

## АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ ТА КОМФОРТНІСТЮ ПОВІТРЯ СУДНОВИХ ПРИМІЩЕНЬ

**Білій В. А.**, аспірант Національного університету «Одеська морська академія»,  
e-mail: bily.viktor@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7107-4862;

**Голіков В. А.**, д.т.н, професор Національного університету «Одеська морська академія»,  
e-mail: vlad.ant.golikov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1688-5670

*Метою дослідження є розробка структури системи автоматичного керування (САК) якістю і комфортністю повітря суднового приміщення та постановка задачі автоматичного керування.*

*Проаналізовано сучасні методи оцінки безпеки газового складу повітря. У результаті встановлено, що створення систем автоматичного керування потребує застосування аналітичних показників безпеки при математичному моделюванні мікроклімату приміщення.*

*Проведено формалізацію вимог до газового складу повітря. Отримані аналітичні залежності включено в математичну модель мікроклімату приміщення.*

*Запропоновано альтернативний підхід до забезпечення комфортності помешкання з урахуванням показників якості повітря.*

*Стаття містить розробку математичної моделі мікроклімату приміщення з урахуванням газового складу повітря. Запропоновано структурну схему системи автоматичного керування і сформульовано задачу автоматичного керування у вигляді задачі багатопараметричної оптимізації. Визначено такі напрями подальших досліджень: верифікація моделі, деталізація структури САК і розробка алгоритму керування, створення прототипу на мікропроцесорній елементарній базі.*

*Отримані результати дослідження можуть застосовуватись при моделюванні динаміки показників комфортності та безпеки мікроклімату приміщень і створенні систем автоматичного керування.*

**Ключові слова:** безпека мореплавства, якість повітря, газовий склад повітря, комфортність помешкання, багатопараметрична оптимізація

**DOI: 10.33815/2313-4763.2021.1.24.006–018**

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями.** Показниками техніко-експлуатаційної досконалості суден є: транспортна технологічність, конструктивна надійність і безпека, енергоекономічність, економічність, ергономічність, екологічна безпека.

Чинна Морська доктрина України [1] серед інших визначає такі пріоритетні напрями розвитку науково-технічного потенціалу галузі: охорону морського середовища, важливими складовими якої є зменшення обсягу викидів забруднювальних речовин у результаті застосування сучасних технологій та застосування міжнародних екологічних норм у морегосподарській діяльності.

Національна транспортна стратегія України [2] визначає одним з пріоритетних напрямів підвищення рівня безпеки на транспорті. У цьому напрямку планується імплементація у національне законодавство України європейських норм та стандартів; запровадження дієвих систем управління безпекою на транспорті; забезпечення впровадження європейських вимог у сфері перевезення небезпечних вантажів та ін.

Морський та річковий транспорт характеризується єдністю умов праці та проживання, та тривалим знаходженням екіпажу під впливом шкідливих факторів протягом рейсу. Суднові технічні засоби як створюють потрібні умови для перебування екіпажу, так і можуть на них впливати. Екологічна безпека морського транспорту має безпосередній вплив на здоров'я та життя екіпажу більшою мірою, ніж для інших видів транспорту, оскільки має місце акумуляція шкідливих речовин у приміщенні та у тілі людини через знаходження її під впливом забруднювачів тривалий час без перерв. У зоні ризику знаходяться, насамперед, екіпажі суден, що перевозять небезпечні вантажі, такі як танкери-хімовози та танкери-газовози.

Актуальність цього дослідження зумовлена потребою у формалізації міжнародних норм і вимог з екологічної безпеки, що дозволить використовувати їх у математичному

моделюванні тепломасообмінних процесів у повітрі приміщень, сформулювати задачу автоматичного керування, синтезувати САК і розробити відповідні технічні засоби.

**Аналіз сучасного стану проблеми.** Виділяють наступні судові зони: житлові та виробничі приміщення, пости керування та відкрита палуба. Залежно від типу судна та призначення приміщень, вони поділяються на класи за ступенем помешкання: без присутності, з частковою періодичною присутністю та з цілодобовою присутністю. Залежно від класу помешкання з'являється потреба враховувати людський елемент і пов'язаний з ним соціальний аспект забезпечення безпеки на судні, оскільки потрібно створити умови помешкання людей належного рівня безпеки та комфортності.

Держави прапора та міжнародні встановлюють вимоги до умов праці та проживання екіпажу. В Україні показники безпеки житлових та виробничих приміщень на судах регулюються санітарними правилами, ДСП 7.7.4.-057-2000 та ДСП 7.7.4.-057-99 [3, 4]. Зокрема, до мікроклімату судових приміщень установлені обмеження за температурою, вологістю та швидкістю повітря. Для систем вентиляції висунуті норми обміну повітря та обмеження рециркуляції для забезпечення концентрації вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) не вище гранично допустимої. Згідно з Переліком професійних захворювань [4], працівники транспорту знаходяться під впливом хімічних, фізичних та алергенних факторів. Хімічні фактори діють як безпосередньо при контакті з речовиною, так і через вдихання шкідливих газів, летючих сполук та твердих частинок. Найбільшу небезпеку становить забруднення повітря житлових приміщень, оскільки екіпаж не використовує засоби захисту та газодимівірвальні прилади під час відпочинку.

Існує два підходи для оцінки якості повітря: порівняння концентрацій забруднювачів з максимально допустимими та застосування індексів якості повітря.

Таблиця 1 – Обов'язкові гранично допустимі концентрації

	<i>Регуляторні гранично допустимі концентрації</i>				
	NAAQ/ЕРА	OSHA	МАК, Німеччина	Індія	Південна Корея
<b>CO<sub>2</sub></b>	–	5000 ppm [8г]	5000 ppm [8г] 10000 ppm [1г]	–	1000 ppm
<b>CO</b>	9 ppm [8г] – раз на рік 35 ppm [1г] – раз на рік	50 ppm [8г]	30 ppm [8г] 60 ppm [30хв]	2 mg/m <sup>3</sup> [8г] 4 mg/m <sup>3</sup> [1г]	9 ppm
<b>Формальдегід</b>	–	0.75 ppm [8г] 2 ppm [15хв]	0.3 ppm [8г] 1 ppm – макс. доп.	–	210 µg/m <sup>3</sup>
<b>NO<sub>2</sub></b>	0.05 ppm [1г]	5 ppm	5 ppm [8г] 10 ppm [5хв]	40 µg/m <sup>3</sup> [1р] 80 µg/m <sup>3</sup> [24г]	–
<b>O<sub>3</sub></b>	0.08 ppm [8г] 0.12 ppm [1г] – раз на рік	0.1 ppm [8г]	0	100 µg/m <sup>3</sup> [8г] 180 µg/m <sup>3</sup> [1г]	–
<b>PM<sub>2.5</sub></b>	15 µg/m <sup>3</sup> [1р] 35 µg/m <sup>3</sup> [24г]	5 mg/m <sup>3</sup> [8г]	1.5 mg/m <sup>3</sup> для PM <4 µm	40 µg/m <sup>3</sup> [1р] 60 µg/m <sup>3</sup> [24г]	–
<b>PM<sub>10</sub></b>	150 µg/m <sup>3</sup> [24г]	–	4 mg/m <sup>3</sup>	60 µg/m <sup>3</sup> [1р] 100 µg/m <sup>3</sup> [24г]	150 µg/m <sup>3</sup>
<b>SO<sub>2</sub></b>	0.03 ppm [1р] 0.14 ppm [24г] – раз на рік	5 ppm [8г]	0.5 ppm [8г] 1 ppm - макс. доп.	50 µg/m <sup>3</sup> [1р] 80 µg/m <sup>3</sup> [24г]	0.05 ppm

При застосуванні першого підходу для оцінки ступеня забрудненості повітря, використовують гранично допустимі концентрації, встановлені на міжнародному, державному або галузевому рівні [6]. Гранично допустимі концентрації можуть бути обов'язкові та рекомендовані, застосовуватися виключно до відкритого повітря, повітря промислового середовища або до повітря житлових приміщень.

Обов'язкові гранично допустимі концентрації встановлено на державному рівні у таких країнах: Австралія [7], США (US EPA [8] та OSHA [9]), Німеччина (Deutsche Forschungs Gemeinschaft [10]). Декілька агенцій з контролю за забрудненням, що підпорядковуються Міністерству навколишнього середовища та лісів Індії, створили національні стандарти якості повітря та контролю за забрудненням промислових та житлових середовищ [11]. У Південній Кореї у 2004 році набрав чинності закон «Контроль якості повітря у приміщеннях громадського користування» [12].

Таблиця 2 – Рекомендовані гранично допустимі концентрації

	<i>Рекомендовані гранично допустимі концентрації</i>				
	Канада	WHO	NIOSH	ACGIH	ASHRAE
<b>CO<sub>2</sub></b>	3500 ppm	–	5000 ppm [8г] 30,000 ppm [15хв]	5000 ppm [8г] 30,000 ppm [15хв]	–
<b>CO</b>	11ppm [8г] 25ppm [1г]	90 ppm [15хв] 50 ppm [30хв] 25 ppm [1г] 10 ppm [8г]	35 ppm [8г] 200ppm –макс. доп.	25 ppm [8г]	9ppm [8г]
<b>Формальдегід</b>	0.1 ppm 0.05 ppm	0.1 mg/m <sup>3</sup> (0.081 ppm) [30 хв]	0.016 ppm[8г] 0.1 ppm [15 хв]	0.3 ppm - макс. доп.	0.1 mg/m <sup>3</sup> (0.081 ppm) [30хв] 27 ppb [8г] - макс. доп. 45 ppb (55 µg/m <sup>3</sup> ) [1г] 7.3 ppb (9 µg/m <sup>3</sup> ) [8г]
<b>NO<sub>2</sub></b>	0.05 ppm 0.25 ppm [1г]	0.1 ppm[1г] 0.02 ppm [1п]	1 ppm [15 хв]	0.3 ppm [8г]	100 µg/m <sup>3</sup> [1п] 470 µg/m <sup>3</sup> [24г]
<b>O<sub>3</sub></b>	0.12 ppm [1г]	0.064 ppm 120 mg/m <sup>3</sup> [8 h]	0.1 ppm - макс. доп.	0.05 ppm[важ. роб] 0.08 ppm[сер. роб] 0.1 ppm[лег. роб] 0.2 ppm[<2г]	100 µg/m <sup>3</sup> (50 ppb) [8г]
<b>PM<sub>2.5</sub></b>	0.1 mg/m <sup>3</sup> [1г] 0.040 mg/m <sup>3</sup>	–	–	3 mg/m <sup>3</sup> - макс. доп.	15 µg/m <sup>3</sup>
<b>PM<sub>10</sub></b>	0.38 ppm [5хв] 0.019 ppm	–	–	10 mg/m <sup>3</sup> - макс. доп.	50 µg/m <sup>3</sup> [1п]
<b>SO<sub>2</sub></b>		0.048 ppm [24 г] 0.012ppm [1 п]	2 ppm [8г] 5 ppm [15хв]	2 ppm [8г] 5 ppm [15хв]	80 µg/m <sup>3</sup> [1п]

Рекомендовані ГДК можуть використовувати національними та галузевими установами у разі потреби встановлення контролю забруднення повітря довколишнього

середовища, робочої зони або житлових приміщень. Федеральна комісія канадського уряду встановила орієнтовні ГДК у 1987 р [13]. У тому ж році Всесвітня організація охорони здоров'я (WHO) встановила орієнтовні ГДК для непромислового зовнішнього середовища та повітря приміщень [14]. Рекомендовані промислові ГДК та тривалість перебування у контрольованому середовищі розроблено Національним інститутом безпеки та охорони здоров'я (NIOSH) [15,17]. Промислові ГДК також було розроблено Американською конференцією урядових промислових гігієністів (ACGIH) для стандартного 40-часового робочого тижня та для одноразової експозиції [16]. Американське товариство інженерів з опалення, охолодження та кондиціонування (ASHRAE) запропонувало рекомендовані ГДК для непромислових середовищ [17].

Безпечність повітря може бути оцінена за допомогою Індексу якості повітря – AQI (Air Quality Index). Наразі, Індекс використовується в Англії, Південній Кореї, Європейському Союзі, Мексиці, Сінгапурі, Індії, Канаді, Китаї, Гонконгу та США. У більшості згаданих країн регіональні агенції та філії зобов'язані щоденно звітувати індекс якості повітря, що дозволяє оцінювати динаміку забруднення повітря на державному рівні та вживати відповідних заходів для його зменшення.

Індекс якості повітря вказує за деякою шкалою на рівень забрудненості від низького до важкого, або на рівень придатності для дихання від придатного до небезпечного. Використовують шкали індексів від 0 до 10, від 0 до 100 та від 0 до 500, де менші значення відповідають чистішому та безпечнішому повітрю, а більші – вищій концентрації забруднювачів.

Більшість країн використовують концентрації озону, діоксиду сірки, оксиду вуглецю, твердих частинок різних фракцій та діоксиду азоту для визначення Індексу якості повітря. Для кожного із забруднювачів розраховують відповідний частковий індекс  $AQI_i$  шляхом співвідношення короткострокового середнього значення його концентрації, найчастіше восьми- або двадцятигодинного, з відповідною гранично допустимою концентрацією. Індекс якості повітря приймають таким, що дорівнює значенню найбільшого з часткових індексів забруднювачів:

$$AQI = \text{MAX}(AQI_i).$$

Американською агенцією із захисту навколишнього середовища (US EPA) [18] встановила наступну шкалу Індексу якості повітря:

Таблиця 3 – Шкалу Індексу якості повітря EPA

<i>Індекс якості повітря</i>	<i>Пояснення</i>	<i>Кольоровий код</i>
від 0 до 50	Добре (безпечне) повітря	Зелений
від 51 до 100	Повітря середньої якості	Жовтий
від 101 до 150	Повітря нездорове для чутливих груп	Помаранчевий
від 151 до 200	Нездорове повітря	Червоний
від 201 до 300	Дуже нездорове повітря	Фіолетовий
від 301 до 500	Небезпечне повітря	Бордовий

Для розрахунку часткових індексів по кожному із забруднювачів використовують наступну формулу:

$$AQI_i = \frac{I_j - I_{j-1}}{C_{ji} - C_{(j-1)i}} (c_i - C_{(j-1)i}) + I_{j-1},$$

де  $AQI_i$  – частковий індекс забруднювача  $i$ ;  $c_i$  – концентрація забруднювача  $i$ ;  $C_{ji}$  верхня границя інтервалу концентрацій, в який потрапляє  $c_i$ ;  $C_{(j-1)i}$  – нижня границя інтервалу концентрацій, в який потрапляє  $c_i$ ;  $I_{j+1}$  – значення AQI, що відповідає  $C_{ji}$ ;  $I_j$  – значення AQI, що відповідає  $C_{(j-1)i}$ .

Інтервали концентрацій для визначення часткових індексів якості повітря представлені у табл. 4.

Таблиця 4 – Інтервали концентрацій забруднювачів для визначення часткових індексів якості повітря AQI

О <sub>3</sub> (ppm) 8г	О <sub>3</sub> (ppm) 1г	PM2.5 (µg/m <sup>3</sup> ) 24г	PM10 (µg/m <sup>3</sup> ) 24г	CO (ppm) 8г	SO <sub>2</sub> (ppb) 1г	NO <sub>2</sub> (ppb) 1г	AQI
0.054	–	12.0	54	4.4	35	5	50
0.070	–	35.4	154	9.4	75	100	100
0.085	0.164	55.4	254	12.4	185	360	150
0.105	0.204	150.4	354	15.4	304	649	200
0.200	0.404	250.4	424	30.4	604	1249	300
–	0.504	350.4	504	40.4	804	1649	400
–	0.604	500.4	604	50.4	1004	2049	500

Проблеми екологічної безпеки, створення та підтримання екологічного та комфортного середовища перебування людини – суднового мікроклімату, контролю газового складу повітря вирішувалися у працях представників наукової школи НУ «ОМА» В. А. Голікова та К. В. Ходаріної, у дослідженнях Л. М. Шафрана, В. В. Вичужаніна.

В. А. Голіковим [20] було висунуто концепцію мікроклімату, де об’єктом керування виступає людина. З позицій цієї концепції було досліджено характеристики мікроклімату, побудовано математичні моделі тепломасообмінних процесів. Проблеми екологічної безпеки судна знайшли висвітлення у дослідженнях забрудненості судових приміщень, ефективності герметизації житлової надбудови та очищення повітря у фільтрувальних установках різних типів. Була розроблена узагальнена математична модель видалення хімічно небезпечних домішок з повітря та запропоновано САК газовим складом припливного повітря.

У дослідженні [21] запропоновано індекс якості повітря в приміщенні на основі комфорту  $PMV_{IAQ}$ :

$$PMV_{IAQ} = \max(PMV_{CO_2}, PMV_{PM_{10}}, PMV_{INCHO}).$$

Індивідуальні індекси якості повітря розраховуються за формулою:

$$PMV_i = A_i \log\left(\frac{x_i}{B_i}\right),$$

де  $x_i$  – концентрація забруднювача;  $A_i$  та  $B_i$  – константи.

**Постановка задачі.** Метою дослідження є синтез структури системи автоматичного керування якістю та комфортністю повітря суднового приміщення та постановка задачі автоматичного керування. Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних завдань:

- провести аналіз і формалізацію вимог до газового складу повітря;
- синтезувати математичну модель мікроклімату приміщення з урахуванням показників якості та комфортності повітря.

**Об'єктом дослідження** є мікроклімат суднового приміщення.

**Предметом дослідження** є розробка математичної моделі мікроклімату суднового приміщення з урахуванням показників якості повітря та синтез структури системи автоматичного керування.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Залежності часткових індексів якості від концентрацій забруднювачів є неперервними кусково-лінійними функціями і можуть бути представлені аналітичними у вигляді:

$$AQI_i = a_i c_i + b_i + \sum_{j=1}^n w_{ji} |c_i - C_{(j-1)i}|, \quad (1)$$

$$w_{ji} = \frac{k_{ji} - k_{(j-1)i}}{2},$$

$$k_{ji} = \frac{I_j - I_{j-1}}{C_{ji} - C_{(j-1)i}},$$

$$a_i = \frac{k_{i0} + k_{in}}{2},$$

де  $c_i$  – концентрація  $i$ -го забруднювача;  $k_{ji}$  – кут нахилу сегмента  $j$  кусково-лінійної функції з індексом  $i$ .

Для перетворення значень окремих ГДК та меж інтервалів з табл. 4, які визначені в одиницях виміру **ppm**, використаємо формулу:

$$c = c_{ppm} \frac{273,15 \cdot M \cdot p}{22,4 \cdot 101300 \cdot (t + 273,15)}, \quad (2)$$

де  $c$  – концентрація забруднювача, мг/м<sup>3</sup>;  $c_{ppm}$  – концентрація забруднювача, ppm;  $M$  – молекулярна маса забруднювача, а.о.м;  $p$  – тиск суміші, Па;  $t$  – температура повітря, °С.

Динаміка концентрацій  $c_i$  забруднювачів у повітрі приміщення визначається залежністю:

$$\frac{dc_i}{dt} V + c_i q_{вп} = c_{i_{пп}} q_{пп}, \quad (3)$$

де  $c_i$  – концентрація  $i$ -го забруднювача у повітрі приміщення, мг/м<sup>3</sup>;  $V$  – об'єм приміщення;  $q_{вп}$  – об'ємна витрата вихідного повітря, м<sup>3</sup>/с;  $q_{пп}$  – об'ємна витрата припливного повітря, м<sup>3</sup>/с;  $c_{i_{пп}}$  – концентрація  $i$ -го забруднювача у припливному повітрі, мг/м<sup>3</sup>.

Для забезпечення належних умов праці та відпочинку повітря службових та житлових приміщень, окрім безпечності, повинно відповідати вимогам комфортності. Стандартом ISO7730 для оцінки комфортності прийнято аналітичну залежність

інтегрального показника комфортності PMV від параметрів повітря, метаболізму та вдягненості людини.

Згідно зі стандартом, алгоритм розрахунку показника PMV на етапі визначення температури поверхні одягу потребує чисельного вирішення рівняння четвертого ступеня, яке передбачає використання ітераційного алгоритму. Для синтезу і дослідження систем автоматичного керування комфортністю було запропоновано використовувати апроксимацію показника PMV алгебраїчними виразами з експоненціальними доданками [20] або поліноміальними залежностями вигляду  $PMV_{MET} = f_{MET}(PT)$  для декількох значень рівня метаболізму MET та фіксованого діапазону результативної температури PT [22]. Зазначимо, що обчислення показника PMV за останнім методом для проміжних значень MET потребує додаткової інтерполяції.

Перспективним підходом до розрахунку інтегрального показника комфортності є його апроксимація багатовимірним поліномом, для ефективного обчислення якого можна використовувати схему Горнера. Для оцінки точності апроксимації було проведено обчислювальний експеримент із застосуванням методу багатовимірної поліноміальної регресії, який реалізовано з використанням мови програмування Python та програмної бібліотеки SKIKIT-LEARN. Результати (табл. 5) експерименту показали задовільну точність апроксимації PMV багатовимірними поліномами ступеня 3 та вище:

$$PMV(t, t_p, v_p, \varphi, MET, CLO, W) \approx p^n(t, t_p, v_p, \varphi, MET, CLO, W), \quad (4)$$

де  $t$  – температура повітря, °C;  $t_p$  – середня радіаційна температура, °C;  $v_p$  – швидкість повітря, м/с;  $\varphi$  – відносна вологість, відн. од.;  $MET$  – показник метаболізму, met ( $1 \text{ met} = 58.2 \text{ Вт/м}^2$ );  $CLO$  – показник одягненості, відн. од.;  $W$  – ефективна зовнішня робота, Вт/м<sup>2</sup>;  $n$  – ступінь полінома.

Таблиця 5 – Точність апроксимації PMV багатовимірним поліномом

Ступінь полінома	Середньоквадратичне відхилення	Коефіцієнт детермінації
2	0.236	0.97
3	0.1153	0.993
4	0.0589	0.9982
5	0.0329	0.9994

Динаміка абсолютної вологості повітря приміщення може бути визначена як:

$$\frac{d\alpha}{dt}V + \alpha q_{\text{вп}} = \alpha_{\text{пп}} q_{\text{пп}} + \dot{m}_{\text{вн}}, \quad (5)$$

де  $\alpha$  – абсолютна вологість повітря приміщення, г/м<sup>3</sup>;  $\alpha_{\text{пп}}$  – абсолютна вологість припливного повітря, г/м<sup>3</sup>;  $\dot{m}_{\text{вн}}$  – масова витрата водяної пари від внутрішніх джерел, г/с.

Залежність між абсолютною вологістю та відносною вологістю отримаємо з використанням рівняння стану ідеального газу та варіанта формули Магнуса-Тетенса для визначення тиску насиченої пари, запропонованої Болтоном [19]:

$$\varphi = \frac{\alpha(t + 273,15)}{2,1674 \cdot 6,112 \cdot e^{\frac{17,67 \cdot t}{t+243,5}}} \quad (6)$$

Залежність масового балансу повітря приміщення, динаміки його температури й тиску має вигляд:

$$\left(\frac{1}{p} \frac{dp}{dt} - \frac{1}{T} \frac{dT}{dt}\right) \rho V + 10^{-3} \cdot \frac{R_{\text{сп}} - R_{\text{вп}}}{R} (\alpha_{\text{пп}} q_{\text{пп}} + \dot{m}_{\text{вн}} - \alpha q_{\text{вп}}) + 10^{-3} \sum_{i=1}^N \frac{R_{\text{сп}} - R_i}{R} (c_{i_{\text{пп}}} q_{\text{пп}} - c_i q_{\text{вп}}) = \rho_{\text{пп}} q_{\text{пп}} - \rho q_{\text{вп}} + 10^{-3} \cdot \dot{m}_{\text{вн}}, \quad (7)$$

де  $p$  – тиск повітря приміщення, Па;  $T$  – температура повітря приміщення, К;  $\rho$  – щільність повітря приміщення, кг/м<sup>3</sup>;  $R_{\text{сп}}$ ,  $R_{\text{вп}}$  та  $R_i$  – індивідуальні газові сталі відповідно сухого повітря, водяної пари та забруднювача  $i$ , Дж/(кг·К);  $\rho_{\text{пп}}$  – щільність припливного повітря, кг/м<sup>3</sup>.

Формула енергетичного балансу приміщення має вигляд:

$$\rho C_v V \frac{dT}{dt} = u_{\text{пп}} \rho_{\text{пп}} q_{\text{пп}} - u \rho q_{\text{вп}} + Q_o + Q_{\text{вн}} \quad (8)$$

де  $C_v$  – питома теплоємність повітря приміщення при сталому об'ємі Дж/кг·К;  $u$  та  $u_{\text{пп}}$  – відповідно питома внутрішня енергія внутрішнього та припливного повітря, Дж/кг;  $Q_o$  – тепловий потік від огорожень, Дж/с;  $Q_{\text{вн}}$  – тепловий потік від внутрішніх джерел, Дж/с.

Розглянуті залежності (1) – (8) складають математичну модель мікроклімату приміщення, яка дозволяє розглядати його як багатовимірний багатозв'язний об'єкт керування (рис. 1) з п'ятьма регульовальними впливами ( $t_{\text{пп}}$ ,  $\varphi_{\text{пп}}$ ,  $C_{\text{пп}}$ ,  $q_{\text{пп}}$ ,  $q_{\text{вп}}$ ), п'ятьма регульованими величинами ( $t$ ,  $\varphi$ ,  $C$ ,  $PMV$ ,  $AQI$ ) та шістьма збурювальними впливами ( $Q_o$ ,  $Q_{\text{вн}}$ ,  $MET$ ,  $W$ ,  $\dot{m}_{\text{вн}}$ ,  $CLO$ ).

В операторній формі багатовимірний багатозв'язний ланцюг можна представити наступною залежністю:

$$Y(p) = W(p) \cdot X(p) + V(p) \cdot Z(p), \quad (9)$$

де  $Y(p)$  – вектор регульованих величин;  $X(p)$  – вектор регульовальних впливів;  $Z(p)$  – вектор збурювальних впливів;  $W(p)$  – матриця передаткових функцій за каналами керування;  $V(p)$  – матриця передаткових функцій за каналами збурення.

Отримана математична модель мікроклімату приміщення дозволяє побудувати багатопараметричну систему автоматичного керування комфортністю та якістю повітря (рис. 2). Завданнями багатопараметричного регулятора є максимально допустимі концентрації забруднювачів, часткові індекси якості, інтегральний показник комфортності  $PMV$ , температура й відносна вологість повітря приміщення. Підтримання концентрацій забруднювачів нижче максимально допустимих має найвищий пріоритет і повинно забезпечуватись системою автоматичного керування навіть якщо це призведе до тимчасового виходу температури та вологості повітря за комфортні межі. Наступним за пріоритетом є забезпечення мінімального рівня часткових індексів якості повітря. За умови знаходження концентрацій та часткових індексів забруднювачів у безпечних межах, регулятор багатопараметричної САК мікрокліматом має працювати у режимі підтримання заданих температури й вологості або інтегрального показника комфортності. Для забезпечення тривалого безпечного перебування людей значення максимально допустимих концентрацій забруднювачів та часткових індексів якості повітря мають бути встановлені лише авторизованим фахівцем згідно з державними та галузевими вимогами до газового складу повітря. Значення **уставок** температури, вологості та показника комфортності можуть бути задані користувачами – мешканцями приміщення відповідно до їх уподобань.



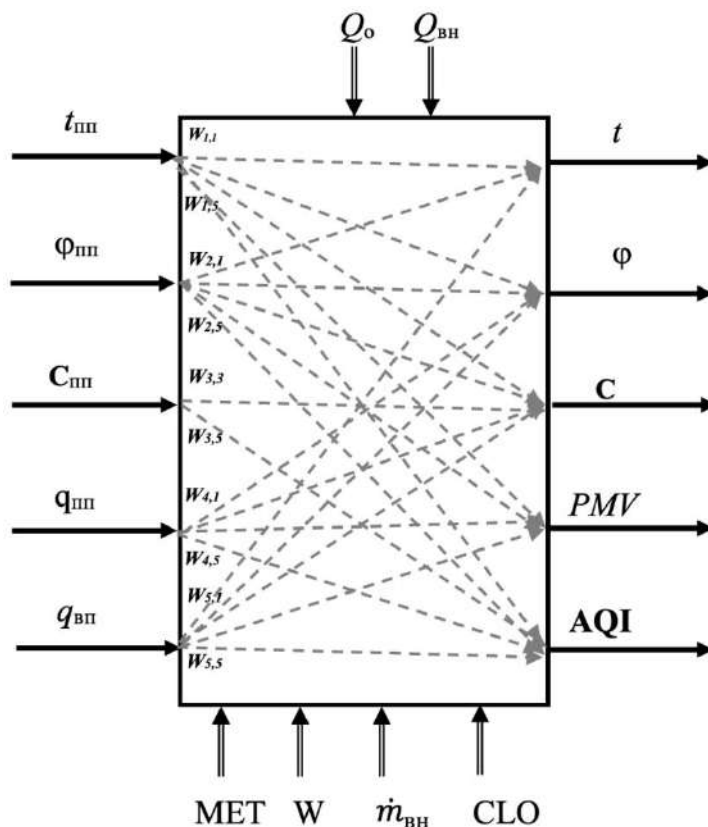


Рисунок 1 – Структурна схема суднового приміщення як багатовимірною багатозв'язного об'єкта керування:

$t_{пп}$ ,  $\phi_{пп}$ ,  $C_{пп}$ ,  $q_{пп}$  – відповідно температура, відносна вологість, вектор концентрацій забруднювачів та об'ємна витрата припливного повітря;  $q_{вп}$  – об'ємна витрата вихідного повітря;  $t$ ,  $\phi$ ,  $C$  – відповідно температура, відносна вологість та вектор концентрацій забруднювачів повітря приміщення;  $PMV$  – інтегральний показник комфортності;  $AQI$  – вектор часткових індексів якості повітря;  $Q_o$  – тепловий потік від огорожень;  $MET$  – середній показник метаболізму мешканців;  $W$  – середня ефективна зовнішня робота мешканців;  $\dot{m}_{вн}$  – масова витрата водяної пари від внутрішніх джерел;  $CLO$  – середня вдягненість мешканців

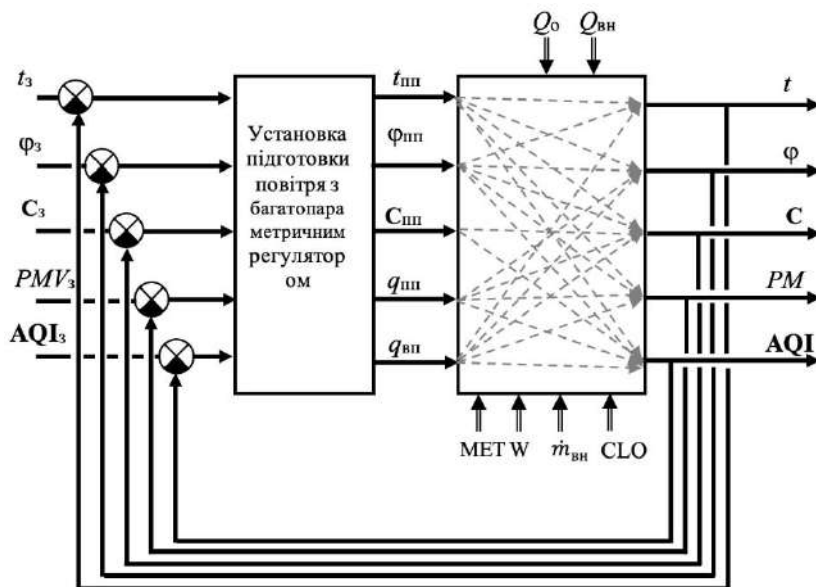


Рисунок 2 – Структурна схема багатопараметричної САК комфортністю та якістю повітря суднового приміщення:

$t_з$ ,  $\phi_з$ ,  $C_з$ ,  $PMV_з$ ,  $AQI_з$  – відповідно задані температура, відносна вологість, вектор максимально допустимих концентрацій забруднювачів, інтегральний показник комфортності, вектор максимально допустимих індексів якості повітря.

Згідно зі сформульованими вимогами до САК, задачу автоматичного керування можна інтерпретувати у вигляді задачі багатокритеріальної оптимізації: пошуку оптимального за Парето лексикографічного рішення:

$$\vec{x} = (t_{\text{пп}}, \varphi_{\text{пп}}, c_{1\text{пп}}, \dots, c_{n\text{пп}}, \varrho_{\text{пп}}, \varrho_{\text{вп}})$$

яке мінімізує цільові функції  $f_i$  згідно з їх пріоритетом, до того ж пріоритет цільової функції тим вище, чим нижче її індекс  $i$ :

$$\min_{lex} \{f_1(\vec{x}), \dots, f_{2n+3}(\vec{x})\},$$

$$f_i(\vec{x}) = \text{sgn}(c_i(\vec{x}) - c_{i_{\text{max}}}), i = 1, \dots, n,$$

$$f_{n+j}(\vec{x}) = \text{sgn}(AQI_j(\vec{x}) - AQI_{j_{\text{max}}}), j = 1, \dots, n,$$

$$f_{2n+1}(\vec{x}) = |\text{PMV}(\vec{x}) - \text{PMV}_3(\vec{x})|,$$

$$f_{2n+2}(\vec{x}) = |t(\vec{x}) - t_3(\vec{x})|,$$

$$f_{2n+3}(\vec{x}) = |\varphi(\vec{x}) - \varphi_3(\vec{x})|.$$

Універсальність сформульованої задачі автоматичного керування дозволяє адаптувати САК відповідно до міжнародних, державних та галузевих стандартів залежно від умов роботи судна та вантажів, що перевозяться.

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** Проведено формалізацію вимог до газового складу повітря, отримані аналітичні залежності. Розроблено математичну модель мікроклімату приміщення з урахуванням газового складу повітря та інтегральних показників його якості й комфортності.

Запропоновано альтернативний підхід до забезпечення комфортності помешкання з урахуванням показників якості повітря та структурну схему системи автоматичного керування. Сформульовано задачу автоматичного керування у вигляді задачі багатопараметричної оптимізації.

Отримані результати дослідження можуть застосовуватись при моделюванні динаміки показників комфортності та безпечності мікроклімату приміщень і синтезу систем автоматичного керування.

Практична реалізація систем автоматичного керування якістю та комфортністю повітря суднових приміщень потребує проведення наступних подальших наукових досліджень: верифікації моделі, деталізації структури САК, розробки алгоритму керування розподіленням повітря та процесами його фільтрації, створення прототипу багатопараметричного регулятора на базі мікропроцесорної техніки та дослідження його ефективності.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Про затвердження Морської доктрини України на період до 2035 року : Постанова Кабінету Міністрів України від 07.10.2009 р. № 1307. *Верховна Рада України. Законодавство України*: вебсайт. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1307-2009-п>.

2. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 30.05.2018 р. № 430-р. *Верховна Рада України. Законодавство України* : вебсайт. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p>.
3. ДСП 7.7.4.-057-99 : Державні санітарні правила для морських суден України : Державна санітарно-епідеміологічна служба України, 1999. *Верховна Рада України. Законодавство України* : веб-сайт. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0057488-00>.
4. ДСП 7.7.4.048-99-2000 : Державні санітарні правила для річкових суден України: Державна санітарно-епідеміологічна служба України, 2000 *Верховна Рада України. Законодавство України* : вебсайт. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va048282-99>.
5. Про затвердження переліку професійних захворювань : Постанова Кабінету Міністрів України від 08.11.2000 р. № 1662. *Верховна Рада України. Законодавство України* : вебсайт. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1662-2000-п>.
6. He Zhang Ravi Srinivasan A Systematic Review of Air Quality Sensors, Guidelines, and Measurement Studies for Indoor Air Quality Management. MDPI, Sustainability Open Access *Journal He Zhang & Ravi Srinivasan*. October 2020. Vol. 12(21). P 1-38.
7. Regulation of Air Pollution: Australia. *Library of congress LAW* URL : <https://www.loc.gov/law/help/air-pollution/australia.php>
8. Criteria Air Pollutants. *United States Environmental Protection Agency* URL : <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>
9. Limits for Air Contaminants. *United States department of labor* URL : <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.1000TABLEZ1>
10. List of MAK and BAT Values. Maximum Concentrations and Biological Tolerance Values at the Workplace Permanent Senate Commission for the Investigation of Health Hazards of Chemical Compounds in the Work Area URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9783527695539.oth1>
11. India: air Quality Standards. *Transport Policy.net* : <https://www.transportpolicy.net/standard/india-air-quality-standards/>
12. IAQ Management Act, Ministry of Environment. *Korea Legislation Research Institute* URL : [https://elaw.klri.re.kr/eng\\_service/lawView.do?hseq=41231&lang=ENG](https://elaw.klri.re.kr/eng_service/lawView.do?hseq=41231&lang=ENG)
13. Canadian Ambient Air Quality Standards (CAAQS). *Canada's Air*. URL : <https://www.ccme.ca/en/air-quality-report>
14. Air quality guidelines – global update 2005. *World Health Organization*. URL : <https://www.who.int/airpollution/publications/aqg2005/en/>
15. The NIOSH Occupational Exposure Banding Process for Chemical Risk Management : National Institute for Occupational Safety and Health. URL : <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2019-132/pdfs/2019-132.pdf>
16. ACGIH. TLVs and BEIs: Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices. In American Conference of Governmental Industrial Hygienists; ACGIH: Cincinnati, OH, USA, 2019
17. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2016, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. URL : [https://ashrae.iwrapper.com/ViewOnline/Standard\\_62.1-2016](https://ashrae.iwrapper.com/ViewOnline/Standard_62.1-2016)
18. Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI). EPA. URL : <https://www3.epa.gov/airnow/aqi-technical-assistance-document-sept2018.pdf>
19. Bolton D. The Computation of Equivalent Potential Temperature. *Journals American Meteorological Society*. 1980. Vol.108, P.1046-1053 DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2)
20. Голиков В. А. Повышение эффективности и оптимизация режимов работы систем судового микроклимата: дис. на соиск. науч. степ. док-ра техн. наук: спец. 05.08.05 «Судовые энергетические установки». Николаїв, 2000.

21. Chihui Zhu, Nianping Li Study on indoor air quality evaluation index based on comfort evaluation experiment, *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 205, P. 2246–2253.
22. Ходарина К. В. Обеспечение комфортных условий микроклимата обитаемых помещений морских судов: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: спец. 05.22.20 «Эксплуатация и ремонт средств транспорта», 2013.

## REFERENCES

1. Pro zatverdzhennia Morskoi doktryny Ukrainy na period do 2035 roku : Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 07.10.2009 r. № 1307. Verkhovna rada Ukrainy. *Zakonodavstvo Ukrainy: veb-sait*. Retrived from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1307-2009-p>.
2. Pro skhvalennia Natsionalnoi transportnoi stratehii Ukrainy na period do 2030 roku : Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 30.05.2018 r. № 430-r. Verkhovna rada Ukrainy. *Zakonodavstvo Ukrainy : veb-sait*. Retrived from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-r>.
3. DSP 7.7.4.-057-99 : Derzhavni sanitarni pravyla dlia morskykh suden Ukrainy : Derzhavna sanitarno-epidemiolohichna sluzhba Ukrainy, 1999. Verkhovna rada Ukrainy. *Zakonodavstvo Ukrainy : veb-sait*. Retrived from <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0057488-00>.
4. DSP 7.7.4.048-99-2000 : Derzhavni sanitarni pravyla dlia richkovykh suden Ukrainy: Derzhavna sanitarno-epidemiolohichna sluzhba Ukrainy, 2000 Verkhovna rada Ukrainy. *Zakonodavstvo Ukrainy : veb-sait*. Retrived from : <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va048282-99>.
5. Pro zatverdzhennia pereliku profesiinykh zakhvoriuvan : Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 08.11.2000 r. № 1662. Verkhovna rada Ukrainy. *Zakonodavstvo Ukrainy : veb-sait*. Retrived from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1662-2000-p>.
6. He Zhang Ravi Srinivasan A Systematic Review of Air Quality Sensors, Guidelines, and Measurement Studies for Indoor Air Quality Management. MDPI, Sustainability Open Access Journal He Zhang & Ravi Srinivasan. October 2020. Vol. 12(21). P 1-38.
7. . Regulation of Air Pollution: Australia. Library of congress LAW. Retrived from <https://www.loc.gov/law/help/air-pollution/australia.php>
8. Criteria Air Pollutants. United States Environmental Protection Agency. Retrived from <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>
9. Limits for Air Contaminants. United States department of labort. Retrived from <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.1000TABLEZ1>
10. List of MAK and BAT Values. Maximum Concentrations and Biological Tolerance Values at the Workplace Permanent Senate Commission for the Investigation of Health Hazards of Chemical Compounds in the Work Area Retrived from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9783527695539.oth1>
11. India: air Quality Standards. *Transport Policy.net*. Retrived from <https://www.transportpolicy.net/standard/india-air-quality-standards/>
12. IAQ Management Act, Ministry of Environment. Korea Legislation Research Institute Retrived from [https://elaw.klri.re.kr/eng\\_service/lawView.do?hseq=41231&lang=ENG](https://elaw.klri.re.kr/eng_service/lawView.do?hseq=41231&lang=ENG)
13. Canadian Ambient Air Quality Standards (CAAQS). *Canada»s Air*. Retrived from <https://www.ccme.ca/en/air-quality-report>
14. Air quality guidelines – global update 2005. Word Health Organization. Retrived from <https://www.who.int/airpollution/publications/aqg2005/en/>
15. The NIOSH Occupational Exposure Banding Process for Chemical Risk Management : National Institute for Occupational Safety and Health. Retrived from <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2019-132/pdfs/2019-132.pdf>
16. ACGIH. TLVs and BEIs: Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices. In American Conference of Governmental Industrial Hygienists; ACGIH: Cincinnati, OH, USA, 2019

17. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2016, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Retrived from [https://ashrae.iwrapper.com/ViewOnline/Standard\\_62.1-2016](https://ashrae.iwrapper.com/ViewOnline/Standard_62.1-2016)
18. Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI). EPA. Retrived from <https://www3.epa.gov/airnow/aqi-technical-assistance-document-sept2018.pdf>
19. Bolton D. (1980). The Computation of Equivalent Potential Temperature. *Journals Americal Meteorological Society, Vol. 108*, 1046–1053. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2)
20. Golikov V. A. (2000). Povichshenie ehffektivnosti i optimizaciya rezhimov rabotih sistem sudovogo mikroklimata. *Doctors Thesis*. Mykolaiv.
21. Chihui Zhu & Nianping Li. (2017). Study on indoor air quality evaluation index based on comfort evaluation experiment. *Procedia Engineering, Vol. 205*, 2246–2253.
22. Khodarina K. V. (2013). Obespechenie komfortnihkh usloviy mikroklimata obitaemihkh pometheniy morskih sudov. *Candidates Thesis*.

*Метою дослідження є розробка структури системи автоматичного керування (САК) якістю і комфортністю повітря суднового приміщення та постановка задачі автоматичного керування. Проаналізовано сучасні методи оцінки безпеки газового складу повітря. У результаті встановлено, що створення систем автоматичного керування потребує застосування аналітичних показників безпеки при математичному моделюванні мікроклімату приміщення.*

*Проведено формалізацію вимог до газового складу повітря. Отримані аналітичні залежності включено в математичну модель мікроклімату приміщення.*

*Запропоновано альтернативний підхід до забезпечення комфортності помешкання з урахуванням показників якості повітря.*

*Стаття містить розробку математичної моделі мікроклімату приміщення з урахуванням газового складу повітря. Запропоновано структурну схему системи автоматичного керування і сформульовано задачу автоматичного керування у вигляді задачі багатопараметричної оптимізації. Визначено такі напрями подальших досліджень: верифікація моделі, деталізації структури САК і розробка алгоритму керування, створення прототипу на мікропроцесорній елементарній базі.*

*Отримані результати дослідження можуть застосовуватись при моделюванні динаміки показників комфортності та безпеки мікроклімату приміщень і створенні систем автоматичного керування.*

**Ключові слова:** безпека мореплавства, якість повітря, газовий склад повітря, комфортність помешкання, багатопараметрична оптимізація.

#### **Bily V.A., Holikov V.A. AUTOMATIC CONTROL OF INDOOR AIR QUALITY AND COMFORT OF SHIP PREMISES**

*The study is targeted at developing the structure of automatic control system (ACS) for indoor air quality and comfort management. Automatic control problem has been formalized as a multi-criteria optimization.*

*The modern methods of assessing the safety of the gas composition in the air have been analyzed. As follows from the analysis, it has been established, that the synthesis of automatic control system requires application of analytical safety indicators for accurate mathematical modeling of the ship premises microclimate.*

*The requirements for the gas composition in the air have been formalized. The obtained analytical dependences have been included into the mathematical model of the room microclimate.*

*An alternative approach for the air quality and comfort management has been developed.*

*The article contains the design of the mathematical model of the ship premises microclimate considering analytical functions for gas composition in the air and air quality. The structural scheme of the automatic control system has been proposed and the automatic control problem has been defined through the multi-criteria optimization.*

*The following areas for further research have been identified: verification of the model, particularization of the ACS structure and development of a control algorithm, creation of a prototype on a microprocessor elementary base.*

*The obtained results of the research can be applied when modeling the dynamics of indicators of comfort and safety of room microclimate as well as when creating automatic control systems.*

**Keywords:** maritime safety, air quality, gas composition, comfort, multi-criteria optimization.

© Білій В. А., Голіков В. А.

Статтю прийнято  
до редакції 24.05.21