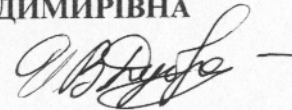


ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

ДУБРО ІРИНА ВОЛОДИМИРІВНА



УДК 621.564: 504.38

**БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ТА ОЦІНКА АЛЬТЕРНАТИВ ПРИ ПЕРЕВЕДЕННІ
ХОЛОДИЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ НА СУЧАСНІ
ХОЛОДИЛЬНІ АГЕНТИ**

Спеціальність 05.05.14 – Холодильна та кріогенна техніка,
системи кондиціонування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2005

Дисертація є рукописом

Робота виконана в Одеській державній академії холоду Міністерства освіти і науки (МОН) України.

Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент
БОДЮЛ Ольга Ігорівна,
Одеська державна академія холоду МОН
України,
доцент кафедри хімії, охорони навколишнього
середовища та раціонального
природокористування.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
МАЗУР Віктор Олександрович,
Одеська державна академія холоду МОН
України, завідувач кафедри технічної
термодинаміки;

доктор технічних наук, професор
РАДЧЕНКО Микола Іванович,
Національний університет кораблебудування
ім. адмірала Макарова МОН України, завідувач
кафедри кондиціонування та рефрижерації.

Провідна установа – Одеський національний політехнічний
університет МОН України, Одеса.

Дисертація відбудеться “12” 05 2005 р.
години в ауд. №108 на засіданні спеціалізованої вченої ради
в Одеській державній академії холоду за адресою:
Одеса, 1/3, м. Одеса, 65026, Україна.

ознайомитися в бібліотеці ОДАХ за адресою:
Одеса, 65026, Україна.

04 2005 р.

Мілованов В.І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Сучасна стратегія розвитку холодильної промисловості орієнтована на зниження техногенного навантаження на природне середовище. Важливим фактором, що визначає негативні наслідки виробництва холоду, є вплив на людину і довкілля холодильних агентів. Виробництво і застосування холодоагентів, які вважаються небезпечними за впливом на радіаційний баланс планети і озоновий шар, регулюються міжнародними угодами і конвенціями. Відповідно новітньої інформації за результатами гляціохімічних досліджень українських антарктичних експедицій зростання концентрації в атмосфері багатьох галогеновуглеводнів пояснюється наявністю потужних нетехногенних джерел емісії, а також природними циклічними процесами, не пов'язаними з діяльністю людини, зокрема, з виробництвом холоду. У світі цих даних актуальними є всебічний аналіз небезпеки холодоагентів та розробка обґрунтованих рекомендацій щодо оцінки альтернатив при переведенні холодильного обладнання на сучасні робочі тіла.

При виборі холодоагентів повинні сумісно враховуватися різнобічні аспекти їх глобального і локального, прямого і опосередкованого впливу на природне середовище, який визначається сукупністю часто суперечливих якостей речовин – фізико-хімічних, термодинамічних, експлуатаційних, токсикологічних та ін. Але до цього часу не сформовані критерії і показники, які б забезпечували таку оцінку і доцільний вибір холодоагенту з урахуванням як об'єктивних вимог, так і споживчих переваг різного характеру. В умовах превалювання екологічних цілей глобального рівня відсутність загальноприйнятого підходу до аналізу і оцінки небезпеки робочих речовин, які використовуються в холодильній техніці, а також методів комплексного урахування суперечливих вимог до холодоагентів, відповідних методик і програмного забезпечення ускладнює прийняття достатньо обґрунтованих рішень у галузі.

Обраний напрям досліджень відповідає Постанові Верховної Ради України від 4.02.2004 про ратифікацію Кіотського Протоколу, який набрав чинності 16.02.2005; Постанові Кабінету Міністрів України №624 від 16.05.2002 р. “Про посилення державного регулювання ввозу і вивозу з України озоноруйнуючих речовин”; Постанові Кабінету Міністрів України №1274 від 17.10.1996 р. “Про програму припинення виробництва і використання озоноруйнуючих речовин”.

Мета і задачі досліджень. Метою дисертаційної роботи є розробка методів та процедур прийняття доцільних рішень при переведенні холодильної техніки на сучасні холодоагенти, а також формування баз даних по небезпеці альтернативних, перехідних, природних і тих традиційних речовин, присутність яких в атмосфері має нетехногенний характер.

Відповідно з метою роботи були поставлені і вирішені такі задачі:

- на основі аналізу результатів експериментальних досліджень українських антарктичних експедицій ідентифіковані речовини, що використовуються як холодоагенти, присутність яких в атмосфері спричиняють природні процеси;
- розроблено моделі оцінки небезпеки холодильних агентів, які засновані на адитивних функціях і апіорно-апостеріорних процедурах;
- розроблено метод аналізу небезпеки холодильних агентів, який включає прямі та опосередковані аспекти глобального впливу на природне середовище і впливу на локальному рівні та передбачає широке використання відомих експериментальних даних про властивості робочих тіл холодильної техніки для визначення факторів ризику;
- проаналізовано процес прийняття рішення про вибір речовини з залученням результатів експертизи при урахуванні ієрархічності екологічних цілей, пріоритетів і кон'юнктур, а також виявлено у просторі критеріїв небезпеки області прийнятних рішень;
- за розробленими методами з залученням даних про випробування компресорів визначені екологічні характеристики холодильного обладнання в умовах переведення на сучасні холодоагенти;
- розроблена інформаційно-обчислювальна система EcoRef для визначення екологічних показників холодоагентів.

Об'єктами дослідження є галогеноуглеводневі та природні холодоагенти, **предметом** – фактори небезпеки при переведенні холодильного обладнання на сучасні робочі тіла.

Методи дослідження: теорії прийняття рішень, зокрема, багатокритеріальне моделювання; інформаційно-екологічні; експертних оцінок й анкетування, комп'ютерного моделювання.

Наукову новизну отриманих результатів складають:

- нові методи аналізу і оцінки небезпеки холодоагентів, що враховують канали глобального і локального впливу цих речовин на природне середовище, а також фактори прямого і опосередкованого ризику при їх використанні;
- інформаційно-обчислювальна система EcoRef для розрахунку широкого кола екологічних показників холодоагентів;
- база даних по екологічній небезпеці холодоагентів.
- екологічні характеристики систем охолодження різного призначення при переведенні їх на сучасні холодоагенти.

В дисертації захищаються такі **наукові положення:**

1. Методи екологічного аналізу, засновані на адитивних функціях і апіорно-апостеріорних процедурах, забезпечують визначення небезпеки холодоагентів і ризику, пов'язаного з їх використанням у різних областях холодильної техніки, в умовах як ієрархічної природи екологічних цілей, так і змінювання пріоритетів.

2. Концепція екологічної досконалості систем охолодження за умови послідовного урахування факторів прямого та опосередкованого впливу на довкілля на локальному та глобальному рівнях забезпечує збалансований вибір серед холодоагентів штучного та природного походження.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень і результатів визначається коректною постановкою задач, перевіркою працездатності запропонованих моделей і статистичною стійкістю результатів, одержаних за різними моделями розрахунку, а також використанням сучасних математичних методів прийняття рішень та їх реалізацією при аналізі екологічної небезпеки холодильних агентів.

Практична цінність одержаних результатів. Впровадження в практику розроблених методів оцінки альтернатив при переведенні холодильного обладнання на сучасні холодоагенти сприятиме формуванню подальшої природоохоронної стратегії в холодильній техніці для забезпечення сталого розвитку. Розроблена інформаційно-обчислювальна система EcoRef і база даних з екологічної небезпеки холодоагентів передані для використання СП “Айсблїк” та Інституту технологічних проблем країн Азії, Африки та Латинської Америки. Впровадження системи EcoRef зменшило кошти на інформаційне забезпечення проектних робіт та трудомісткість процесу прийняття рішень про прийнятний рівень безпеки при експлуатації холодильного обладнання. Розроблені методи оцінки небезпеки галогеноуглеводнів і ризику передано Асоціації “Екологічна безпека і протидія надзвичайним ситуаціям” ім. ак. Н.І.Андрусева для досліджень у галузі прогнозування факторів техногенного ризику, пов'язаного з експлуатацією об'єктів низькотемпературної техніки. Одержані результати використовуються у навчальному процесі в Одеській державній академії холоду для студентів за напрямками підготовки 0905 “Енергетика” та 0708 “Екологія”. Результати роботи, а саме інформаційно-обчислювальна система EcoRef і база даних з екологічної небезпеки холодоагентів, також використовуються IG Samson Enterprises (Vernon, Connecticut, USA). Документи, що підтверджують впровадження результатів роботи, наведені у Додатку Д.

Особистий внесок автора полягає у виконанні основної частини роботи, пов'язаної з аналізом даних щодо впливу холодильних агентів на склад атмосфери, кліматичну систему, а також на людину і інших потенційних реципієнтів; з кількісним аналізом даних про надходження в атмосферу галогеноуглеводнів від природних і техногенних джерел, з формуванням нових узагальнених критеріїв, моделей та методів оцінки небезпеки холодильних агентів і ризику їх використання. Здобувачем розроблена інформаційно-обчислювальна система EcoRef і сформована база даних з екологічної небезпеки холодильних агентів, виконано аналіз притягнутих експериментальних даних та результатів випробування холодильного

обладнання при переведенні на нові холодоагенти, проведено комплекс розрахункових досліджень екологічних показників систем охолодження при роботі на сучасних робочих тілах і розроблені рекомендації по прийняттю екологічно обґрунтованих рішень про вибір холодоагенту.

Апробація роботи. Основні положення і результати дисертаційної роботи були предметом доповідей і обговорення на 21-му Міжнародному конгресі по холоду (Вашингтон, США, 2003), 11-му Міжнародному симпозиумі “Запобігання відходів-2004” (Прага, Чехія, 2004); 3-му Міжнародному семінарі “Глобальні фазові діаграми” (Одеса, Україна, 2003); 5-й Міжнародній міждисциплінарній науково-практичній конференції “Сучасні проблеми науки і освіти” (Алушта, Україна, 2004); Міжнародній науково-технічній конференції “Сучасні проблеми холодильної техніки і технології” (Одеса, Україна, 2001); Наукового семінару у рамках IV Міжнародної промислової виставки “INTEC-2001” (Chemnitz, Німеччина, 2001), VI Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених “Екологія. Людина. Суспільство” (Київ, Україна, 2003) та ін.

Публікації. Автором по темі дисертації опубліковані 4 статті у фахових періодичних журналах, які відповідають вимогам ВАК України, 10 робіт в збірниках наукових праць міжнародних та регіональних наукових конференцій, 9 навчально-методичних посібників.

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, основних висновків, списку літератури, що містить 210 джерел, і 5 додатків. Робота викладена на 213 сторінках, включаючи 41 таблицю і 50 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, показано зв'язок з державними програмами, сформульована мета і задачі роботи, наведені наукові положення, що захищаються, відомості про наукову новизну, практичну цінність і реалізацію результатів дисертаційної роботи. Наведені також відомості про особистий внесок автора, про апробацію результатів і публікаціях по темі дисертації.

Перший розділ присвячений розгляду основних проблем і принципів оцінки небезпеки і вибору екологічно безпечних речовин для використання у холодильній техніці. Показано, що природоохоронна стратегія у холодильній техніці в рамках концепції сталого розвитку повинна спиратися на всебічну оцінку внеску галогеновміщуючих холодоагентів в зміну глобального клімату Землі і стану атмосфери.

Новітні дані про процеси динаміки атмосфери, про фізико-хімічні процеси в стратосфері, про джерела емісії домішок, що впливають на дані процеси, а також результати експериментального дослідження вкраплень повітря у

старовинному антарктичному льоді, які є свідцтвом про склад атмосфери в доіндустріальну епоху (1000 і більше років тому), дозволили ідентифікувати речовини, що використовувалися в холодильній техніці, присутність в атмосфері яких може мати природні причини. Це CFCl_3 (R11), CF_2Cl_2 (R12), CClF_3 (R13), $\text{CCl}_2\text{FCCLF}_2$ (R113), $\text{CClF}_2\text{CCLF}_2$ (R114), CHCl_2F (R21), CHClF_2 (R22), CHF_3 (R23) та ін. Відповідно останнім літературним даним, фреони будь-якого генезису не можуть суттєво впливати на проминання хлорного каталітичного циклу руйнування стратосферного озону. Потоки інших хлор- і бромвміщуючих газів (понад 1500 найменувань), в основному океанічного походження, перевищують їх як мінімум на порядок. Згідно виконаної оцінки на підставі даних про структуру споживання галогеноуглеводнів, про ймовірність витоків холодоагентів та відповідні діючі нормативи, а також даних про сумарні викиди техногенного генезису з урахуванням природного стоку і атмосферного терміну життя цих речовин, можливий внесок витоків холодильних агентів в глобальну емісію галогеноуглеводнів може складати близько 0,5%.

Для обґрунтованого прогнозування внеску холодильних агентів у вплив на радіаційний баланс планети були проаналізовані літературні дані про процеси, що формують природні кліматичні коливання, про кліматичні тенденції в минулі епохи і про джерела парникових газів в атмосфері. Головна тенденція зміни клімату за останні 10 тис. років – перехід від холодних умов кінця плейстоцену до кліматичного оптимуму з температурою на 2-3°C більш високою, ніж сучасна, і наступне похолодання з недовгочасними потепліннями. Таким чином, сучасне глобальне потепління (0,5°C за період інструментальних спостережень) – чергова флуктуація, друга за останні 100 років, у низці автоколивань, посилена техногенним фактором. Заснована на зіставленні літературних даних оцінка розрахункового радіаційного впливу холодильних агентів при діючих нормах витоків складає приблизно 0,01 впливу основних парникових газів від регулярних природних і техногенних джерел.

В розділі розглянутий локальний вплив холодоагентів на здоров'я і безпеку людини і навколишнього середовища. Проаналізовані дані про пожежебезпечність, токсичність, наркотичний вплив, серцеву сенсibiliзацію, рівні потенціального ризику здоров'ю персоналу і безпеці їх роботи та ін. Для запобігання непередбачених екологічних наслідків необхідні коштовні дослідження токсичних, канцерогенних, мутагенних та інших властивостей речовин, що впроваджуються на ринку. Такі дослідження потребують часу, який перевищує “термін життя” як холодоагенту, так і відповідного холодильного обладнання.

Адекватна оцінка екологічних якостей холодоагентів можлива при достатньо повному урахуванні прямих і опосередкованих впливів на природне середовище. Прямий вплив пов'язаний з ймовірністю витоків холодоагенту, а

опосередкований – з експлуатацією та виготовленням холодильного обладнання. Екологічна досконалість робочого агента залежить від витрат енергії у циклі, наслідком яких є посередні, при виробництві цієї енергії, викиди в атмосферу токсичних, озonoактивних, парникових газів. При правильній експлуатації ризик витоків робочої речовини із практично герметичної системи рідко перевищує допустимий рівень. Пряма небезпека циркулюючого у холодильній системі робочого тіла виявляється значно нижчою небезпеки, пов'язаної з регулярною емісією шкідливих речовин у процесі виробництва енергії.

Виконаний аналіз існуючих методів оцінки екологічних показників холодоагентів показав, що на цей час жоден з підходів не дозволяє здійснити комплексне урахування усіх екологічних вимог і факторів безпеки. Розповсюджені методи (TEWI, LCCP, ITWE, TEGHGE) призначені для оцінки переважно радіаційного впливу холодильних агентів. До недоліків існуючих методів також слід віднести відсутність достатньо простих процедур урахування ієрархічної природи суперечливих вимог до холодоагентів і змінювання цих вимог у часі. Відсутні також у вітчизняній практиці необхідні програмні засоби для розрахунку екологічної небезпеки холодоагентів з достатньо повним обліком факторів ризику, а також відповідні бази даних, які б забезпечували обґрунтований вибір робочого агента.

Наведена інформація дозволяє зробити висновок про актуальність адекватної оцінки екологічної небезпеки і ризику як альтернативних і природних речовин, так і перехідних і хлорфторуглеводневих холодоагентів, які мають високу термодинамічну ефективність і відмінні експлуатаційні якості, присутність яких в атмосфері, згідно до нових даних, має нетехногенні причини.

У своїх дослідженнях автор спирався на роботи G.Lorentzen і Л.З. Мельцера, які сформулювали найважливіші екологічні проблеми в холодильній техніці; роботи І.М.Калніня, Г.К.Лавренченка, В.О.Мазура, В.П.Железного, М.Г.Хмельнюка та ін., у яких розглянуто різні концепції і підходи до вибору холодильних агентів і оцінці як їх термодинамічної ефективності, так і екологічних показників; роботи S.K.Fisher, C.Petitjean, J.Baker, Akira Sekiya, J.Mc.Mallan та ін. по сучасним методам екологічного аналізу холодильних агентів, роботи М.І.Будико, В.Л.Тальрозе, В.Ф.Грищенко, В.І.Богилло, В.Л.Сивороткіна, R.S.Bradly, M.E.Mann, P.A. Mayevski, T.J.Crowley та ін. по дослідженням стану атмосфери і кліматичної системи, роботи Цикала А.Л., Б.П.Івченка, J.J.Buckley, G.W.Suter, T.Mill та ін., по методам оцінки ризику і екологічних ситуацій; В.А.Крисилова по аналізу та уніфікації задач інтелектуальної обробки даних, а також G.J.Doombos, C.H.M. Machielsens та ін. по формуванню баз даних про токсичність і безпеку холодильних агентів.

Другий розділ дисертації присвячений розгляду методологічних принципів оцінки альтернатив при переведенні холодильного обладнання на сучасні холодоагенти. Виконується аналіз процесу прийняття рішення, показані різні структури переваг в задачі вибору безпечного холодильного агента. Формується ієрархія цілей і узагальнені критерії оцінки безпеки і екологічного ризику на основі методів рішення багатокритеріальних задач. В розділі також наведені приклади розрахунків і здійснюється перевірка працездатності запропонованих моделей і методів.

Широкі можливості при прийнятті рішення урахування ієрархічності екологічних цілей, а також змінних пріоритетів дозволяє використання адитивних функцій і апіорно-апостеріорних процедур. Переваги використання адитивних функцій пов'язані з можливістю притягнення результатів експертизи, що є одним з ефективних методів зняття невизначеності, пов'язаною з незіставленістю альтернатив за різними показниками екологічної небезпеки. З другого боку, адитивні функції допускають рішення, основане на формальній моделі задачі, яке не залежить від відсутніх в цій моделі факторів. Частковим випадком адитивної функції є принцип рівномірної оптимальності:

$$U(r) = \sum_{i=1}^n (u_i(r) - u_i^{\min}) / (u_i^{\max} - u_i^{\min}) = \sum_{i=1}^n \lambda_i u_i(r) - \sum_{i=1}^n \lambda_i u_i^{\min}, \quad (1)$$

де $U(r)$ – узагальнена оцінка безпеки, $u_i(r)$ – частковий критерій екологічної небезпеки, який відображує i -й фактор ризику; $\lambda_i = \frac{1}{u_i^{\max} - u_i^{\min}}$ – шкалююча константа.

Для урахування змінювання пріоритетів в процесі прийняття рішення функцію безпеки можна надати в більш повному вигляді, шляхом формування додаткових компонент $v(u) = \sum_{i=1}^4 v_i(u_i)$ функції безпеки за умовами $v_i(u_i^{\max}) = 0$, $v_i(u_i^{\min}) = 1$ (рис.1).

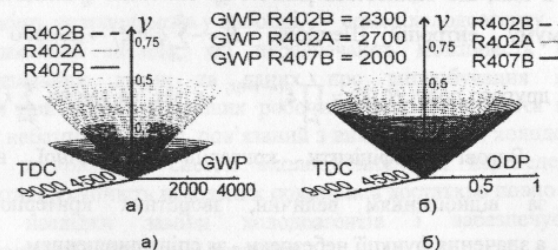


Рис.1. Побудова компоненти функції безпеки за двома (а) і трьома (б) критеріями для замінювачів R502 у промисловому холодильному обладнанні. Урахування озоноруйнуючого потенціалу (ODP) як пріоритетного критерію змінює область безпечних рішень. Оцінка за чотирма і більш критеріями підтверджує одержаний результат про перевагу R407B за умов екологічної безпеки.

Урахувати значущість окремих показників при оцінці небезпеки холодоагентів можливо шляхом представлення компоненти функції небезпеки у вигляді вагових коефіцієнтів $v(u_i) = \sum_{i \in P} \lambda_i$. Одним з методів визначення λ_i є ранжирування профілів функції небезпеки (рис.2), для чого необхідний попередній аналіз пріоритетів. Вагові коефіцієнти λ_i критеріїв небезпеки у загальному випадку залежать від екологічних цілей і визначаються в залежності від їх умовних вагових функцій $\lambda_i = \mu(\{P_2\} | P_1) \cdot \mu(P_2)$, де P_1 і P_2 – екологічні цілі різних ієрархічних рівнів. Ранг цілі встановлюється на підставі існуючих міжнародних угод, нормативних актів, державних стандартів. Широко використовуються також експертні оцінки.

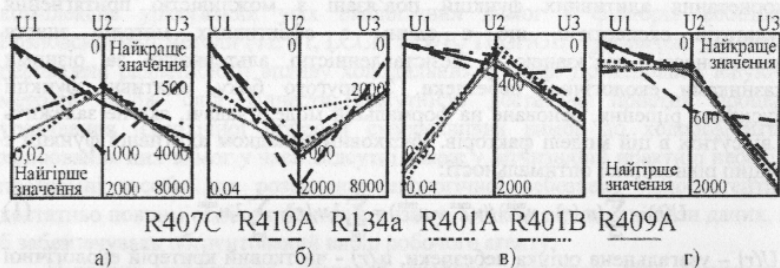


Рис. 2. Профілі функції небезпеки замінювачів R12 і R22 у холодильному обладнанні без урахування пріоритетів (а); згідно з пріоритетами, які визначені Монреальським протоколом (б); згідно з пріоритетами, які визначені Кіотським протоколом (в); згідно з пріоритетами, які визначаються санітарно-гігієнічними вимогами (г).

У якості оцінчного функціоналу, який дозволяє здійснити ранжирування екологічних цілей, може бути використаний критерій Байєса $W_i = \sum_{j=1}^m \zeta_{ij} \xi_j$, де ξ_j – ступінь переваги j -ї речовини з точки зору екологічних наслідків, які відповідають i -й цілі, що оцінюється рангом ζ_{ij} . Значення ξ_j визначаються за умови максимуму ентропії Шеннона $H = -\sum_{j=1}^m \xi_j \ln \xi_j \rightarrow \max$ або функції невизначеності другого роду $H_2(\xi) = \prod_{j=1}^m \xi_j^{(m-j+1)k_j} \rightarrow \max$ за умови $\sum_{j=1}^m k_j \xi_j = 1$, де $f = m - \sum_{j=1}^m (k_j - 1)$. Вагові коефіцієнти критеріїв екологічної небезпеки визначаються за відношенням величин, зворотних критерію Байєса $\lambda_i = W_i^{-1} / (\sum_{i=1}^n W_i^{-1})$, а значення функції небезпеки – за співвідношенням

$$U(R) = \sum_{i=1}^n \lambda_i u_i^*(r_i), \quad (2)$$

де $u_i^*(r)$ – нормоване значення i -го критерію екологічної небезпеки.

Зіставлення результатів розрахунку за різними моделями показало незначну різницю між значеннями як ξ_i так і λ_i . Отже, одержані результати можна вважати статистично стійкими.

Сумісний облік прямих і посередніх екологічних наслідків можна здійснити на підставі поняття екологічної досконалості холодоагенту:

$$\eta_{eco} = d_{io} / d_i = a_0 q_i / \left(\sum_{i=1}^n a_i \chi_i + \sum_{i=1}^n a_i \psi_i + (\beta + l_{ad}) \sum_{i=1}^n a_i \zeta_i \right), \quad (3)$$

$$\eta_{es} = \eta_e / [b_1 + 1 / (b_2 \cdot \varepsilon_s + \varepsilon / \varepsilon_s)], \quad (4)$$

де η_{eco} , η_{es} – ступінь екологічної досконалості одноступеневого теоретичного і ускладненого циклів з даним холодоагентом; d_{io} , d_i – питомі екологічні наслідки зразкового генератору холоду та такого, що працює по теоретичному одноступеневому циклу; l_{ad} – питома адіабатна робота стиску; q_i – питоме відпрацьоване тепло екологічно зразкового аналогу; ε , ε_s – холодильний коефіцієнт теоретичного і ускладненого циклів; a_0 , a_i – функції відгуку на теплове забруднення та на емісію i -ї небезпечної речовини; χ_i – прямі скиди тепла і небезпечних речовин; ψ_i , ζ_i – приведені посередні скиди i -ї небезпечної речовини при виробництві витрачених матеріалів та енергії; β – приведені питомі витрати енергії на виробництво витрачених матеріалів; n – розрахункове число каналів впливу на природне середовище; $b_1 = 1 / [1 + (\beta \sum_{i=1}^n a_i \zeta_i) / (\sum_{i=1}^n a_i \psi_i) + (q_0 \sum_{i=1}^n a_i \zeta_i) / (\varepsilon \sum_{i=1}^n a_i \psi_i)]$, $b_2 = [\beta + (\sum_{i=1}^n a_i \psi_i) / (\sum_{i=1}^n a_i \zeta_i)] / q_0$ – коефіцієнти.

Порівняльний аналіз екологічного ризику для j -го холодоагенту з урахуванням часткових ризиків, пов'язаних з прямими та посередніми наслідками глобального і локального характеру може виконуватися на підставі критерію

$$R_j = \left\{ \sum_{i=1}^n a_i \chi_i + a_i \psi_i + (\beta + l) \sum_{i=1}^n a_i \zeta_i \right\} / \left\{ \sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=1}^n a_i \chi_i + a_i \psi_i + (\beta + l) \sum_{i=1}^n a_i \zeta_i \right] \right\}, \quad (5)$$

де m – кількість холодоагентів у вибірці, j – номер холодоагенту.

Запропоновані методи, які передбачають можливість використання експериментальних даних та даних про випробування холодоагентів при роботі на різних робочих тілах, дозволяють визначити як екологічну небезпеку і ризик, пов'язаний з використанням холодоагентів, так і екологічну досконалість систем охолодження при переведенні на нові холодоагенти. Сукупність наведених показників достатньо повно характеризує екологічні наслідки заміни холодоагентів і забезпечує достатньо обґрунтований вибір безпечної речовини.

В третьому розділі надано опис розробленої інформаційно-обчислювальної системи EcoRef для розрахунку екологічних показників холодоагентів та бази даних по екологічній небезпеці 150 чистих речовин та

сумішей, з яких близько 80 використовуються і пропонуються для використання як робочі тіла в системах охолодження. Докладно розглянуто етапи розробки системи, її структура, компоненти і алгоритми функціонування. Введено поняття проекту, який об'єднує всю інформацію щодо задачі, що вирішується, а також базу даних з екологічних властивостей речовин. Наведено алгоритм дій для виконання розрахунку функцій небезпеки. Основними вимогами до розробленої системи були: розрахунок екологічної небезпеки холодоагентів; вмонтований інструментарій для представлення у табличному і текстовому вигляді результатів розрахунків та їх редагування; зручний інтерфейс користувача, що спирається на можливості сучасних операційних систем і додатків; стійка робота програми; розвинута інформаційно-довідкова підсистема, яка вміщує відомості щодо експлуатації програми, термінології, використаних методик і алгоритмів та ін. В системі EcoRef передбачена можливість оновлення інформації, виконання первинного аналізу об'єктів: групування, асоціативний пошук та ін. Процес налаштування і обміну інформацією з базою даних, введення/редагування/видалення значень основних екологічних показників холодоагентів наданий у довідковій підсистемі. EcoRef дозволяє здійснювати поширений пошук в базі даних за такими параметрами: речовина, яку замінюють, речовина, якою замінюють; назва; хімічна формула; торговельна марка; фірма-виробник; або за набором критеріїв, який визначає користувач (рис.3). Система EcoRef функціонує під управлінням операційних систем Windows/2000/Me/NT/XP.

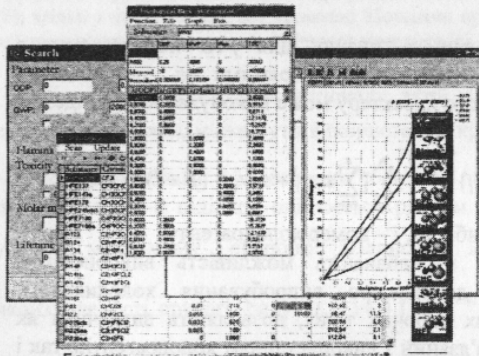


Рис. 3. Інформаційно-обчислювальна система EcoRef режими розрахунку функції екологічної небезпеки $U(r)$.

В четвертому розділі виконано аналіз і оцінку впливу на навколишнє середовище холодоагентів на основі розглянутих вище методів і моделей. Результати оцінки за апіорною моделлю (1) залежать від діапазону зміни часткових критеріїв небезпеки $u_i(r)$. Фрагмент результатів оцінки впливу на

Програма розроблялась як відкрита спеціалізована система з використанням уніфікованих модулів, що дозволяє легко її доповнювати та модифікувати. Система EcoRef є ефективним інструментом прийняття рішень про доцільний вибір безпечного холодоагенту у різних інформаційних ситуаціях для широкого кола розробників та проектувальників холодильного обладнання.

навколишнє середовище холодоагентів, які використовуються або пропонуються ринком до використання, зокрема у торговельному холодильному обладнанні та побутових холодильниках, наведені на рис. 4. Згідно з одержаними даними екологічно переважними ($U(r) < 0,2$) є такі холодоагенти: R22, R134a, R227ea, R401A/B, R416A, R407B/C, R409A, R410A/B, R414B, R290, R600a, R134a/R600a (80/20).

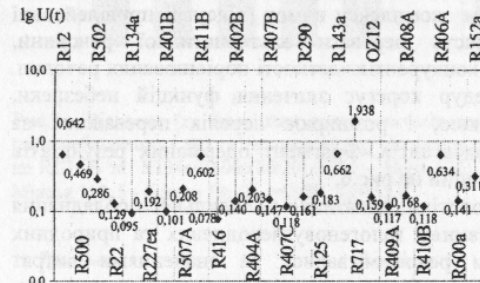


Рис.4. Результати оцінки екологічної небезпеки холодоагентів, які пропонуються для використання в торговельному холодильному обладнанні.

Вибір холодоагенту здійснюється у рамках існуючого нормативного простору, в умовах першочерговості виконання вимог відповідних міжнародних угод, які спрямовані на зниження глобального впливу на довкілля. Урахування умов формування пріоритетів та їх ієрархічної природи (модель 2) дозволяє корегувати одержані вище результати згідно з поточними вимогами.

На рис.5 наведено фрагмент визначення небезпеки холодоагентів на основі виконаної обробки результатів запроваджених оцінок пріоритетності екологічних цілей групами експертів.

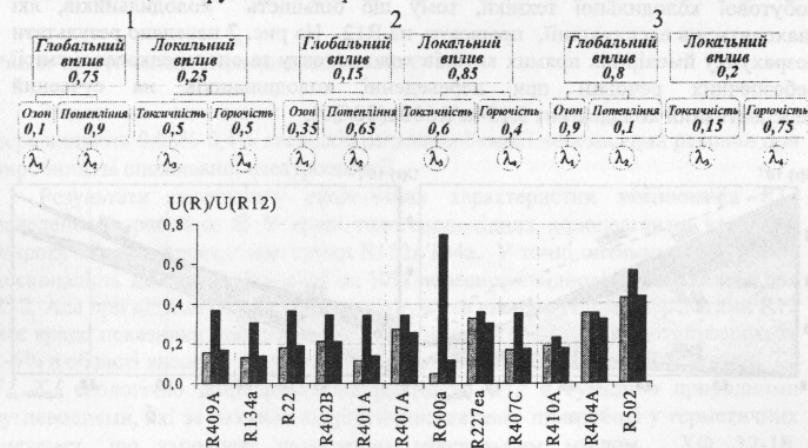


Рис.5. Оцінка екологічної небезпеки холодоагентів в умовах змінювання пріоритетів
□ – перший, ■ – другий, ■ – третій варіанти пріоритетів.

Важливо, що при різних екологічних пріоритетах відрізняються не тільки значення оцінки небезпеки речовин, але й тенденції зміни цих оцінок. Відобразити весь комплекс екологічних вимог до речовини і перейти від пріоритетів групи експертів (точка у просторі рішень, рис.6) до множини допустимих пріоритетів експертів дозволяє варіювання коефіцієнтів λ_i у діапазоні їх допустимих значень. В результаті можливо виявлення області, в якій допустимо оперування перевагами в умовах змінювання кон'юнктури. Згідно з оцінкою, з розширенням комплексу вимог (відсутні привілейовані альтернативи) звужується область переваги альтернативної речовини, змінюється конфігурація області конкурентноздатності порівнюваних речовин. Залучення апостеріорних процедур корегує значення функцій небезпеки, одержаних за апіорною оцінкою, і розширює перелік переважних за екологічними показниками холодоагентів. Фрагмент одержаних результатів для заміновачів R22 і R502 наведений на рис.6.

У розділі 4 аналізуються екологічні показники холодильного обладнання різного призначення з використанням галогеновуглеводневих та природних холодоагентів. Посередні викиди розраховувались за значеннями витрат роботи в циклі та енергоємності обладнання за умовами експлуатації. Параметри циклу для холодоагентів визначались з використанням стандартної довідкової бази даних REFPROP 6.0. Національного інституту стандартів і технологій США. Для визначення екологічних показників охолоджувальних систем в умовах ретрофіту та заміни тільки агента використані літературні дані про результати випробування та експериментальних досліджень експлуатаційних характеристик герметичних компресорів та агрегатів. Такий аналіз є особливо важливим для найбільш поширених систем охолодження - побутової холодильної техніки, тому що більшість холодильників, які знаходяться в експлуатації, працюють на R12. На рис. 7 наведено результати розрахунку ймовірних прямих витоків холодоагенту та опосередкованої емісії небезпечних речовин при переведенні холодильників на сучасний перспективний холодоагент R134a/R600a(80/20).

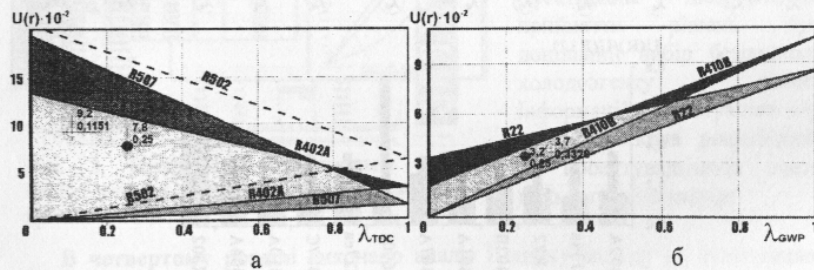


Рис. 6. Порівняльна оцінка безпеки заміновачів хлорфторвуглеводню ODS I класу R502: 507A (R/N) і R402A (R/N) (а) та ODS II класу R22: R410B (N) (б)

○ – експертна оцінка; ● – оцінка за відсутністю привілейованих альтернатив.

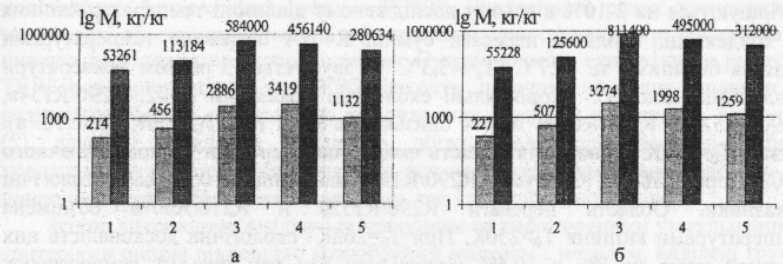


Рис.7. Відносна (до ймовірних прямих витоків холодоагенту) опосередкованої емісії озононебезпечних (■) та парникових (■) газів при роботі побутової холодильної техніки на R12 (а) та R134a/R600a(80/20) (б). 1 – Норд 316; 2 – Норд 214; 3 – Мінськ – 126; 4 – Мінськ 118; 5 – Бірюса 18; $T_{0,c}=298K$, $T_0=255K$.

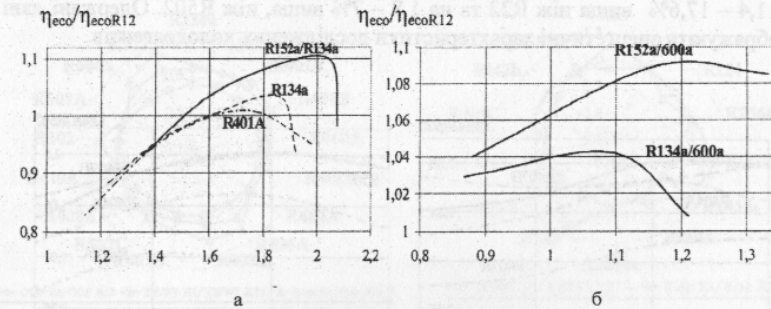


Рис. 8. Екологічні характеристики заміновачів R12.

Згідно до одержаних результатів, наслідки ймовірних витоків не перевищують 0,08%-0,4% наслідків регулярної емісії небезпечних речовин при виробництві споживаної електроенергії.

Результати розрахунку екологічних характеристик заміновачів R12 наведено на рис. 8 а, б. У групі галогенопохідних холодоагентів найбільш широку область переваг має суміш R152a/134a. У точці оптимуму екологічна досконалість цього холодоагенту на 10% перевищує відповідний показник для R12. Але при віддаленні від точки оптимуму за енергетичними перевагами R12 має кращі показники порівняльно з заміновачами (7-13% в області низьких, та 2-6% в області високих температур кипіння). В дослідженій області значень T_0 , T_k , T_{sc} екологічно доцільною альтернативою R12 є суміші з природними вуглеводнями, які за рахунок енергетичних переваг при роботі у герметичних системах, що заповнені поширеним мінеральним маслом ХФ 12-18, забезпечують на 4%-8,9% R152a/R600a та на 0,8%-4,2% R134a/R600a вищу екологічну досконалість.

Порівняльно з R502 екологічні показники сумішей R507, R404A, R407B погіршуються на 2-10% в усьому дослідженому діапазоні температур кипіння та конденсації. Область переваги суміші R407A обмежена температурами кипіння більшими за -27°C ($T_k=43,3^{\circ}\text{C}$) і звужується з ростом температури конденсації (рис. 9). Порівняльні екологічні показники R502, R290/R134a, R290/R152a і R218/R600a мають близькі значення при $T_0>250\text{K}$. (рис.10. а). Низькі $T_0<250\text{K}$ визначають область екологічної переваги озононебезпечного R502. Порівняльно з R22 суміш R290/R134a має кращі на 0,5-10,6% екологічні показники. Область переваги R290/R152a і R218/R600a обмежена температурами кипіння $T_0>250\text{K}$. При $T_0=263\text{K}$ екологічна досконалість цих сумішей вища на 8% і 10,6% відповідно. Але при низьких температурах ($T_0=238\text{K}$) показники R22 кращі на 6% і 17%. Екологічна досконалість сумішей R218/R152a/R600a, R218/R134a/R600a, R290/R218, а також R290 вища ніж R22 в усьому дослідженому діапазоні робочих температур кипіння (рис.10. б). Кращою альтернативою є R218/R152a/R600a, екологічна досконалість якого на 11,4 – 17,6% вища ніж R22 та на 1,8 – 7% вища, ніж R502. Одержані дані відображують енергетичні характеристики досліджених холодоагентів.

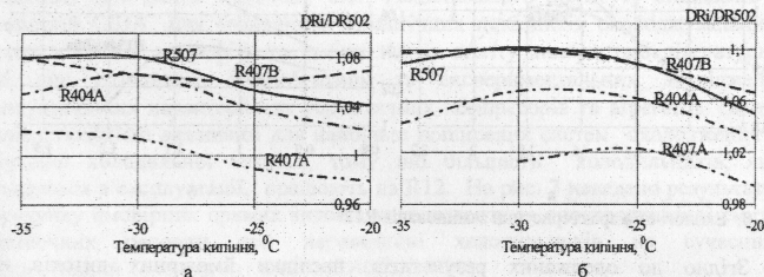


Рис. 9. Екологічні наслідки (відносно до R502) при роботі холодильного обладнання на альтернативних галагенопохідних сумішевих холодоагентах: а – $T_k=43,3^{\circ}\text{C}$; б – $T_k=48,9^{\circ}\text{C}$.

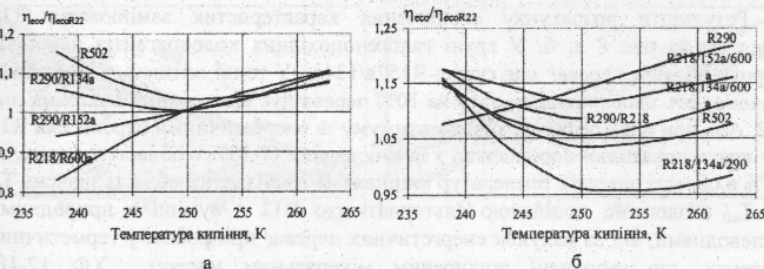


Рис. 10. Відносна екологічна досконалість замінювачів R22 ($T_k=45^{\circ}\text{C}$, $T_{sc}=32^{\circ}\text{C}$).

На рис.11 показано екологічні властивості холодильних агентів в координатах “екологічний ризик – TEWI”. Екологічний ризик визначався в залежності від термодинамічної ефективності одноступеневого теоретичного циклу з досліджуванним холодоагентом. Суттєві відміни екологічного ризику і TEWI пояснюються тим, що TEWI враховує потенційний вплив речовини на радіаційний баланс планети і не включає інші фактори безпеки. Критерій (5) дозволяє прийняти достатньо обґрунтоване рішення при виборі холодоагенту з урахуванням факторів прямого і опосередкованого впливу на природне середовище як на локальному, так і на глобальному рівнях.

Згідно виконаному аналізу і розрахункам за сформованими узагальненими критеріями оцінки відповідно розробленим моделям і методам, виділені групи достатньо безпечних холодоагентів, холодоагентів з прийнятим рівнем безпеки, потенційно небезпечних холодоагентів. Відповідний перелік наведено у дисертації. Одержана інформація сприятиме розробці подальшої природоохоронної стратегії у холодильній галузі.

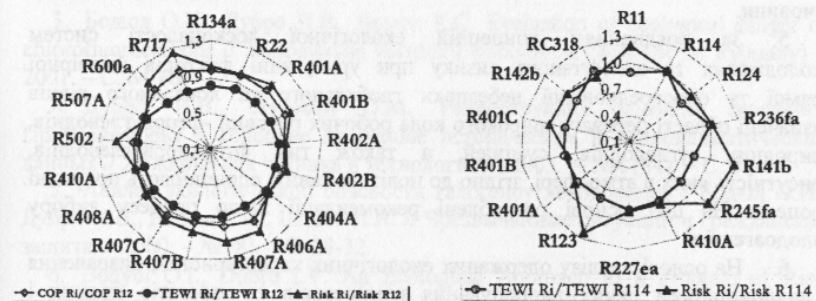


Рис.11. Розрахункові значення відносних ризику, TEWI та холодильного коефіцієнту холодильних агентів для торговельного холодильного обладнання та систем цілірічного кондиціонування.

У додатках до дисертації наведені основні каталітичні реакції руйнування стратосферного озону (додаток А), текст програми EcoRef та значення величин, з яких складається база даних по екологічній небезпеці холодоагентів (додаток Б), таблиці результатів математичної обробки експертизи (додаток В), розрахунковий матеріал по факторам опосередкованої небезпеки та екологічного ризику при заміні холодоагентів (додаток Г), документи, що підтверджують впровадження результатів роботи (додаток Д).

ВИСНОВКИ

1. На основі розроблених за апіорно-апостеріорними процедурами моделей та відповідних методів в умовах ієрархічної природи екологічних цілей і змінювання пріоритетів з залучанням результатів експериментального

вивчення властивостей холодоагентів визначені фактори безпеки та ризику при переведенні холодильного обладнання на сучасні робочі тіла.

2. Виявлені області прийнятних рішень, в межах яких допустиме оперування перевагами при зміні пріоритетів; показано, що урахування динаміки пріоритетів змінює оцінку розрахункової екологічної безпеки більшості сучасних холодоагентів у середньому на 40% і створює умови для виникнення привілейованих альтернатив.

3. Показано, що залучення результатів експертизи та використання можливостей апостеріорного підходу розширює порівняльно з апіорними оцінками перелік прийнятних рішень - переважних за екологічними показниками холодоагентів.

4. Здійснено статистичне стійке визначення ступеню переваги холодоагенту за екологічними показниками за умови максимуму функцій невизначеності та використання критерію Байеса як оціночного функціоналу для ранжирування екологічних цілей відповідно ситуації вибору робочої речовини.

5. За поєднанням концепцій екологічної досконалості систем охолодження та екологічного ризику при урахуванні факторів ймовірної прямої та опосередкованої безпеки глобального та локального рівнів визначені області переваги широкого кола робочих речовин - фторвуглеводнів, природних вуглеводнів, сумішей, а також тих фторхлорвуглеводнів, присутність яких в атмосфері, згідно до новітніх даних, спричиняють природні процеси. На цієї основі розроблені рекомендації щодо процесу вибору холодоагентів.

6. На основі аналізу одержаних екологічних характеристик, визначення з використанням даних випробування компресорів та агрегатів прямих і посередніх наслідків і показників ризику побутової та торгівельної холодильної техніки при ретрофіті та заміні тільки агенту показано, що екологічна досконалість холодильного обладнання більшою мірою залежить від енергетичних показників, ніж від показників прямої безпеки холодоагентів. При експлуатації систем охолодження опосередковані наслідки регулярної емісії небезпечних речовин, у тому числі озоноруйнуючих сполук та парникових газів, на порядки перевищують наслідки ймовірних витоків холодоагентів.

7. Інструментом багатокритеріального аналізу і прийняття рішень про переведення холодильного обладнання на сучасні робочі тіла для широкого кола проєктувальників холодильної техніки є розроблена інформаційно-обчислювальна система EcoRef для визначення екологічних показників холодоагентів (часткові та узагальнені критерії безпеки, фактори прямої та опосередкованої безпеки, ризик негативних наслідків) і сформована база даних для 150 чистих речовин та сумішей. Значення величин, з яких складається база даних, наведені у таблицях додатку до дисертації.

8. На підставі виконаних досліджень виявлена широка група екологічно достатньо безпечних холодоагентів та холодоагентів з прийнятним рівнем безпеки. Ця інформація може бути корисна при проєктуванні охолоджуваних систем, а також при розробці подальшої довгострокової природоохоронної стратегії у холодильній техніці, націленої на реалізацію дій за Кіотським Протоколом.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ ВИКЛАДЕНО В ТАКИХ ПУБЛІКАЦІЯХ

1. Дубро И.В., Бодюл О.И., Шабадаш Д.В. Анализ решений при оценке экологической опасности холодильных агентов // Холодильная техника и технология. - 2004. - №4 (90). - С. 33-39.

2. Дубро И.В., Бодюл О.И. К вопросу об анализе источников эмиссии в атмосферу галогеноуглеводородов // Холодильная техника и технология. - 2002. - №79-80. - С. 21-28.

3. Бодюл О.И., Дубро И.В., Бодюл Е.С. Evaluation of ecological danger of chlorofluorocarbons // Холодильная техника и технология (додаток до журналу) - 2001. - С. 64-68.

4. Дубро И.В., Луговой О.М. Реконструкция климата северного Причерноморья в голоцене на основе исторических и палеоклиматических данных // Холодильная техника и технологии. - 2003. - №4 (84). - С. 63-69.

5. Анализ экологической опасности галогеноуглеводородов / Бодюл О.И., Дубро И.В., Бодюл Е.С., Штаба Л.И. // Чрезвычайные ситуации и гражданская защита. - 2000. - № (8). - С. 29-32.

6. Bodyul O.I., Dubro I.V. An Ecological Approach to a Problem of Risk Evaluation of Halocarbons // Proc. of 21st International Congress of Refrigeration - Serving the Needs of Mankind 2003, CD-ROM - Washington (USA). - 2003. - 8 p.

7. Bodyul O.I., Dubro, I.V., Vinogradova, Ye. I. An ecological risk assessment of the halocarbons. Proc. of 11th International Symposium "loss prevention and safety promotion in the process industries - Loss prevention 2004", May 31- June 3, Praha (Czech Republic). - CD-ROM ISBN 80-02-01574-6. - 8 p.

8. Dubro I.V., Bodyul O.I. An Automated System for Assessment of Risk and Ecological Damage of Halocarbons // Proc. of Inter. Conference "3rd International Workshop, Global Phase Diagrams". - Book of Abstracts. - Odessa, September 14-19, 2003. - P.75-79.

9. Бодюл О.И., Дубро И.В., Бодюл Е.С. Оценка экологической опасности галогеноуглеводородов // Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции "Современные проблемы холодильной техники и технологии". - Одесса, 3-5 октября, 2001 - Одесса: ОГАХ. - 2001. - С.58-59

10. Цыкало А.Л., Бодюл О.И., Дубро И.В. Прикладная и промышленная экология. Нормирование антропогенной нагрузки (в двух частях). - Одесса: ОГАХ, Молодежный экологический центр им. В.И. Вернадского, 2003. - 164 с.

xv 1111
Институт холода

ОБЩЕСТВЕННАЯ
БИБЛИОТЕКА
акад

АНОТАЦІЯ

Дубро І.В. “Багатокритеріальне моделювання та оцінка альтернатив при переведенні холодильного обладнання на сучасні холодильні агенти” – Рукопис.

Дисертація на здобуття ученого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 – “Холодильна та криогенна техніка, системи кондиціонування” Одеська державна академія холоду. Одеса. 2005.

Дисертацію присвячено багатокритеріальному підходу в розробці моделей оцінки альтернатив при переведенні холодильного обладнання на сучасні холодоагенти. Для вирішення поставлених задач розроблені моделі оцінки небезпеки холодоагентів засновані на адитивних функціях і апіорно-апостеріорних процедурах, що забезпечує достатньо повне урахування прямих та посередніх факторів глобального та локального ризику. Особливістю підходу є здійснення оцінок небезпеки холодоагентів в умовах ієрархічності екологічних цілей та змінних пріоритетів. Показано, що урахування динаміки пріоритетів змінює оцінку розрахункової небезпеки більшості сучасних холодоагентів у середньому на 40% та створює умови для виникнення привілейованих альтернатив при прийнятті рішень про заміну небезпечних робочих тіл. Інструментом багатокритеріального аналізу є розроблена інформаційно обчислювальна система EcoRef для визначення екологічних показників холодоагентів та сформована база даних для 150 чистих речовин та сумішей. Результати роботи, які вміщують рекомендації по вибору у межах виявлених “областей безпеки” переважних холодоагентів для систем охолодження різного призначення, мають важливе практичне значення для прийняття екологічно обґрунтованих рішень, спрямованих на зниження техногенного навантаження у галузі.

Ключові слова: холодильне обладнання, холодильні агенти, екологічна досконалість, екологічний ризик, багатокритеріальне моделювання, апіорно-апостеріорні процедури.

АННОТАЦИЯ

Дубро И.В. Многокритериальное моделирование и оценка альтернатив при переводе холодильного оборудования на современные холодильные агенты. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14 – “Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования” – Одесская государственная академия холода. Одесса. 2005.

Отсутствие общепринятой концепции анализа и оценки опасности рабочих веществ, применяемых в холодильной технике, а также методов

комплексного учета противоречивых требований к хладагентам, соответствующих методик и программного обеспечения определяют актуальность решаемых в работе задач. Диссертация посвящена многокритериальному подходу к разработке моделей оценки альтернатив при переводе холодильного оборудования на современные хладагенты. Для решения поставленных в диссертации задач разработаны модели оценки опасности холодильных агентов, основанные на аддитивных функциях и апіорно-апостеріорних процедурах, что обеспечивает достаточно полный учет прямых и косвенных факторов глобального и локального риска. Особенностью подхода является осуществление оценки опасности хладагентов в условиях иерархичности экологических целей и динамики приоритетов. Ранжирование экологических последствий выполнялось из условия максимизации функции неопределенности второго рода, а приоритетность целей определялась на основании критерия Байеса. Показано, что учет динамики приоритетов изменяет оценку расчетной экологической опасности большинства современных хладагентов в среднем на 40% и создает условия для возникновения заведомо привилегированных альтернатив при принятии решений о замене регулируемых рабочих тел. Инструментом многокритериального анализа служит разработанная информационно-вычислительная система EcoRef для определения экологических показателей хладагентов и сформированная база данных для 150 чистых веществ и смесей. Количественный анализ рассчитанных экологических характеристик холодильного оборудования в условиях замены хладагента показал, что экологические последствия в большей степени зависят от термодинамически обоснованного выбора энергетически эффективного рабочего тела, чем от показателей прямой опасности хладагента. На основе объединения концепций экологического риска и экологического совершенства холодильного оборудования выявлены области значений режимных параметров бытовой и торговой холодильной техники соответствующие высоким экологическим показателям исследованных рабочих агентов, что позволило определять предпочтительность альтернативы как оптимальным значением экологических показателей, так и шириной «области безопасности». Результаты работы, в которых содержатся рекомендации по выбору в границах выявленных «областей безопасности» предпочтительных хладагентов для систем охлаждения различного назначения, имеют важное практическое значение при принятии экологически обоснованных решений, направленных на снижение техногенной нагрузки на окружающую среду в отрасли.

Ключевые слова: холодильное оборудование, холодильные агенты, экологическое совершенство, экологический риск, многокритериальное моделирование, апіорно-апостеріорные процедуры.

ANNOTATION

Dubro I.V. Multi-criterion Modeling and Evaluation of Alternatives in Refrigerating Equipment Conversion to Modern Refrigerants. – Manuscript.

Thesis for a candidate of science (engineering) degree by specialty 05.05.14 – “Refrigerating and Cryogenic Engineering, Air-conditioning Systems”. – Odessa State Academy of Refrigeration. Odessa. 2005.

This dissertation is devoted to a multi-criterion approach to create models for assessment of alternative refrigerants used in refrigerating systems. The assessment models of ecological risk and danger of refrigerants based on an additive factor model and priori-and-posteriori models were developed. The given approach provides a control of direct and indirect factors of global and local risk. The evaluation of refrigerant danger based on the hierarchical structure of ecological goals, changing priorities and preferences is peculiar of this proposed model. It has been shown that dynamics of priorities changes the evaluation of calculated ecological danger for most modern refrigerants about 40% and creates the conditions for the appearance of privileged alternatives in making a decision about substitution of unacceptable refrigerants. The multi-criterion analysis tool "EcoRef" is the application software, designed to determine ecological properties of refrigerants and it is an integrated database for over 150 pure refrigerants and mixtures. A quantitative analysis of calculated ecological characteristics of refrigerating systems has shown that the environmental consequences to a greater extent depend on a reasonable thermodynamic choice of energy-effective cooling agent rather than a direct ecological danger of refrigerants. The results of dissertation contain recommendations for choice of preferable refrigerants for different types of refrigerating systems. The results are important and have practical significance in making a reasonable decision aimed at decreasing an industrial effect of the refrigerating industry on the environment.

Keywords: Refrigerating systems, refrigerant, ecological perfection, multi-criterion modeling, a priori- and- posteriori model.