виникнення та розвиток аварій, як правило, характеризується поєднанням випадкових локальних подій, що виникають з різною частотою на різних стадіях аварії. Для виявлення причинно-наслідкових зв'язків між цими подіями використовують логіко-графічні методи дерев відмовлень та подій. З метою дослідження виявлення та аналізу причинно-наслідкових зв'язків, що сприяють виникненню відмовлень у системі водоочищення за допомогою дерева відмовлень для подальшого розроблення ефективних заходів щодо мінімізації ризиків і підвищення надійності і безпеки роботи систем водопостачання теплоенергетичних виробництв запропоновано використовувати логіко-графічні методи на попередній стадії визначення і оцінки техногенних ризиків. Аналіз отриманих результатів показав, що: 1) дерево відмовлень є миттєвим відображенням системи у визначений момент часу t і є графічним представленням причинно-наслідкових взаємозв'язків, отриманих у результаті визначення небезпечних ситуацій у системі в прямому і зворотному порядку, щоб знайти можливі причини їхнього виникнення; 2) складну кінцеву подію варто визначати за допомогою так названої «вершини дерева». Вершина дерева складається з кінцевої події і додаткових небажаних подій, що включають потенційні аварії і небезпечні стани, які є безпосередніми причинами кінцевої події. Кінцева подія і додаткові події повинні бути ретельно визначені і всі найважливіші причини кінцевої події виявлені. Тому, перші п'ять евристичних правил необхідно використовувати при побудові дерева відмовлень; 3) побудова дерева відмовлень за допомогою евристичних правил можна використовувати при розгляді будь-якого елемента системи, однак для спрощення громіздких побудов доцільніше будувати дерева тільки для основних елементів, що викликають аварійні ситуації і негативний вплив на життя і здоров'я людей, а також на навколишнє середовище; 4) при побудові дерева відмовлень для технологічної схеми водоочищення можна уточнити і кількісно оцінити події, відшукати події з дуже великою імовірністю і дуже низькою імовірністю, обмежити подальший розвиток дерева відмовлень і встановити причини відмовлень на кожній стадії процесу водоочищення; 5) дерево відмовлень можна використовувати для кількісних оцінок із застосуванням Марківських моделей.

Ключові слова: логіко-графічні методи, «дерево відмовлень», надійність, безпека, техногенні ризики, системи водопостачання, теплоенергетика.

ВСТУП

Актуальними питаннями сьогодення у водопостачанні теплоенергетичних виробництв є підвищення ефективності виробничих процесів, зниження енергетичних витрат, впровадження інноваційних технологій, а також забезпечення екологічної безпеки та стійкого розвитку. Особливу увагу приділяють оптимізації використання ресурсів, автоматизації та цифровізації виробництва, що дозволяє підвищити конкурентоспроможність підприємств на глобальному ринку. Не менш важливими є питання управління ризиками та безпекою на виробництві, що стають критично важливими в умовах зростання техногенних, природних і воєнних загроз.

Аналіз причин промислових аварій і пошкоджень показує, що виникнення та розвиток аварій, як правило, характеризується поєднанням випадкових локальних подій, що виникають з різною частотою на різних стадіях аварії (повні та часткові відмови обладнання, помилки персоналу при експлуатації та проектуванні, зовнішні та внутрішні впливи, руйнування, вибухи тощо). Для виявлення причинно-наслідкових зв'язків між цими подіями використовують логіко-графічні методи дерев відмовлень та подій [1–4].

Ці методи дозволяють систематично аналізувати складні системи та процеси, ідентифікуючи можливі причини відмовлень, а також оцінювати ймовірність виникнення різних сценаріїв розвитку подій. Древа відмовлень допомагають уявити взаємозв'язок між окремими елементами системи та визначити, як відмова одного з них може вплинути на загальну роботу. Древа подій, у свою чергу, дозволяють прослідкувати, як певна подія може ініціювати ланцюг подій, що призводять до небажаних наслідків. Завдяки використанню цих методів можна виявити критичні точки в системі, розробити заходи для мінімізації ризиків та підвищити загальну надійність і безпеку процесів.

Ці підходи широко використовуються в різних галузях, таких як промисловість, енергетика, транспорт, та інформаційні технології. Застосування дерев відмовлень і подій дозволяє не тільки виявляти потенційні

ризиків, але й розробляти стратегії щодо їх усунення або мінімізації впливу. Наприклад, у виробництві ці методи допомагають виявити слабкі місця у виробничих процесах, що можуть призвести до простоїв, зниження якості продукції або виникнення аварійних ситуацій [5,6].

Крім того, логіко-графічні методи стають основою для побудови систем прогнозування та управління ризиками, що дозволяє підприємствам бути більш проактивними у своїй діяльності [7]. У сучасних умовах, коли складність технологічних систем зростає, а вимоги до їх надійності посилюються, здатність ефективно аналізувати та управляти ризиками набуває вирішального значення для забезпечення безперебійної роботи та конкурентоспроможності.

Використання логіко-графічних методів також сприяє покращенню процесів прийняття рішень, оскільки забезпечує керівників і інженерів чіткою картиною потенційних загроз і дозволяє розробляти обґрунтовані плани дій. У поєднанні з іншими методами, такими як аналіз надійності, моделювання сценаріїв та оцінка економічних ризиків, ці підходи створюють потужний інструментарій для управління складними технічними системами та забезпеченням їх безпеки.

Метою дослідження є виявлення та аналіз причинно-наслідкових зв'язків, що сприяють виникненню відмовлень у системі водоочищення за допомогою дерева відмовлень для подальшого розроблення ефективних заходів щодо мінімізації ризиків і підвищення надійності і безпеки роботи систем водопостачання теплоенергетичних виробництв.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОЯСНЕННЯ

Розробка дерева відмовлень для процесу електрофлото-коагуляційного очищення стічних вод

На попередній стадії аналізу й оцінки ризику можна додатково використовувати методику побудови дерев відмовлень, яка дозволяє структуровано підходити до виявлення можливих точок відмови в системі. Цей метод передбачає побудову графічної

моделі, де верхній вузол представляє основну небажану подію, а гілки й підвузли — можливі причини, що можуть до неї призвести.

Дерева відмовлень допомагають візуалізувати та проаналізувати логічні зв'язки між різними елементами системи, виявити основні причини потенційних проблем і оцінити ймовірність виникнення критичних ситуацій. На основі цього аналізу можна визначити ключові елементи, відмови яких можуть мати найбільш значний вплив на загальну роботу системи.

Використання дерев відмовлень на ранніх етапах дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо необхідності додаткових заходів безпеки, удосконалення технологічних процесів або модернізації обладнання. Це, у свою чергу, сприяє зниженню техногенних ризиків, підвищенню надійності системи та зменшенню ймовірності виникнення аварійних ситуацій у майбутньому.

Також, побудова дерев відмовлень може стати основою для більш детального аналізу, такого як кількісна оцінка ризиків або розробка моделей для імітаційного моделювання. Це дозволяє підприємствам створювати комплексні стратегії управління ризиками, що враховують усі можливі сценарії та варіанти розвитку подій.

Для побудови дерева відмовлень, як приклад, ми використовуємо технологічну схему процесу електрофлотокоагуляційної очистки стічних вод представлену на рис. 1.

Стічні води збираються у відстійнику-змішувачі 4, відстоюються протягом 40 хв, потім спливаючий шар вільних нафтопродуктів, спеціальним пристроєм відводять у збірник нафтопродуктів 5, а осадок самоплином або насосом відводять у збірник осаду 2.

Після відділення спливних нафтопродуктів і осаду стічні води при необхідності підкислюють соляною кислотою з мірника 3 до рН 6-6,5 з барботуванням повітрям протягом 5 хв. Повітря подається з тиском 0,5 кгс/см², витратою 1 м³/м³ об'єму відстійника-змішувача в хв. Виділені в процесі підкислювання нафтопродукти збирають у збірнику нафтопродуктів 5.

Підготовлена в такий спосіб стічна вода додатково відстоюється ще деякий час і потім насосом подається в електрофлотокоагулятор 6.

Електрофлотокоагулятор 6 складається з нижньої частини з патрубком введення очищеної води, електродної частини, вузла введення оброблюваного емульсійного стоку, камери коагуляції, камери флотації з нерозчинними електродами і камери відстоювання з патрубком відводу очищеної рідини й ежектора для збору і відводу піни.

Робота апарата 6 передбачається в неперервному режимі. Коагулянт, утворений розчиненням анодів електродної частини апарата, генерується в очищеній стічній воді, яка подається в нижню частину апарата і пропускається через електродну зону. Вода, збагачена коагулянтном і насичена бульбашками водню, проходить через вузол введення неочищеного стоку, розташованого вище електродної зони, де відбувається змішування двох потоків. Змішаний потік проходить камеру коагуляції, в якій відбувається коагулювання забруднень і первинна їхня флотація, камеру флотації з нерозчинними електродами для додаткового флотування нафтопродуктів і камеру освітлення. При початковому запуску електродна зона заповнюється технічною водою.

Пінний продукт відводиться з верхньої частини апарата ежектором і направляється в гідроциклон 8, де відбувається розділення нафтопродуктів, води й електролізних газів. Електролізні гази відводяться в атмосферу, а нафтопродукти і вода направляються в пінозбірник 9. Нафтопродукти з пінозбірника 9 направляються в збірник нафтопродуктів 5, вода – у збірник осаду 2.

Осад із нижньої частини апарата 6 і осадкової частини, куди потрапляють продукти розкладання електродного блоку, подається в збірник осаду 2.

Живлення електродної системи здійснюється від мережі змінного струму через випрямляючий агрегат 7 постійним струмом. У ролі джерела постійного струму використовують випрямляючі агрегати серії ВАК і ВАКГ, які випускаються серійно.

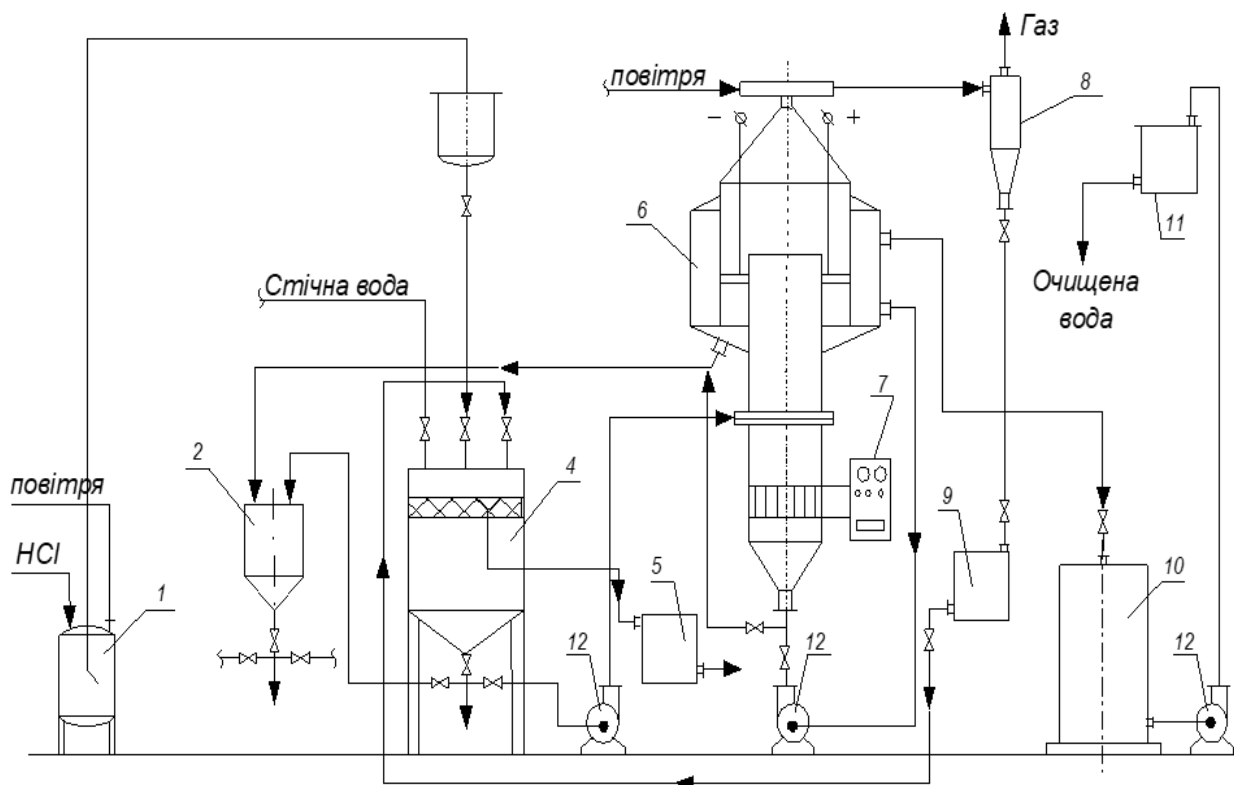


Рис. 1. Технологічна схема процесу електрофлотокоагуляційної очистки стічних вод. 1 – приймач-усереднювач; 2 – збірник осаду; 3 – мірник кислоти; 4 – відстійник-змішувач; 5 – збірник нафтопродуктів; 6 – електрокоагулятор; 7 – випрямляючий агрегат; 8 – гідроциклон; 9 – пінозбірник; 10 – приймач очищеної води; 11 – целюлозний патронний фільтр; 12 – насоси.

Fig. 1. Technological scheme of the process of electroflotocoagulation wastewater treatment. 1 – receiver-averager; 2 – sediment collector; 3 – acid meter; 4 – settling tank-mixer; 5 – collection of petroleum products; 6 – electrocoagulator; 7 – straightening unit; 8 – hydrocyclone; 9 – foam collector; 10 – purified water receiver; 11 – cellulose cartridge filter; 12 – pumps.

Очищена стічна вода задовольняє нормативним вимогам для вод оборотного водопостачання. Виділені нафтопродукти направляються на регенерацію для повторного застосування.

За аналогічною схемою роблять виділення масел (нафтопродуктів) із стоків конденсатоочистки, очищена вода направляється в робочий цикл, а виділені маслопродукти можуть бути використані на заводах залізобетонних виробів для мастила форм, жири – для готування мила, а осад – у виробництві керамічної плитки.

Для побудови дерева відмовлень для процесу електрофлотокоагуляційної очистки стічних вод ми можемо використовувати також деякі евристичні правила [1,2].

Існує сім правил згідно яким впливає наступне.

1. Заміна абстрактної події менш абстрактною.
2. Поділ подій на більш елементарні.
3. Точне визначення причини подій.
4. Взаємозв'язок ініціюючих подій.
5. Встановлення спільно діючих причин подій.
6. Точна вказівка місця відмовлення елемента.
7. Детальна розробка відмовлення елемента.

Відповідно до евристичних правил схему електрофлотокоагуляційної очистки стічних вод необхідно розділити на елементи. Основними елементами схеми є електрокоагулятор, випрямляючий агрегат і ежектор – елементи, які можуть привести до зупинки системи і виходу неякісної води. Дотримуючись правил, ми заміняємо більш абстрактні

події менш абстрактними і розділяємо події на більш елементарні для простоти розгляду досить громіздких схем існуючих у теплоенергетиці. У даному випадку вторинними відмовленнями ми зневажаємо, тому що точно вказуємо відмовлення двох елементів «часткова відмова випрямляючого агрегату» і «відмова ежектору», відмовлення цих двох елементів призведуть до аварії всієї системи в цілому і розгляд цих подій становить інтерес. Подія «відмова електрокоагулятора» у даному випадку розглядатися не буде, тому що вже була розглянута у роботі [8]. Події «часткова відмова випрямляючого агрегату» і «відмова ежектору» ми розглянемо за допомогою логічного знаку «I» із двома входами з дуже високою імовірністю, тому що події відбуваються одночасно.

Подія «часткова відмова випрямляючого агрегату» призведе до події «спад напруги на електродах», що спричинить за собою подію «зменшення дози електрогенерованого коагулянту». Зменшення дози електрогенерованого коагулянту приведе до того, що утворений коагулянт не буде адсорбувати на своїй поверхні достатню кількість домішок і очищена вода на виході з електрокоагулятора буде мати показники, які не відповідають нормативним показникам якості в теплоенергетиці.

Одночасне відмовлення ежектора приведе до події «накопичення електролізних газів», що спричинить за собою скупчення водню і кисню.

При пропусканні постійного струму через об'єм оброблюваної рідини відбувається інтенсивне газовиділення на електродних поверхнях.

У процесі електролізу води на катоді виділяється водень, на аноді - кисень. При відношенні $H_2 : O_2 = 2 : 1$ утворюється гримуча суміш, яка може вибухнути при пропусканні електричної іскри або підпалюванні. Тому, при відмовленні ежектора газу, що зібрався, можуть привести до вибуху електрокоагулятора і відмовленню всієї системи водоочищення.

Одночасні події «відмова ежектору» і «часткова відмова випрямляючого агрегату» можуть у підсумку привести до подій «вибух електрокоагулятора» чи до «порушення технологічного процесу». У даному випадку будь-яка подія може мати місце й обидві ці події зв'язані логічним знаком «ЧИ». Кінцева подія «вихід неякісної води» може відбутися, якщо відбудеться одна з цих подій. Дерево відмовлень для схеми процесу електрофлотокоагуляційної очистки стічних вод представлено на рисунку 2. Кінцева подія звичайна є подією типу «стан системи». Складну кінцеву подію варто визначати за допомогою так названої «вершини дерева». Вершина дерева складається з кінцевої події і додаткових небажаних подій, що включають потенційні аварії і небезпечні стани, що є безпосередніми причинами кінцевої події. Кінцева подія і додаткові події повинні бути ретельно визначені і всі найважливіші причини кінцевої події виявлені. Тому, перші п'ять евристичних правил необхідно використовувати при побудові дерева відмовлень. На додаток можна розглянути побудову дерева відмовлень (рис.3) із вказівкою точного місця відмовлення, точного визначення причини подій і поділу подій на більш елементарні, а саме, для елемента «зупинка насосу».

Розглядаючи первинне відмовлення «зупинка насосу» можна побудувати спрощене дерево відмовлень з досить високою імовірністю події. Між первинною подією «зупинка насоса» і кінцевою подією чи вершиною дерева «вода не очищується» можна включити ряд проміжних подій, які будуть безпосередніми причинами кінцевої події, а саме, події «вода не надходить у відстійник-змішувач» і «вода не надходить в акумулятор».

Побудова дерева відмовлень за допомогою евристичних правил може бути застосована до будь-якого елемента системи. Проте, щоб уникнути громіздких структур, доцільніше зосередитися на створенні дерев лише для ключових елементів, які можуть спричинити аварійні ситуації та мати негативний вплив на життєдіяльність людей і стан

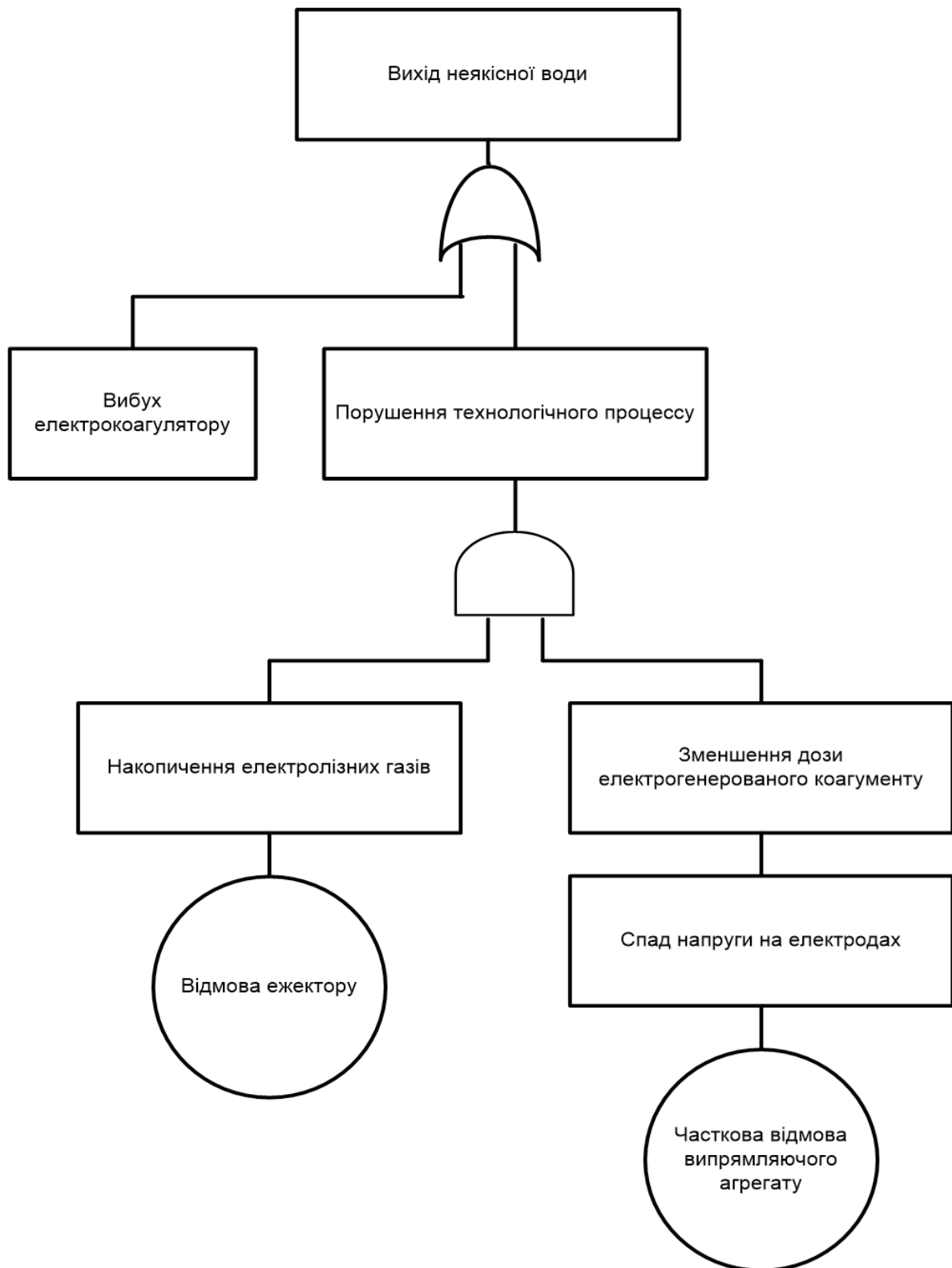


Рис. 2. Дерево відмовлень для схеми процесу електрофлотокоагуляційної очистки стічних вод
Fig. 2. Tree of refusals for the scheme of the process of electroflocculation of wastewater



Рис. 3. Спрощене дерево відмовлень для схеми процесу електрофлотокоагуляційної очистки стічних вод
Fig. 3. Simplified refusals tree for the scheme of the process of electroflocculation wastewater treatment

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Дерево відмовлень є миттєвим відображенням системи у визначений момент часу t і є графічним представленням причинно-наслідкових взаємозв'язків, отриманих у результаті визначення небезпечних ситуацій у системі в прямому і зворотному порядку, щоб знайти можливі причини їхнього виникнення.

2. Дерево відмовлень можна використовувати для кількісних оцінок із застосуванням Марківських моделей.

3. Складну кінцеву подію варто визначати за допомогою так названої «вершини дерева». Вершина дерева складається з кінцевої події і додаткових небажаних подій, що включають потенційні аварії і

небезпечні стани, які є безпосередніми причинами кінцевої події. Кінцева подія і додаткові події повинні бути ретельно визначені і всі найважливіші причини кінцевої події виявлені. Тому, перші п'ять евристичних правил необхідно використовувати при побудові дерева відмовлень.

4. Побудова дерева відмовлень за допомогою евристичних правил можна використовувати при розгляді будь-якого елемента системи, однак для спрощення громіздких побудов доцільніше будувати дерева тільки для основних елементів, що викликають аварійні ситуації і негативний вплив на життя і здоров'я людей, а також на навколишнє середовище.

5. При побудові дерева відмовлень для технологічної схеми водоочищення можна

уточнити і кількісно оцінити події, відшукати події з дуже великою імовірністю і дуже низькою імовірністю, обмежити подальший розвиток дерева відмовлень і встановити причини відмовлень на кожній стадії процесу водоочищення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лисиченко Г.В., Забулонов Ю.Л., Хміль Г.А. Природний, техногенний та екологічний ризику: аналіз, оцінка, управління. Київ: Наукова думка, 2008. 543 с.
2. Хенли Э. Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. пер. с англ. Москва: Машиностроение, 1984. 528 с.
3. Уряднікова І. В. Аналіз і визначення техногенних ризиків при штатній роботі у процесі водоочищення методом реагентної коагуляції і електрокоагуляції // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Кременчук, 2020. №5-6, С. 124-125.
4. Уряднікова І. В. Визначення техногенних ризиків в перехідних станах при експлуатації систем водоочищення в теплоенергетиці // Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. Львів, 2021. № 23. С. 11-19.
5. Shahani N. M., Sajid M. J., Zheng X., Jiskani I. M., Brohi M. A., Ali M., Qureshi A. R. Fault tree analysis and prevention strategies for gas explosion in underground coal mines of Pakistan // *Mining of Mineral Deposits*, 13(4), 2019, 121-128. <https://doi.org/10.33271/mining13.04.121>.
6. Mahmood Y. A., Ahmadi A., Verma A. K., Srividya A., Kumar, U. Fuzzy fault tree analysis: a review of concept and application // *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 4(1), 2013, 19-32. <https://doi.org/10.1007/s13198-013-0145-x>
7. Budiyanto M. A., Fernanda H. Risk Assessment of Work Accident in Container Terminals Using the Fault Tree Analysis Method // *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(6), 2020, 466. <https://doi.org/10.3390/jmse8060466>
8. Uriadnikova I. V., Lebedev V. H., Zaplatynskiy V. M., Tsyhanenko O. I. Early determination and evaluation of technogenic risks within the water purification systems of TSS and TPSS // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2022, № 1. 95 – 101. ISSN 2071-2227, E-ISSN 2223-2362.

REFERENCES

1. Lysychenko, G. V., Zabulonov, Yu. L., & Khmil, G.A. (2008). *Natural, man-made and environmental risks: analysis, assessment, management*. Kyiv: Naukova dumka. <https://www.nas.gov.ua/UA/Book/Pages/default.aspx?BookID=0000012597> [in Ukrainian].
2. Henly, E. J., & Kumamoto, H. (1984). *Reliability of technical systems and risk assessment*. Trans. with English. Moscow: Mashinostroenie. http://www.immsp.kiev.ua/postgraduate/Biblioteka_trudy/NadezhnostTekhnicheskikhSistemKumamoto1984.pdf [in Russian].
3. Uriadnikova, I. V. (2020). Analiz i vyznachennia tekhnohennykh ryzykiv pry shtatnii roboti u protsesi vodoochyschennia metodom reahentnoi koahuliatsii i elektrokoahuliatsii. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho*, 5-6, 124-125. [in Ukrainian].
4. Uriadnikova, I. V. (2021). Vyznachennia tekhnohennykh ryzykiv v perekhidnykh stanakh pry ekspluatatsii system vodoochyschennia v teploenerhetytsi. *Visnyk Lvivskoho derzhavnoho universytetu bezpeky zhyttiediialnosti*, 23. 11-19. [in Ukrainian].
5. Shahani, N. M., Sajid, M. J., Zheng, X., Jiskani, I. M., Brohi, M. A., Ali, M., ..., & Qureshi, A. R. (2019). Fault tree analysis and prevention strategies for gas explosion in underground coal mines of Pakistan. *Mining of Mineral Deposits*, 13(4), 121-128. <https://doi.org/10.33271/mining13.04.121>.
6. Mahmood, Y. A., Ahmadi, A., Verma, A. K., Srividya, A., & Kumar, U. (2013). Fuzzy fault tree analysis: a review of concept and application. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 4(1), 19-32. <https://doi.org/10.1007/s13198-013-0145-x>
7. Budiyanto, M. A., & Fernanda, H. (2020). Risk Assessment of Work Accident in Container Terminals Using the Fault Tree Analysis Method. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(6), 466. <https://doi.org/10.3390/jmse8060466>
8. Uriadnikova, I. V., Lebedev, V. H., Zaplatynskiy, V. M., & Tsyhanenko, O. I. (2022). Early determination and evaluation of technogenic risks within the water purification systems of TSS and TPSS. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1. 95 – 101. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-1> [in Ukrainian].

Use of logical-graphic methods of analysis of risks in the water supply systems of thermal power plants

Inga Uriadnikova

Abstract. Today's urgent issues in the water supply of thermal power plants are increasing the efficiency of production processes, reducing energy costs, introducing innovative technologies, as well as ensuring environmental safety and sustainable development. The analysis of the causes of industrial accidents and damages shows that the occurrence and development of accidents, as a rule, is characterized by a combination of random local events that occur with different frequency at different stages of the accident. Logical-graphic methods of fault trees and events are used to identify cause-and-effect relationships between these events. In order to investigate the identification and analysis of cause-and-effect relationships that contribute to the occurrence of failures in the water treatment system using a fault tree for the further development of effective measures to minimize risks and increase the reliability and safety of the water supply systems of thermal power plants, it is proposed to use logical-graphic methods on the previous stage of identification and assessment of technogenic risks. The analysis of the obtained results showed that: 1) the fault tree is an instantaneous display of the system at a certain moment in time t and is a graphical representation of the cause-and-effect relationships obtained as a result of identifying dangerous situations in the system in a forward and reverse order in order to find possible causes of their occurrence; 2) a complex final event should be determined using the so-called «tree top». The top of the tree consists of the final event and additional undesirable events, including potential accidents and dangerous conditions that are direct causes of the final event. The final event and additional events must be carefully defined and all the most important causes of the final event identified. Therefore, the first five heuristic rules must be used when building a rejection tree; 3) construction of a fault tree using heuristic rules can be used when considering any element of the system, however, to simplify cumbersome constructions, it is more appropriate to build trees only for the main elements that cause emergency situations and have a negative impact on people's lives and health, as well as on environment; 4) when building a fault trees for the technological scheme of water treatment, it is possible to specify and quantify events, to find events with a very high probability and a very low probability, to limit the further development of the fault trees and to establish the causes of failures at each stage of the water treatment process; 5) the rejection tree can be used for quantitative assessments using Markov models.

Key words: logical-graphic methods, «fault tree», reliability, safety, technogenic risks, water supply systems, thermal power engineering.

Стаття надійшла до редакції 22.08.2024