

УДК 629.12.06:628.84
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.6/32>

Білий В.А.

Національний університет «Одеська морська академія»

Голіков В.А.

Національний університет «Одеська морська академія»

БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИЙ ПІДХІД ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ МІКРОКЛІМАТУ СУДНОВИХ ПРИМІЩЕНЬ

Мікроклімат житлових та робочих приміщень судна є одним із найважливіших факторів, що впливають на самопочуття людини-оператора та зумовлюють стабільність людського елемента ергатичної системи людина-судно. Стійкість до стресу та здатність організму людини відновлювати працездатність та когнітивні здібності залежить від комфортності та безпечності газового складу внутрішнього повітря приміщень. Комплексне управління мікрокліматом суднових приміщень потребує розширеної інтерпретації для підтримання безпечності газового складу повітря, забезпечення комфортності помешкання та енергозбереження й є актуальним завданням. У статті розглянуто різні підходи до управління параметрами мікроклімату та побудови автоматичної систем підготовки повітря як невід'ємної частини системи життєзабезпечення судна. Проаналізовані сучасні методи забезпечення комфортного та безпечного мікроклімату суднових приміщень. Виділені найбільш перспективні підходи за критерієм ефективності та обчислювальної складності. Результатами роботи є формулювання задачі оптимального багатопараметричного керування безпечністю та комфортністю мікроклімату надбудови судна як сукупності палуб і приміщень та синтез структури системи автоматичного керування. Отримана цільова функція дозволяє втілювати різноманітні оптимізаційні стратегії й адаптувати їх згідно з міжнародними та галузевими вимогами до комфортності та якості повітря й забезпечувати пріоритетність критеріїв оптимізації. Встановлено, що для вирішення поставленої задачі оптимізації доцільно застосування децентралізованої схеми керування.

Ключові слова: мікроклімат, газовий склад, комфортність, результативна температура, прогнозувальні моделі, децентралізоване керування.

Постановка проблеми. Потреби економічної ефективності сучасного судноплавства зумовлюють тенденції до зменшення чисельності екіпажів, що призводить до збільшення навантаження на кожного моряка на борту [1; 2]. Підтримання достатнього рівня безпеки судна потребує, зокрема, забезпечення безпечного та комфортного помешкання, адже більше 50% аварій та нещасних випадків стаються через людський фактор [2]. Забезпечення комфортного помешкання робітничих та житлових приміщень дозволяє зменшити навантаження на організм моряків та сприяє підвищенню їхньої здібності виконувати обов'язки. До систем мікроклімату й вентиляції приміщень існує низка конструктивних та експлуатаційних вимог, зокрема, визначені в міжнародних стандартах ISO7547, ISO8862, ISO8864. Мікроклімат суднових приміщень повинен відповідати вимогам комфортності та безпечності. Під безпечністю мікроклімату розуміється відповідність температури, вологості, рухомості та газового складу повітря міжнародним стандар-

там та нормам. Визначення газового складу повітря регламентується міжнародними стандартами ISO16000-1 – ISO16000-38. Стандарт ISO/FDIS 16000-40 створено як основу для розроблення систем управління якістю повітря. Провідні держави світу розробили стандарти якості повітря житлових та виробничих приміщень [3]. Підтримання належного рівня якості повітря приміщень набуває великого значення з огляду на сучасні дослідження [4; 5] впливу забруднення повітря на когнітивні здібності людини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Задачу комплексного управління мікрокліматом суднових приміщень можна поділити на такі підзадачі згідно з їх пріоритетом: підтримання безпечного газового складу повітря, забезпечення комфортності помешкання та енергозбереження.

Огляд підходів до оптимального керування мікрокліматом [6] показав, що сучасною тенденцією в цій сфері є розвиток систем управління енерговитратами та комфортністю (ECMS). У таких системах комфортність найчастіше розглядають як

інтегральний показник, що враховує температуру (48% досліджень), вологість (6% досліджень) та якість повітря (18% досліджень). Більшість робіт досліджують вплив уподобань мешканців на ефективність роботи систем ЕСМС. Найбільш використаними підходами до керування мікрокліматом є прогностичні моделі MPC, багатоагентні системи, системи з нечіткою логікою та системи з релейним керуванням. Найбільш використаними алгоритмами є генетичні, багатопараметричний метод рою часток та опуклої оптимізації. З 121-ї проаналізованої роботи у 8-ми температура, вологість та якість повітря приміщень було одночасно використано як критерії оптимізації.

Постановка завдання. Метою роботи є розгляд існуючих підходів до оптимального керування мікрокліматом суднових приміщень та постановка задачі оптимального багатопараметричного керування комфортністю та безпечністю мікроклімату суднових приміщень.

Виклад основного матеріалу. У роботі [7] висунуто концепцію мікроклімату, сутність якої полягає у визначенні людини як об'єкта керування. Було досліджено характеристики мікроклімату суднових приміщень та побудовано лінійні та нелінійні розподілені моделі мікроклімату та моделі із зосередженими параметрами й узагальнену модель видалення забруднювачів з повітря. Під час чисельного експерименту з використанням П, ПІ та ПІД законів керування керованою величиною було вибрано результативну температуру РТ, а як керувальний вплив – масову витрату припливного повітря. Моделювання показало, що для керування мікрокліматом за результативною температурою достатньо ПІ регулятора, однак жоден із досліджених традиційних законів керування не здатен забезпечити перебування в заданих межах параметрів мікроклімату: температури, вологості та швидкості повітря в приміщенні. Для вирішення цієї проблеми на базі математичної моделі мікроклімату із зосередженими параметрами задачу забезпечення комфортного мікроклімату було зведено до класичної задачі оптимізації руху у фазовому просторі за наявності обмежень із цільовим функціоналом

$$J = \int_0^T (PT(x_1, x_2, x_3) - PT_3)^2 dt,$$

де $x_1(t, \rho)$, $x_2(\phi, \rho)$, $x_3(v, \rho)$ – фазові координати об'єкта керування.

Оптимальне керування повинне забезпечувати мінімум функціонала та мінімальний час перебігу процесу T . Вирішення зазначеної задачі

дозволило синтезувати оптимальний релейний регулятор, в якому керувальний вплив виражається як кусочно-постійна функція:

$$u_j(\tau) = \text{sign} \left(\sum_{i=0}^3 k_{ji} x_i(\tau) \right), j = 1..4,$$

де u_j – j -й керувальний вплив; x_i – i -та фазова координата; k_{ij} – коефіцієнти.

У введенні додаткових фазових координат, що відповідають концентраціям забруднювачів, цей метод може бути адаптований до багатопараметричного керування комфортністю та якістю повітря. Проте для застосування для оптимального керування мікрокліматом групи приміщень даний метод потребує подальшого розвитку та дослідження.

Слід зазначити, що хоча використання класичних пропорційно-інтегральних (PI) та пропорційно-інтегрально-похідних (PID) контролерів покращує перехідну характеристику процесу, ефективність контролерів чутлива до вибору коефіцієнтів. Параметри контролера, що забезпечують оптимальне підтримання заданого значення за певних умов, не підходять для досягання інших цілей, таких як відстеження змінної заданої точки, мінімізації споживання енергії, а також пошуку балансу між декількома цілями відповідно до їх пріоритету [6; 7; 8]. Контролери PI та PID не можуть забезпечити оптимальний контроль і стабільність під час багатопараметричного керування навіть у разі їх каскадування. Це зумовило розвиток досліджень із застосування методів адаптивного та оптимального управління мікрокліматом.

Перспективним підходом до розв'язання задач багатопараметричного керування комфортністю та безпечністю мікроклімату є використання прогностичних моделей MPC. Цей підхід передбачає використання динамічної моделі об'єкта керування, деякої цільової функції та алгоритму оптимізації для визначення оптимального керування на заданому горизонті. У загальному випадку цільова функція має вигляд

$$J(\mathbf{u}_k) = J_y(\mathbf{u}_k) + J_u(\mathbf{u}_k) + J_{yu}(\mathbf{u}_k) + J_\varepsilon(\mathbf{u}_k),$$

де \mathbf{u}_k – вектор керувальних впливів, який є розв'язком оптимізаційної задачі на кроці k ; $J_y(\mathbf{u}_k)$ – складник, що визначає якість вихідних сигналів; $J_u(\mathbf{u}_k)$ – складник, що визначає вид керувальних впливів; $J_\varepsilon(\mathbf{u}_k)$

Основними перевагами застосованого методу MPC є його здатність урахувувати передбачувані зовнішні фактори (прогнозів погоди та зайнятості приміщення) й обмеження, що застосовані до керованих величин та керувальних впливів. У роботі [9] запропоновано застосування

прогнозувальних моделей MPC для управління комфортністю мікроклімату за критерієм мінімізації вживаної енергії з обмеженнями потужності системи кондиціонування, мінімального потоку повітря, мінімальної та максимальної температури зони комфорту. Математичну модель приміщення було отримано з рівнянь теплового та масового балансу, а цільова функція енергетичних витрат має вигляд

$$J_{ec} = \sum_{t=1}^{t_{max}} \left[|W_{hc}(t)| + C_p Q_{in}(t) (T_{in} - T_{out}(t)) + (Q_{in}(t))^2 / 2S_p \right],$$

де t_{max} – горизонт керування, с; $W_{hc}(t)$ – витрати енергії на охолодження або нагрів повітря, Вт; $Q_{in}(t)$ – масова витрата припливного повітря, кг/с; T_{in} – температура припливного повітря, С°; $T_{out}(t)$ – температура зовнішнього повітря, С°; S_p – площа перетину вхідного отвору припливного повітря, м².

Для зменшення обчислювальної складності моделі була проведена її лінеаризація, що дозволяє здійснювати керування мікрокліматом у реальному часі. Зауважимо, що в такій постановці задачі керування цільова функція не є адитивно-відокремлюваною та не може бути узагальнена для синтезу децентралізованого алгоритму.

Вагомим недоліком методу прогностичних моделей є високі вимоги до обчислювальної потужності контролерів, особливо в разі використання нелінійної моделі об'єкта керування й великої кількості керованих величин та керувальних впливів, оскільки метод потребує вирішення задачі оптимізації на кожному кроці управління.

У роботі [10] запропоновано методику синтезу децентралізованої системи управління мікрокліматом групи приміщень, яка має значно нижчу обчислювальну складність та може бути реалізована на сучасній базі контролерів реального часу. Така система складається з декількох незалежних інтелектуальних агентів, пов'язаних із центральним контролером. Теоретичною основою методики є моделювання мікроклімату комплексу приміщень з використання термодинамічної моделі опору-емності, яка дозволяє поставити задачу статичного розподілення ресурсів (припливного повітря) для підтримання температури в кожному приміщенні якомога ближче до встановленої за одночасної мінімізації енергетичних витрат системи кондиціонування повітря. Відповідна цільова функція поставленої задачі стаціонарної оптимізації має вигляд:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i \in N} r_i (T_i - T_i^{set})^2 + \frac{w}{\eta} \sum_{i \in N} c_a m_i |T_i - T^s| + ws \left(\sum_{i \in N} m_i \right)^3$$

де r_i та w – позитивні вагові коефіцієнти; η – коефіцієнт продуктивності нагрівального/охолоджувального елемента; s – коефіцієнт енергетичних

витрат вентилятору; T_i , T_i^{set} , m_i – відповідно температура, уставка температури, масова витрата припливного повітря в приміщення i ; T^s – температура припливного повітря; c_a – питома теплоємність повітря.

Задача стаціонарної оптимізації вирішувалась із використанням субградієнтного методу опуклої оптимізації, який дозволяє побудувати децентралізований ітераційний алгоритм визначення керувального впливу m_i в залежності від уставки температури T_i^{set} та поточної температури повітря в приміщенні. Особливістю запропонованої методики є можливість упровадження контролерів з динамічним зворотнім зв'язком, які керують потоком повітря в кожне з контрольованих приміщень.

Управління на основі правил широко використовується для контролю температури в системах управління мікрокліматом. Встановлені значення температури беруться з інженерних сценаріїв-правил типу «якщо умова, то дія», за допомогою яких контролер реалізує управління температурою для кожної теплової зони. Ефективність таких систем залежить від належних правил та відповідних параметрів. Одним із перспективних підходів до керування мікрокліматом на основі правил є застосування систем керування з нечіткою логікою [11]. Контролер отримує на вході завдану користувачем температуру, поточну температуру в приміщенні, температуру точки роси, зайнятість приміщення (кількість людей) та час дня (ранок, після обіду, ніч). На виході контролер розраховує навантаження компресору та вентилятору, режим роботи (контроль температури або вологості) та інтенсивність потоків повітря. Контролер складається з бази даних для нормалізації значень вхідних параметрів, бази нечітких правил, ядра нечіткого виводу та декодера, що відображує висновки ядра нечіткого виводу в команди виконавчим елементам. Розрахунок вихідних значень контролеру здійснюється за допомогою 18-ти матриць евристичних правил «якщо, то». Основним недоліком таких систем є потреба в перенастроюванні під час зміни умов експлуатації для забезпечення оптимальності. Цей тип управління може призвести до перепадів температури або ефектів синхронізації та не забезпечувати оптимальних рішень з точки зору споживання енергії.

Надбудова судна складається з декількох суміжних житлових та робітничих приміщень, тому задачу керування судовим мікрокліматом доцільно розглядати як комплексне завдання оптимізації параметрів повітря в декількох контрольованих зонах. Проведений аналіз наукових

праць показав, що задачу синтезу оптимальних систем багатопараметричного автоматичного керування безпечністю, якістю та комфортністю повітря приміщень суднової надбудови доцільно вирішувати зведенням її до задачі статичного розподілу ресурсів за методом, запропонованим у роботі [10]. Така система повинна забезпечувати оптимальний керувальний вплив

$$\mathbf{u} = (t_{mn}, c_{mn}^1, \dots, c_{mn}^M, m_{mn}^1, \dots, m_{mn}^M) = \operatorname{argmin} J(\mathbf{u}),$$

$$J = \sum_{i \in N} \left(\sum_{j \in M} \alpha_j c_j^i + \beta AQI_n^i + \gamma |PMV_n^i| + \mu^i |t^i - t_{st}^i| + \zeta^i |\varphi^i - \varphi_{st}^i| + \nu^i + \vartheta c_{m_i} |t^i - t_n^i| \right),$$

$$c_j^i \text{ " } c_j^{\max}$$

$$AQI^i \text{ " } AQI^{\max}$$

$$t^{\min} \text{ " } t^i \text{ " } t^{\max}$$

$$\varphi^{\min} \leq \varphi^i \leq \varphi^{\max}$$

$$v^i \text{ " } v^{\max}$$

де t^i , φ^i , v^i , c_j^i – відповідно температура, відносна вологість та концентрація j -го забруднювача повітря i -го приміщення; t_{mn} , φ_{mn} , c_{mn}^j – відповідно температура, відносна вологість та концентрація j -го забруднювача припливного повітря; M – кількість контрольованих забруднювачів; m_{mn}^i – об’ємна витрата припливного повітря в i -му приміщенні; α_j – ваговий коефіцієнт j -го забруднювача; β – ваговий коефіцієнт індексу якості повітря;

γ^i – ваговий коефіцієнт показника комфортності PMV i -го приміщення; μ^i – ваговий коефіцієнт температури повітря приміщення; ζ^i – ваговий коефіцієнт відносної вологості повітря приміщення; η – ваговий коефіцієнт швидкості повітря; ϑ – ваговий коефіцієнт енергетичних витрат.

Запропонована цільова функція є адитивно-відокремлюваною, що дозволяє синтезувати оптимальний розподілений алгоритм з використанням методів опуклої оптимізації. У загальному випадку сформульована задача неопукла через неопуклість доданків AQI_n^i та PMV_n^i цільової функції. Використання швидких алгоритмів опуклої оптимізації з поліноміальним часом потребують проведення опуклої апроксимації показника комфортності PMV [12] та індексу якості повітря AQI. У роботі [13] запропоновано апроксимувати показник PMV кусково-лінійною функцією, що уможливило використання методів лінійного програмування для його оптимізації. Оскільки більшість прийнятих індексів якості повітря AQI є кусково-лінійними функціями, їх можна апроксимувати опуклою кривою методами регресійного аналізу.

Поставлена задача оптимізації характеризується універсальністю, яка забезпечується структурою цільової функції та можливістю налаштувати оптимізаційну стратегію за допомогою

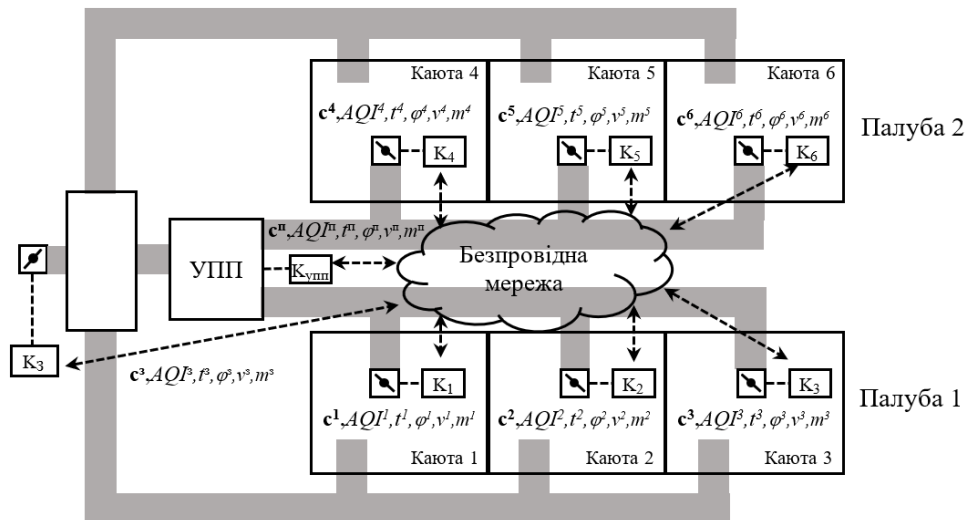


Рис. 1. Схема розподіленої системи багатопараметричного автоматичного керування якістю та комфортністю повітря суднових приміщень: УПП – установка підготовки повітря; K_i – контролер якості повітря i -го приміщення; $c^i, AQI^i, t^i, \varphi^i, v^i, m^i$ – відповідно вектор концентрацій забруднювачів, індекс якості, температура, відносна вологість, швидкість та масова витрата повітря i -го приміщення; $c^3, AQI^3, t^3, \varphi^3, v^3, m^3$ – відповідно вектор концентрацій забруднювачів, індекс якості, температура, відносна вологість, швидкість та масова витрата зовнішнього повітря; $c^n, AQI^n, \varphi^n, v^n, m^n$ – відповідно вектор концентрацій забруднювачів, індекс якості, температура, відносна вологість, швидкість та масова витрата припливного повітря

вагових коефіцієнтів. Так, відповідність стандартам якості повітря та підтримання комфорту з найменшим пріоритетом енергозбереження забезпечуються ваговими коефіцієнтами, що задовольняють $\alpha > \beta > \gamma > \mu > \xi > \eta > \nu$.

На рис. 1. представлена схема можливої реалізації розподіленої системи багатопараметричного автоматичного керування якістю та комфортністю повітря суднових приміщень. Система складається зі з'єднаних в однорангову мережу контролерів масової витрати припливного повітря в приміщеннях, контролеру заслінки зовнішнього повітря та контролеру установки підготовки повітря. Децентралізований принцип організації системи дозволяє забезпечити стійкість до несправностей окремих компонентів та зниження вимог до їх обчислювальної потужності. Для дослідження ефективності алгоритмів децентра-

лізованого керування доцільно використовувати методику моделювання мікроклімату суднових приміщень, запропоновану в роботі [14].

Висновки. Проаналізовані методи керування мікрокліматом не ставили завдання забезпечувати комфортність помешкання за всіма регламентованими параметрами (температура, вологість та рухомість повітря) з одночасним забезпеченням його безпечності за газовим складом та енергоефективності. Підтримання якості газового складу повітря суднових приміщень за заданими критеріями вмісту домішок можна виділити як невирішену раніше частку загальної проблеми забезпечення комфортного та безпечного помешкання. Виявлено необхідність удосконалення існуючих методів управління мікрокліматом шляхом включення якості газового складу атмосфери житлових приміщень до показників комфортності помешкання.

Список літератури:

1. Russo A., Popović T., Tomić V. The impact of technology on seafarer's work and leisure. In 6th International Maritime Science Conference. Book of Proceedings, 2014. P. 173–178.
2. Elspeth H., Hassel E.V. Risks and Benefits of Crew Reduction and/or Removal with Increased Automation on the Ship Operator: A Licensed Deck Officer's Perspective. Applied Sciences, 2021. Vol. 11, no. 8: 3569.
3. Abdul-Wahab S.A., Chin Fah En S., Elkamel A., Ahmadi L., Yetilmezsoy K. A review of standards and guidelines set by international bodies for the parameters of indoor air quality. Atmospheric Pollution Research. vol. 6, issue 5, 2015. pp. 751–767.
4. Satish U., Mendell M.J., Shekhar K., Hotchi T., Sullivan D., Streufert S., Fisk W. J. Is CO2 an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO2 concentrations on human decision-making performance. Environ Health Perspect. 2012. no. 120:1671.
5. Allen J.G., Mac Naughton P., Satish U., Santanam S., Vallarino J., Spengler J.D. Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: a controlled exposure study of green and conventional office environments. Environ Health Perspect, 2016 no. 124:805.
6. Pervez S., Nursyarizal N., Perumal N., Irraivan E., Taib I. A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews. vol. 34, 2014 pp. 409–429.
7. Голиков В.А. Повышение эффективности и оптимизация режимов работы систем судового микроклимата : дисс. ... д-ра техн. наук : 05.08.05. Одеса, 2000. 407 с.
8. Hazyuk I. Optimal temperature control of intermittently heated buildings using Model Predictive Control: Part I – Building modeling. Building and Environment, 2012. 255 p.
9. Ryzhov A., Ouerdane H., Gryazina E., Bischi A., Turitsyn K. Model predictive control of indoor microclimate: Existing building stock comfort improvement. Energy Conversion and Management, 2018. 179 p.
10. Zhang X., Shi W., Yan B., Malkawi A., Li N. Decentralized and distributed temperature control via HVAC systems in Energy Efficient Building : An approximate solution procedure. 2016 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP), 2016.
11. Md. Fakhrudin H.N., Syed A.A., Mohd.Muzafar Dr. Syed Azam pasha Quadri. Fuzzy Logic in HVAC for Human Comfort, 2016.
12. Jiri C., Privara S., Vana Z., Komarkova D., Sebek Mi. Optimization of predicted mean vote thermal comfort index within Model Predictive Control framework. In 2012 IEEE 51st Annual Conference on Decision and Control (CDC). IEEE, 2012.
13. Zhanbo X., Guoqiang H., Costas S. PMV-Based Event-Triggered Mechanism for Building Energy Management under Uncertainties. Energy and Buildings, 2017.
14. Білий В.А., Голиков В.А., Моделювання мікроклімату суднової надбудови в Matlab-Simulink. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. Миколаїв, 2021. № 2 (485). С. 36–45.

Bily V.A., Golikov V.A. A MULTIPARAMETRIC APPROACH TO ENSURING OF ONBOARD MICROCLIMATE QUALITY

The microclimate of the living and working premises on board ships is one of the most important factors influencing the well-being of the human operator, it's stress tolerance, endurance and cognitive abilities. Comfort and cleanliness of indoor air determines stability of the human element in the human-vessel ergatic system. Integrated management of the onboard indoor microclimate requires an expanded interpretation to maintain its safety and thermal comfort with sufficient energy consumption efficiency of the HVAC system. The article considers different approaches to the management of microclimate parameters and the design of automatic air handling systems as an integral part of the ship's life support system. Modern methods of ensuring a comfortable and safe microclimate of ship premises are analyzed. The most promising approaches in terms of efficiency and computational complexity are shortlisted. The results of the work include formulation of the optimal multiparameter control problem and synthesis of the corresponding automatic control system design for managing of microclimate inside ship superstructure. For purpose of this work ship superstructure is considered as a hierarchically interconnected set of decks, cabins and working premises. The obtained cost function allows to implement various optimization strategies and adapt them in accordance with international and industry requirements for comfort and air quality and to ensure the ability to prioritize optimization criteria as required. It was shown that using of decentralized control scheme is promising approach to solve the formulated optimization control problem.

Key words: microclimate, gas composition, air quality, comfort, effective temperature, model predictive control, decentralized control.