

Аналіз аварійних ситуацій на прикладі аміачних охолоджувальних систем

Проблеми продовольчої та техногенної безпеки

У статті узагальнено дані різних літературних джерел, у яких наведені можливі варіанти розв'язання питань безпеки аміачних промислових холодильних систем. Ці дані свідчать, що NH_3 є чи не найбезпечніший холодоагент. В усьому світі зараз удосконалюються технологічні схеми аміачних установок, і NH_3 переживає друге народження. У першій частині цієї статті показано тісні взаємозв'язки завдань підвищення енергетичної, продовольчої, техногенної безпеки. Виділяються окремі аспекти проблем, що потребують додаткових науково-технічних досліджень



Володимир Оніщенко: «Випадковий характер причин, що зумовлюють виникнення аварійних ситуацій та їх подальший розвиток, потребує теоретико-ймовірнісних підходів у постановці та розв'язанні завдань гарантування безпеки, методів теорії надійності технічних систем»

публікаціях пов'язуються з питаннями продовольчої безпеки регіонів, держав, світу. Концепція продовольчої безпеки сьогодні охоплює як традиційні аспекти (зменшення урожаїв одночасно зі збільшенням площ сільськогосподарських угідь, використання синтетичних, шкідливих для здоров'я людей консервантів, ароматизаторів, стабілізаторів тощо, функціонування й розвиток підприємств Держрезерву харчових продуктів, створення й функціонування мережі галузевих холодильників, плодоовочесховищ, забезпечення лабораторною базою та функціонування систем захисту прав споживачів харчових продуктів тощо), так і нові проблеми розроблення технологій, що дають змогу зберегти не тільки зовнішній привабливий вигляд продукту (лежкість плодів, овочів), а й зберегти в ньому речовини, що складають його харчову цінність. Нові наукові результати суттєво змінюють підходи до проектування камер холодильного зберігання м'ясної та рибної сировини, а холодильні технології

зберігання плодоовочевої сировини все більше передбачають використання синтетичних плівок в межах регульованого та модифікованого (РГС, МГС) газового середовища, але вже на більш високому технологічному рівні.

Наприклад, оснащені плівками (з різними значеннями проникності атмосферних газів) контейнери для різних видів харчової сировини стають невід'ємним елементом домашнього холодильника. Холодильна камера (декілька холодильних камер,

крім камери заморожування) такого холодильника має бути розрахована на декілька різних температурних рівнів, які найчастіше наближені до температур початку кристалізації води у певних (регіональних) видах харчової сировини, продуктів. Ці температурні рівні підтримуються з похибкою до десяти частки градуса, а мікропроцесор холодильника фіксує тепловологісну історію поміщеного в контейнер продукту. Результати відповідних розрахункових процедур відображаються на дисплеї холодильника у вигляді інформації про стан тієї чи іншої харчової сировини та конкретний термін її споживання. Розроблення та випробування математичних моделей та розрахункових процедур, що відображають динаміку біохімічних перетворень у свіжій харчовій сировині, сьогодні вельми інтенсивно ведуться в багатьох агрокультурних центрах світу. Такі розробки вже змінюють конструкцію домашнього холодильника і навіть його зовнішній вигляд.

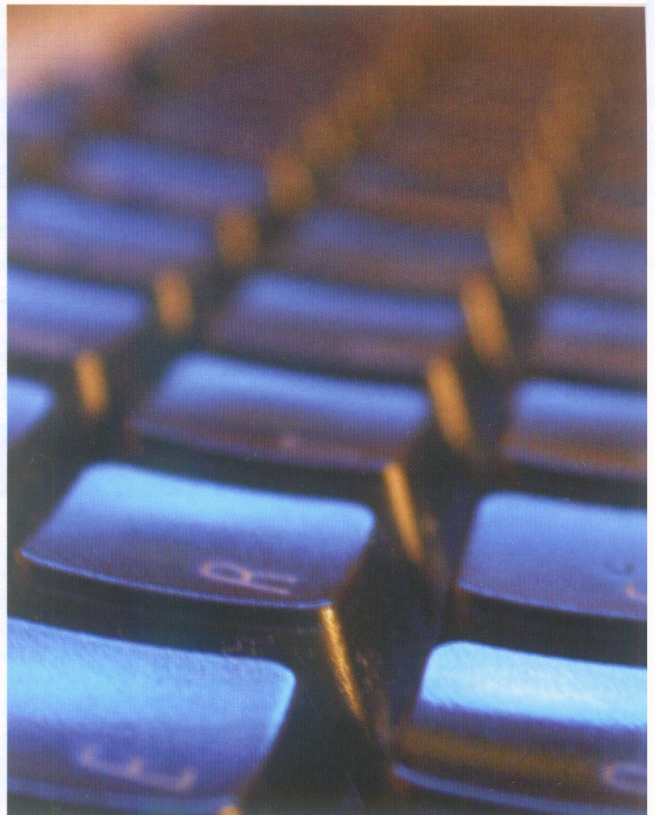
Розвиток науки про продукти, харчову сировину, поява нових знань щодо кінетики біохімічних реакцій в них у «післязбиральний період» все більше звертають увагу на недоліки наявних технологій холодильного оброблення та зберігання, відповідної холодильної техніки. Управління характеристиками харчової сировини та продуктів, процесами, що в них відбуваються, проектування нових пакувальних матеріалів, нових елементів холодильної техніки – ці проблеми дедалі частіше в сучасних

Як перелік, так і зміст проблем продовольчої безпеки можна деталізувати. Але в межах цієї статті приділимо увагу промисловим холодильникам, а саме тим ще не повністю визначеним аспектам продовольчої безпеки, що пов'язані з їх проектуванням, експлуатацією, модернізацією та реконструкцією, звичайно, з урахуванням екологічних аспектів.

Недоліки в проектуванні та експлуатації охолоджувальних систем промислових холодильників завжди зумовлюють не тільки надмірні витрати енергії, а і втрату маси продуктів, їх якості. Втрати маси, наприклад, м'яса тільки від усихання під час його холодильного оброблення в півтушах оцінюються фінансово як на порядок більші, ніж вартість електроенергії, яку холодильна установка споживає на вироблення холоду. Порушення режимів холодильного оброблення харчової сировини, її зберігання спричиняють надмірне випаровування вологи з продуктів, інтенсивний газообмін, коливання температури продукту і призводять до втрат якості продукту. А такі втрати, як суттєве зменшення концентрації вітамінів, біологічно активних речовин (БАР) у продуктах зводять нанівець ефективність роботи охолоджувальної системи, хоча дуже часто вони не очевидні, приховані за ще привабливим зовнішнім виглядом продукту. Випадкові чи заплановані від'єднання електроенергії, а тим більше виникнення аварійних ситуацій та самих аварій у роботі холодильних установок зумовлюють наслідки, що фінансово більш значущі, ніж заощаджується на вартості невитрачених обсягів електроенергії, до того ж ці наслідки можуть становити загрозу для продовольчої безпеки держави. Харчова сировина та продукти на шляху від виробни-

ка до споживача послідовно переміщуються від ланки до ланки холодильного ланцюга, що складається з холодильників переробних підприємств, торговельних холодильників, холодильників системи Держрезерву, транспортних холодильників, торговельних охолоджувальних прилавків, домашніх холодильників. Порушення режимів холодильного оброблення чи зберігання, а тим більше аварія в тій чи іншій ланці холодильного ланцюга, зведуть нанівець роботу всього ланцюга, спричинять суттєві втрати енергії та продовольчих ресурсів. Останнім елементом холодильного ланцюга є домашній холодильник, в якому внаслідок небажаних процесів харчова сировина чи продукт можуть втратити весь набір БАР, зокрема вітаміни, на збереження яких спрямовано роботу всього холодильного ланцюга.

З іншого боку, аварійні ситуації та аварії на холодильних установках свідчать про потенційну небезпечність останніх, оскільки наслідками таких аварій є руйнування самої холодильної установки, викид холодоагенту в навколишнє середовище, утворення та розповсюдження аерозольної хмари чи газової суміші, пожежа чи пожежа-спалах, вибух (що завдає людям механічних тілесних уш-



коджень), ударна хвиля, хімічний опік (шкіри, дихальних шляхів, легень), отруєння, психотропна, канцерогенна дія та інші ураження, захворювання та загибель людей.

З наведеного видно, наскільки тісно пов'язані завдання енергетичної, продовольчої та техногенної безпеки. Розроблення декларацій безпеки підприємств, що у своєму технологічному циклі використовують охолоджувальні системи, стає відповіддю на занепокоєння та турботу суспільства про здоров'я працівників підприємств, а також людей, що проживають у навколишніх житлових кварталах. Науково-

технічне обґрунтування таких розробок ще далеко не повне як для аміачних, так і для фреонових охолоджувальних систем.

Слід наголосити, що ємність аміачних чи фреонових охолоджувальних систем, планувальні рішення для холодильника, компресорного цеху певною мірою дають змогу контролювати масштаби руйнувань на випадок аварії, але завжди внаслідок цієї події втрачається харчова сировина чи продукти, які зберігались у холодильнику. Децентралізація охолоджувальних систем, зменшення їх ємності за холодоагентом та інші заходи знижують обсяги таких втрат, але не вирішують проблему в цілому.

Для аміачних систем є більше можливостей посилення їх безпечної експлуатації, мабуть, тому, що аміак привертає і привертає в цьому плані більше уваги, оскільки використовується як холодоагент понад сто років. Але треба також наголосити, що детальний аналіз (у процесі створення декларацій безпеки об'єктів підвищеної небезпеки) сценаріїв розвитку аварійних ситуацій та їхніх наслідків дає змогу завжди виявити найслабшу ланку в конструкції охолоджувальної системи. Після цього розроблюються варіанти модернізації цієї системи, що забезпечують більш надійну її експлуатацію, посилюють як енергетичну чи техногенну, так і продовольчу безпеку підприємства, галузі, держави.

Імовірнісні аспекти розвитку аварійних ситуацій

Випадковий характер причин, що зумовлюють виникнення аварійних ситуацій та їх подальший розвиток, потребує теоретико-ймовірнісних підходів у постановці та розв'язанні завдань гарантування безпеки, методів теорії надійності технічних систем. Охолоджувальні системи різних підприємств не являють собою сукупність ідентичних об'єктів. Це порівняно складні технічні системи, які не повторюються за схемними, проектними, конструкційними характеристиками, а тим більше за режимами експлуатації, тепловими навантаженнями. Тому статистичний аналіз аварій на аміачних охолоджувальних установках неможливий, а теоретико-ймовірнісний аналіз розвитку аварійних ситуацій для кожної окремої охолоджувальної системи стає безальтернативним.

За статистичними даними, ймовірність загибелі дитини у сьогоднішньому світі, зокрема у Європі, від випадкових причин становить близько 10^{-4} [1]. Ряд держав

Європи, серед них і Україна, у своєму законодавстві [2, 3] прийняли за поріг між безпечною і небезпечною експлуатацією потенційно небезпечного об'єкта величину ймовірності аварії, що на два порядки менша за ймовірність загибелі дитини від випадкових причин, тобто 10^{-6} . Беручи до уваги це значення, необхідно, згідно із законодавством, проводити аналіз надійності експлуатації охолоджувальних систем, зокрема аміачних.

В теорії надійності роботи технічних систем для опису ймовірності безвідмовної ро-

боти елемента установки протягом проміжку часу прийнята експоненційна функція надійності [4, 5, 6]

$$P(\tau) = e^{-\lambda \tau}, \quad (1)$$

де λ – інтенсивність відмов (індивідуальна характеристика елемента холодильної установки). Тривалість періоду часу, для якого можуть бути проведені розрахунки за формулою (1), становить, наприклад, один рік (8760 годин). Це період часу між проведенням планових робіт з ремонту елементів установки, сигналізаторів відмов, перевірки й

№ п/п	Найменування елемента, джерело даних	Інтенсивність відмов $\lambda \cdot 10^6$, година ⁻¹ ;		
		Нижня границя	Середнє значення	Верхня границя
1	2	3	4	5
1	Корпуси, [7]	0,03	1,1	2,06
2	Теплообмінники, [7]	2,21	15,0	18,6
3	Клапани соленоїдні перепускні, [7]	0,26	0,5	2,86
4	Клапани розвантажувальні [7]	0,224	5,7	14,1
	- за тиском	0,224	3,92	32,5
	- термічні	5,6	8,4	12,3
5	Манометри, [7]	0,135	1,3	15,0
6	Регулятори тиску, [7]	0,89	4,25	15,98
7	Резервуари гідравлічні, [7]	0,083	0,15	0,27
8	З'єднання гідравлічні, [7]	0,012	0,03	2,01
9	Трубопроводи, [7]	0,25	1,1	4,85
10	Шланги високого тиску, [7]	0,157	3,93	5,22
11	Індикатори вибухів, автоматичних систем придушення вибухів (АСПВ), [7]	–	0,25	–
12	Блоки керування автоматичних систем придушення вибухів, [7]	–	0,12	–
13	Гідроармати, АСПВ [7]	–	0,27	–
14	Зрошувачі АСПВ, [7]	–	0,32	–
15	Первинна відмова вимірювальних засобів (передавачі, регулятори, самописи тощо), [8]	–	50	–
16	Відмова датчика (низький тиск), [8]	–	130	–
17	Порушення водопостачання, [8]	–	1,0	–
18	Первинна відмова насоса, [8]	–	3,0	–
19	Відмова в мережі енергопостачання, [8]	–	0,3	–
20	Відмова датчиків, [8]	–	40	–
21	Відмова аварійної кнопки (ймовірність, беруть за постійну з причини обмеженого використання), [8]	–	$3 \cdot 10^{-4}$	–
22	Відмова сирени (ймовірність, беруть за постійну з причини обмеженого використання), [8]	–	$3 \cdot 10^{-4}$	–
23	Відмова датчика рівня (ймовірність події), [5]	–	$2 \cdot 10^{-4}$	–
24	Оператор не помітив світлової індикації, яка сигналізує про несправність системи автоматичної видачі дози (САВД), ймовірність (помилка оператора), [5]	–	$5 \cdot 10^{-3}$	–
25	Оператор не почув звукової сигналізації, яка сигналізує про відмову САВД, ймовірність (помилка оператора), [5]	–	$1 \cdot 10^{-3}$	–
26	Оператор не знав про необхідність виконання обов'язкової дії відповідно до технологічної інструкції з експлуатації агрегату (від'єднання, перемикання тощо), ймовірність, [5]	–	$1 \cdot 10^{-3}$	–
27	Відмова сигналізатора-аналізатора, що має сигналізувати про граничну концентрацію аміаку в повітрі, [9]	–	66,667	–
28	Відмова з вини оператора, [5]	–	100	–
29	З'єднання пневматичні, [7]	0,021	0,04	1,15

Таблиця 1. Інтенсивність або ймовірність відмов елементів

сертифікації вимірювальних приладів, випробувань трубопроводів і посудин під тиском, випробувань під тиском холодильної установки в цілому. Значення λ одержують шляхом проведення серії повторних випробувань (напрацювання відмов) технічних елементів на підприємствах, що їх виробляють. Одержані результати мають бути відображені у паспортах приладів, технічних пристроїв, що сьогодні не завжди має місце. Деякі з таких даних, які є в довідковій літературі й нормативних документах (НТД), представлені в табл. 1.

Легко побачити, що наведена в табл. 1 інформація має, на жаль, узагальнений характер, не стосується конкретних технічних елементів, виготовлених на конкретному підприємстві. Винятком тут є тільки дані щодо сигналізатора-аналізатора (позиція 27).

У випадку, коли даних про інтенсивність відмов у роботі конкретного елемента в літературі та НТД не знайдено, ймовірність безвідмовної роботи в [3] рекомендують розраховувати в рамках класичного ймовірнісного простору, з використанням розрахункових значень числа «сприятливих» серед загальної кількості проведених випробувань в межах конкретного випадкового експерименту. Для

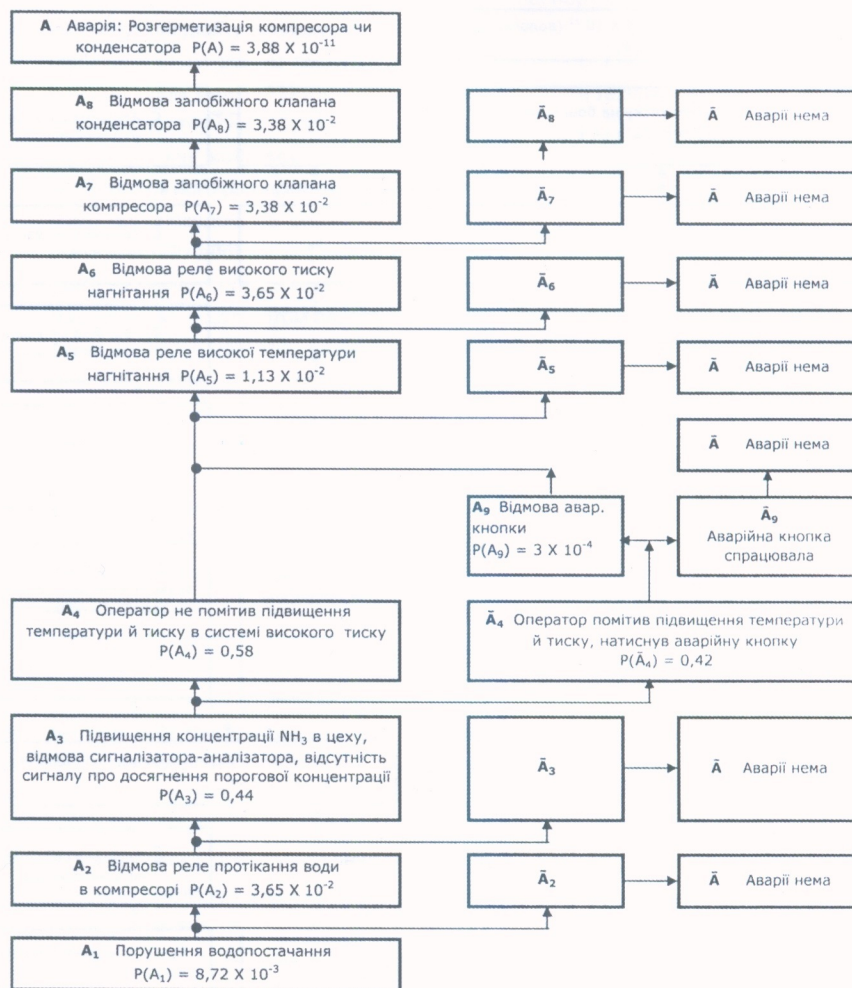


Рис. 1. Сценарій розвитку аварійної ситуації в аміачній холодильній установці з причини A1: порушення водопостачання

аналізу роботи охолоджувальних систем така рекомендація є категорично неприйнятною. Ще раз відзначимо, що статистичні дані про аварії аміачних систем і установок не мо-

жуть бути одержані з ряду причин, а значить не може бути побудована діаграма [3] для таких аварій. Такої діаграми немає в нормативних документах України та інших країн.

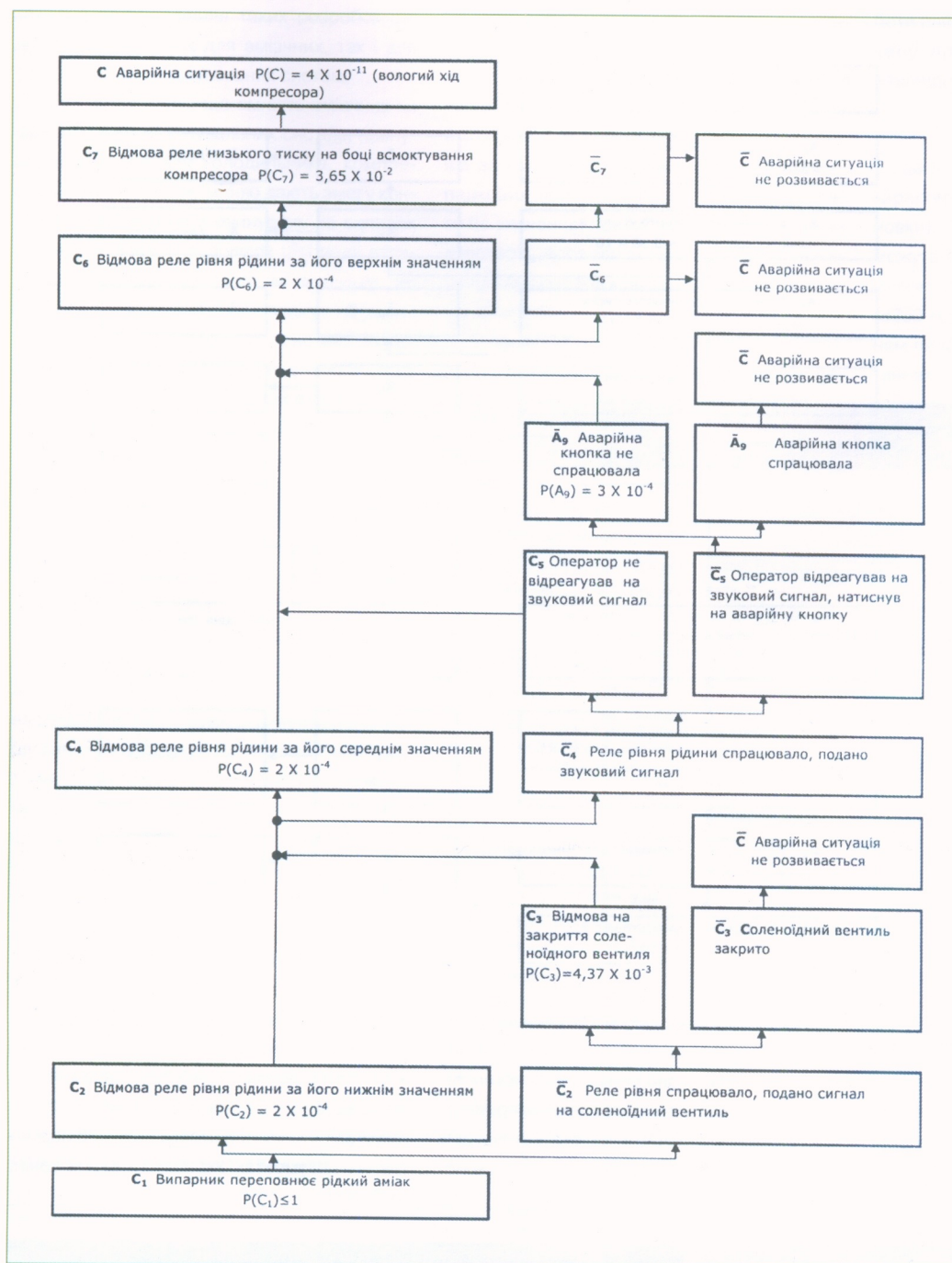


Рис. 2. Сценарій розвитку аварійної ситуації в аміачній холодильній установці з причини C1: випарник переповнює рідкий аміак

Відповідно без діаграми F/N немає початкових даних для аналізу соціального ризику, вибору його як критерію безпеки. Цю величину можна оцінити дирекційно, як таку, що перевершує обчислене значення індивідуального ризику на порядок [3]. Тому тут мова йде про значення індивідуального ризику – показник імовірності окремої аварії чи ураження окремої людини (обслуговує персонал чи населення) небезпечними факторами, що можуть виникнути під час роботи та внаслідок аварії холодильної установки. Його

граничне значення $R(\tau) = 1 - P(\tau) \cdot \dots \cdot 10^{-6}$, згідно з українським законодавством, може бути прийняте для аналізу охолоджувальних систем.

Виникнення та подальший розвиток аварійної ситуації під час роботи холодильної установки можуть бути наслідком ослаблення уваги оператора-машиніста до виконання своїх обов'язків (людський фактор), а також випадкових чинників, пов'язаних із надійністю роботи приладів захисної автоматики, наявністю термомеханічних, корозійних

пошкоджень у трубопроводах, корпусах обладнання, випадковим припиненням електропостачання окремих елементів установки – водяних насосів, вентиляторів градирень, приладів захисної автоматики – чи їх поломку. Ослаблення уваги обслуговує персоналу може виникнути не тільки за рахунок прояву халатного відношення до роботи. Вплив сонячної активності, інших кліматичних факторів можуть детерміновано обмежити можливості персоналу в забезпеченні надійності роботи об'єкту підвищеної небезпеки. Табл. 1 відображає статистичні дані про те, що найбільша ймовірність відмов пов'язана саме з роботою обслуговує персоналу (людський фактор, помилка оператора). Тому зменшення тут об'ємів використання персоналу, концентрація зусиль на посиленні надійності приладів захисної автоматики – безальтернативний шлях підвищення безпеки експлуатації охолоджувальних систем під час їх модернізації.

Виникненням аварійної ситуації під час роботи аміачної холодильної установки (АХУ) можна вважати відхилення від номінальних кількісних значень ряду параметрів (температури, тиску, витрат аміаку, води, мастила), що характеризують її номінальну роботу. Причинами цього можуть бути:

- порушення водопостачання внаслідок випадкового припинення електропостачання водяних насосів або вентилятора градирні, прориву водяного трубопроводу, їх поломку тощо;
- перевищення маси аміаку, заправлено-го в установку (нормативи для цієї величини не досить чіткі, дещо переzapовнена система працює ефективніше, а це спонукає персонал до переzapовнення системи);
- значні коливання теплового навантаження на випарник;
- помилки персоналу під час ручного управління роботою АХУ, такі як вимкнення на-

сосів чи пуск компресора за закритого нагнітального вентиля;

- поломка чи неспрацювання окремих елементів АХУ в цілому, зокрема приладів захисної автоматики.

Багато інших причин виникнення аварійних ситуацій наведено в нормативних документах (правилах) з безпечної експлуатації АХУ, зокрема в монографії [10].

Випадкова подія «аварія» полягає вже в тому, що здійснюється розгерметизація холодильної установки в цілому, в навколишнє середовище (приміщення компресорно-конденсаторного відділення, холодильних камер) викидається аміак в рідкому чи газовому стані. Такий викид супроводжується частковим чи повним руйнуванням АХУ. Реалізація ж випадкової події «аварія» можлива за послідовної реалізації ланцюга випадкових подій (згідно зі схемою холодильної установки, модельними уявленнями про фізичні, технічні принципи її роботи) під час експлуатації її елементів. Ці випадкові події («Так» – елемент нормально працює; «Ні» – елемент не спрацював (відмова)) можуть бути як незалежними, так і залежними. Відповідно (при найпростішому аналізі) може застосовуватись теорема множення ймовірностей випадкових незалежних подій, може бути використаний байєсовський підхід (формула Байєса) для обчислення ймовірностей залежних подій (умовних ймовірностей). Модельні уявлення про послідовний перебіг випадкових подій, що ведуть до випадкової події «аварія», називають можливим сценарієм аварії. Сукупність різних сценаріїв складає «дерево подій».

На рис. 1 представлено один із можливих сценаріїв аварії найпростішої АХУ, що призначена для охолодження вторинного холодо-

носія, який циркулює по замкнутому контуру. На рис. 2 представлено сценарій розвитку аварійної ситуації у випадку, коли випарник переполюється рідким аміаком, де основним приладом захисної автоматики є поплавцевий регулятор рівня. Тут аварійна ситуація «вологий хід компресора» не завжди закінчується його розгерметизацією. Наголошено, що наведені на рис. 1, 2 значення ймовірностей одержані за формулою (1) та за узагальненими середніми даними табл. 1. Важливим же результатом аналізу представлених сценаріїв розвитку аварійних ситуацій для найпростішої АХУ та можливих інших сценаріїв є значення ймовірності аварії в цілому, що не перебільшує $3,18 \cdot 10^{-8}$ (а це менше за порогове значення 10^{-6}). Для складніших АХУ кількість можливих причин виникнення аварійних ситуацій і кількість можливих сценаріїв розвитку аварійних ситуацій зростає, але принципових методичних проблем їх імовірнісного аналізу не виникає. Принциповими моментами тут є наявність даних про інтенсивність відмов для конкретно встановлених на АХУ конструкційних елементів, приладів діагностики та захисної автоматики (в паспортах, сертифікатах), розроблення на цій основі нової чи модернізація дійсної декларації безпеки, проведення аналізу одержаних результатів, періодичний контроль (впровадження нових та періодична сертифікація встановлених) елементів холодильної установки та її подальша модернізація, що виконує технічний персонал підприємства. Актуальне завдання в розвитку ринку холодильної техніки, аміачної та фреонові, – встановлення таких відносин між виробниками обладнання та приладів і покупцями, за яких інформація про показники надійності приладів і обладнання завжди була б вірогідною, дос-

тупною, прозорою, завжди відображалася в паспортах і рекламній продукції.

В. П. Оніщенко, заслужений діяч науки
й техніки України, д. т. н., проф. ОДАХ,
академік МАХ
(Продовження у наступному номері)



Література

1. Alle B.J.M. Risk analysis and risk policy in the Netherlands and the EEC // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 1991. Vol. 4. № 1.
2. *Proceedings of IIR Conference: Ammonia Refrigerating Systems, Renewal and Improvement*, Ohrid, 2005.
3. Методика визначення ризиків та їх прийнятих рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки. – Київ: Основа, 2003.
4. Надежность технических систем, под ред. И. А. Ушакова. – М: Радио и связь, 1985.
5. Надежность и эффективность в технике. Т. 10: Справочные данные по условиям эксплуатации и характеристикам надежности, под ред. В. А. Кузнецова. – М: Машиностроение, 1990.
6. Хенли Э. Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. – М: Машиностроение, 1984.
7. ГОСТ 12.1. 004-91. Пожарная безопасность. Общие требования. – М., 1992.
8. ГОСТ 27.310-95. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. – М., 1995.
9. Сигнализатор – анализатор (Дозор СВ ТЦ). Дозор-х- АММИАК-501х, 610х, 701х, 801х / Руководство по эксплуатации ОКДМ. 468514. 003-18 РЭ, NH₃. – 2003.
10. Оніщенко Н. П. Безопасные методы работы при монтаже, наладке, эксплуатации и ремонте аммиачных холодильных установок. – М: Легкая и пищевая промышленность, 1984.