МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ БУДІВЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

УДК 65.011.12 DOI: 10.31649/2311-1429-2025-1-74-79

В. В. Джеджула
М. О. Рябчинський
М. А. Чугу

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦІЇ В ЗАКЛАДАХ ГРОМАДСЬКОГО ХАРЧУВАННЯ

Вінницький національний технічний університет

У даній роботі проведено аналіз сучасних підходів до оптимізації енергоспоживання систем вентиляції у закладах громадського харчування. Розглянуто нормативні вимоги до якості повітря та параметрів мікроклімату, зокрема допустимі рівні концентрації CO_2 та температури. На основі аналізу виявлено, що традиційні системи з постійною подачею повітря мають підвищені енергетичні витрати та не завжди забезпечують оптимальні умови. Запропоновано математичну модель, яка описує енергоспоживання системи вентиляції, зміну концентрації CO_2 та температури у приміщенні в залежності від режиму роботи вентиляції. Реалізовано два сценарії: постійна подача повітря та оптимізована змінна подача, яка регулюється відповідно до навантаження. Розрахунки виконано у середовищі MATLAB, а результати візуалізовано у вигляді графіків із зазначенням нормативних меж і ключових точок. Моделювання показало, що оптимізований режим дозволяє суттєво знизити енергоспоживання при збереженні комфортних умов. Проведено кількісне порівняння витрат енергії для обох режимів, що підтвердило ефективність підходу. Результати роботи можуть бути використані для модернізації вентиляційних систем у закладах громадського харчування. Запропонована методика може бути адаптована і для інших типів громадських будівель.

Ключові слова: *математичне моделювання, оптимізаційна модель, енергозбереження, вентиляція і кондиціювання*

Вступ

Заклади громадського харчування – їдальні, кафе, ресторани тощо є одними з найбільших споживачів енергії серед громадських будівель. І найбільша частка споживання енергії припадає саме на системи вентиляції і кондиціювання на які покладаються задачі забезпечення нормативних параметрів мікроклімату, асиміляцію теплонадлишків, вологонадлишків, запахів, подачу свіжого повітря для дихання людей.

Питання енергозбереження в громадських будівлях висвітлені в певній кількості наукових робіт, зокрема нормативні вимоги до систем вентиляції громадських будівель наведено в державних будівельних нормах [1-2], питання енергозбереження, управління, екології при експлуатації систем вентиляції закладів громадського харчування (ЗГХ) наведено у дослідженнях вітчизняних і зарубіжних авторів [3-10], але є недостатньою кількість робіт присвячених саме математичному моделюванню динаміки роботи систем вентиляції ЗГХ з метою оптимізації енергоспоживання при дотриманні нормативних вимог до параметрів мікроклімату.

Метою статті є розробка математичної моделі оптимізації продуктивності систем вентиляції закладу громадського харчування для мінімізації споживання енергії при дотриманні умов якості внутрішнього повітря і температурного комфорту.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Розробити модель динаміки CO_2 та температури в об’ємі приміщення в залежності від значень функції керування – витрати повітря;
2. Розробити модель балансу температури повітря в робочій зоні;
3. Об’єднати запропоновані моделі в систему і здійснити моделювання, надати рекомендації за його результатами щодо оптимізації енергоспоживання.

Основна частина

Робота систем вентиляції обумовлюється низкою факторів, які вона повинна забезпечити і критеріїв, яким вона повинна відповідати. До факторів забезпечення належать температура, відносна вологість, чистота, пиловий і газовий вміст в повітрі робочої зони.

Відповідно до даних [1-3] можна зазначити наступний діапазон параметрів мікроклімату робочої зони (зони обслуговування) обідніх залів: температура +18…+23 ˚С, відносна вологість 40-60%, рухливість повітря 0,1…0,3 м/с, концентрація вуглекислого газу не вище 1000 ppm.

До критеріїв роботи належать – споживання теплової і електричної енергії, холоду, геометричні параметри, рівень звукового тиску, що генерується обладнанням і повітрям та інші. В закладах громадського харчування основними факторами забруднення повітряного середовища є надлишкове тепло, волога і запахи. Причому можна стверджувати по певну залежність між кількістю відвідувачів і рівнем забруднюючих речовин. Від кількості людей залежить завантаження кухні, кількість тепла, вологи, запахів в обідньому залі, а, відповідно, і споживання енергоносіїв.

Для розробки математичної моделі, яка би описувала енергоспоживання системи вентиляції ЗГХ нам потрібно розглянути два основних диференційних рівняння, які описують баланс маси і тепла. Динаміку зміни маси будемо описувати наступними змінними: концентрацією CO_2, C(t) (ppm), та функцією зміни витрати повітря u(t) (м^3/с). Тоді рівняння балансу маси за критерієм концентрації вуглекислого газу набуде вигляду:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{G_{CO_2}(t)}{V} - \frac{u(t)}{V} \times \left(C(t) - C_{out}\right) \tag{1}$$

де: C(t) – концентрація вуглекислого газу в приміщення, ppm;

$G_{CO_2}(t)$ - швидкість генерації CO_2 в приміщенні, ppm× м^3/с; зазвичай залежить від кількості людей в приміщенні обідньої зали. V- об’єм приміщення, м^3; u(t) – витрата зовнішнього повітря, (м^3/с); C_{out} – концентрація вуглекислого газу в зовнішньому повітрі, ppm. Зазвичай стандартна концентрація складає 400…450 ppm.

Перший член рівняння характеризує джерело внутрішнього виділення вуглекислого газу – люди, продукти горіння на кухні тощо, друга складова характеризує видалення вуглекислого газу за допомогою вентиляції шляхом розбавлення.

Тепловий баланс приміщення представимо диференційним рівнянням динаміки температури внутрішнього повітря без урахування теплової інерції:

$$C_T \frac{dT}{dt} = Q_{\text{int}}(t) + \rho \times c_p \times u(t)\left(T_{out}(t) - T(t)\right) + Q_{hvac}(t) \tag{2}$$

де T(t) – температура внутрішня ˚С; $C_T = \rho \times c_p \times V$ - теплоємність маси повітря в робочій зоні чи зоні обслуговування, Дж/˚С, ρ – густина повітря, кг/м^3; c_p – питома теплоємність повітря, Дж/(кг ˚С); $Q_{\text{int}}(t)$ - внутрішні теплонадлишки, Вт; $\rho \times c_p \times u(t)\left(T_{out}(t) - T(t)\right)$ - теплообмін через припливний потік, $Q_{hvac}(t)$ - додаткове охолодження або нагрівання для стабілізації внутрішньої температури, Вт.

Оптимізаційна модель повинна мати обмеження, які ми запишемо через нерівності:

$$\left\{\begin{array}{l} C(t) \le C_{\max} \\ T_{\min} \le T(t) \le T_{\max} \\ u_{\min} \le u(t) \le u_{\max} \end{array}\right\} \tag{3}$$

Перша нерівність обумовлює обмеження щодо максимальної концентрації вуглекислого газу в приміщенні (наприклад згідно [1] – 1000 ppm). Друга нерівність характеризує тепловий комфорт – температурний діапазон оптимальної температури в приміщеннях. Третя складова обмежує

діапазон варіації продуктивності вентиляторів, тут можуть накладатися як нормативні вимоги та і технічні обмеження самих вентиляторів щодо регулювання.

Цільова функція, яку потрібно мінімізувати має вигляд:

$$P_{total}(t) = P_{fan}(t) + P_{cond}(t) + P_d(t) \tag{4}$$

де $P_{fan}(t)$ - потужність вентиляторів у даний момент часу, Вт; $P_{cond}(t)$ - потужність на підігрів або охолодження повітря в даний момент часу; $P_d(t)$ - потужність додаткових споживачів системи вентиляції, наприклад системи автоматики, приводів та іншого, Вт.

Мова йде про миттєві потужності, тому що споживання енергії системи динамічне і залежить як від зовнішніх факторів, наприклад зміна зовнішньої температури і вологості так і від внутрішніх факторів. Одним з найголовніших внутрішніх факторів є наявність відвідувачів у закладі, яку можна зобразити у вигляді функції -графіку відвідуваності (рис. 1).

Рисунок 1 – Усереднений графік відвідуваності закладу громадського харчування, що розглядається у дослідженні

Потужність споживання електричної енергії вентилятором відобразимо наступною функцією:

$$P_{fan}(t) \approx \alpha \times u(t)^3 \tag{5}$$

де α – коефіцієнт пропорційності, $u(t)^3$ - швидкість або витрата повітря при фіксованому напорі у кубі. Коефіцієнт α розраховується в залежності від конструктивних особливостей конкретного вентилятора.

Потужність на нагрів або охолодження припливного повітря визначається наступним чином:

$$P_{cond}(t) = \rho \times c_p \times u(t) \times \left(T_{out}(t) - T_{\sup}(t)\right) \times \left(1 - \eta_{rec}\right) \tag{6}$$

де $T_{\sup}(t)$ - температура припливного повітря, ˚С; η_{rec} - температурна ефективність рекуператора в установці (за наявності).

Завданням оптимізації є пошук мінімуму інтегрального критерію споживання енергії системою вентиляції у періоді часу [0, T_f]:

$$J = \int_0^{T_f} P_{total}(t)\,dt \to \min \tag{7}$$

Реалізацію поставленої задачі виконуємо у Matlab методом оптимального керування. В практичній реалізації час дискредитується певним кроком і на кожному кроці будуємо прогноз зовнішніх умов і відвідуваності закладу. Для оптимізації розв'язуємо кінцево-вимірну задачу мінімізації дискретної цільової функції по вектору керувань. Результати моделювання наведено на рис. 2.

Кубічна залежність потужності вентилятора від витрати (швидкості) вимагає максимально зменшити час і продуктивність вентилятора, при цьому не перегрівати або не переохолоджувати

приміщення і не дати зрости концентрації вуглекислого газу вище встановленої межі в 1000 ppm. Як видно з рисунку 2 графік витрати повітря співставний з графіком відвідуваності (рис. 1) що є логічним. В ці же години у нас спостерігається піки концентрації вуглекислого газу, тоді як пік споживання теплової енергії на нагрів повітря спостерігається у вечірній час, що пов'язано з тим, що зменшується кількість людей, зменшується інтенсивність сонячної радіації і інтенсивність роботи кухні, що призводить до зменшення ефективності роботи рекуператора і більшій потребі у нагріві повітря калорифером.

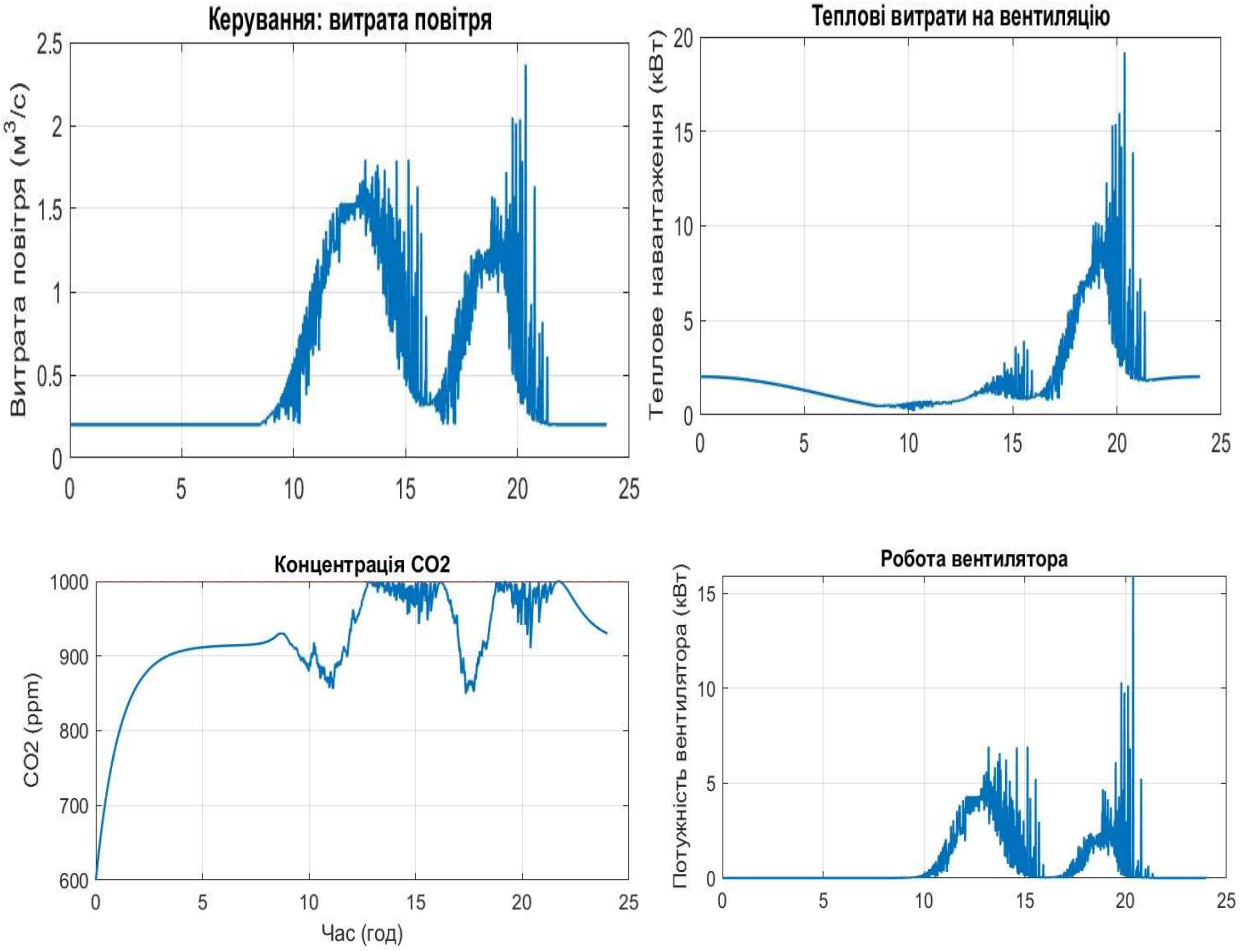

Рисунок 2 – Результати моделювання – оптимізації енергоспоживання (цільової функції): оптимізована витрата повітря, теплові витрати на вентиляцію, динаміка концентрації вуглекислого газу в приміщенні і динаміка роботи вентиляторів

Ефективність даного підходу можна відобразити рівнем накопиченого енергоспоживання протягом типової години роботи закладу (рис. 3.).

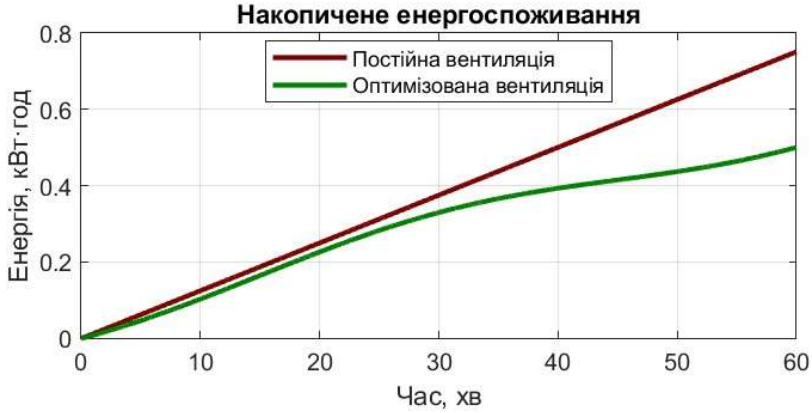

Рисунок 3 – Рівень накопиченого енергоспоживання постійно працюючої вентиляції і оптимізованої вентиляції

Дана динаміка, зображена на рис. 3 є актуальною і для періодів довшого спостереження – доби, місяця, року. Як видно з даного рисунку оптимізована вентиляція за годину використає близько 0,5 кВт год, тоді як не оптимізована вентиляція 0,7 кВт год. В залежності від зовнішніх мікрокліматичних умов, кількості людей, внутрішніх параметрів мікроклімату даний розрив може

зростати дуже суттєво.

Висновки

Запропоновано математичну модель, яка описує енергоспоживання системи вентиляції, зміну концентрації CO_2 та температури у приміщенні в залежності від режиму роботи вентиляції. Проведене моделювання підтвердило, що оптимізовані режими подачі повітря можуть зменшити енергоспоживання вентиляційних систем на значну величину без погіршення якості повітря. Математична модель дозволяє оцінити динаміку концентрації CO_2 та температури у приміщенні залежно від режиму роботи. Аналіз показав, що застосування змінної подачі повітря забезпечує більш стабільні показники мікроклімату в порівнянні з постійною подачею. Отримані результати узгоджуються з даними літератури і підтверджують перспективність впровадження систем з адаптивним керуванням. Розроблена методика може бути використана як основа для подальших досліджень та впроваджень у практику енергоефективних технологій. Таким чином, робота вирішує актуальну задачу зменшення енергоспоживання систем вентиляції закладів громадського харчування без компромісу комфорту відвідувачів і персоналу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціювання повітря. К.: Мінрегіонбуд України. 2014 р.
2. ДБН В.2.2-25:2009 "Підприємства харчування (заклади ресторанного господарства)" (зі змінами 1 і 2). К.: Мінрегіон України. 2020 р.
3. ASHRAE Standard 62.1 – Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality
4. Bingxu Li, Wenjian Cai, A novel CO_2-based demand-controlled ventilation strategy to limit the spread of COVID-19 in the indoor environment, Building and Environment, Volume 219, 2022, 109232, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109232 .
5. Chaoqun Zhuang, Kui Shan, Shengwei Wang, Coordinated demand-controlled ventilation strategy for energy-efficient operation in multi-zone cleanroom air-conditioning systems, Building and Environment,Volume 191, 2021, 107588, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107588
6. Б. М. Літовко і М. Ю. Лідер, «Аналіз способів підвищення енергоефективності систем вентиляції і кондиціонування», *Вісник ВПІ*, вип. 4, с. 47–55, Серп. 2021. https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-157-4-47-55
7. Chengquan Zhang, Fan Yang, Huan Liu, Yunfei Xia, Lianjie He, Yanlei Yu, Lingjie Zeng, Changsheng Cao, Jun Gao, Energy savings of commercial kitchen ventilation and air conditioning systems based on cooking oil control and thermal comfort, Energy and Buildings, Volume 315,2024, 114317, https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114317
8. Shou-Wang Chen, Chao-Yen Chang, Ying-Chieh Chan, Assessing the impact of kitchen hoods and ventilation openings on indoor air quality post-cooking, Journal of Building Engineering,Volume 100, 2025,111721, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111721 .
9. Nina A. Dobbin, Liu Sun, Lance Wallace, Ryan Kulka, Hongyu You, Tim Shin, Daniel Aubin, Melissa St-Jean, Brett C. Singer,The benefit of kitchen exhaust fan use after cooking - An experimental assessment, Building and Environment, Volume 135, 2018, Pages 286-296, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.039.
10. Angui Li, Yujiao Zhao, Dahua Jiang, Xiaotan Hou, Measurement of temperature, relative humidity, concentration distribution and flow field in four typical Chinese commercial kitchens, Building and Environment, Volume 56, 2012, Pages 139-150, ISSN 0360-1323, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.001
11. S. Mudie, M. Vahdati, Fat, oil and grease reduction in commercial kitchen ductwork: A novel biological approach, Waste Management, Volume 61, 2017, Pages 28-39, https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.041 .

REFERENCES

1. DBN V.2.5-67:2013 Opalennia, ventyliatsiia ta kondytsiiuvannia povitria. K.: Minrehionbud Ukrainy. 2014 r.
2. DBN V.2.2-25:2009 "Pidpryiemstva kharchuvannia (zaklady restorannoho hospodarstva)" (zi zminamy 1 i 2). K.: Minrehion Ukrainy. 2020 r.
3. ASHRAE Standard 62.1 – Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality
4. Bingxu Li, Wenjian Cai, A novel CO2-based demand-controlled ventilation strategy to limit the spread of COVID-19 in the indoor environment, Building and Environment,Volume 219, 2022, 109232, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109232 .
5. Chaoqun Zhuang, Kui Shan, Shengwei Wang, Coordinated demand-controlled ventilation strategy for energy-efficient operation in multi-zone cleanroom air-conditioning systems, Building and Environment, Volume 191, 2021, 107588, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107588
6. B. M. Litovko i M. Yu. Lider, «Analiz sposobiv pidvyshchennia enerhoefektyvnosti system ventyliatsii i kondytsionuvannia», Visnyk VPI, vyp. 4, s. 47–55, Serp. 2021. https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-157-4-47-55
7. Chengquan Zhang, Fan Yang, Huan Liu, Yunfei Xia, Lianjie He, Yanlei Yu, Lingjie Zeng, Changsheng Cao, Jun Gao, Energy savings of commercial kitchen ventilation and air conditioning systems based on cooking oil control and thermal comfort, Energy and Buildings, Volume 315,2024, 114317, https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114317
8. Shou-Wang Chen, Chao-Yen Chang, Ying-Chieh Chan, Assessing the impact of kitchen hoods and ventilation openings on indoor air quality post-cooking, Journal of Building Engineering,Volume 100, 2025,111721, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111721 .
9. Nina A. Dobbin, Liu Sun, Lance Wallace, Ryan Kulka, Hongyu You, Tim Shin, Daniel Aubin, Melissa St-Jean, Brett C.

Singer,The benefit of kitchen exhaust fan use after cooking - An experimental assessment, Building and Environment, Volume 135, 2018, Pages 286-296, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.039.
10. Angui Li, Yujiao Zhao, Dahua Jiang, Xiaotan Hou, Measurement of temperature, relative humidity, concentration distribution and flow field in four typical Chinese commercial kitchens, Building and Environment, Volume 56,2012, Pages 139-150,ISSN 0360-1323, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.001
11. S. Mudie, M. Vahdati, Fat, oil and grease reduction in commercial kitchen ductwork: A novel biological approach, Waste Management, Volume 61, 2017, Pages 28-39, https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.041 .

Джеджула В'ячеслав Васильович – доктор економічних наук, професор, енергоаудитор, сертифікований інженер проектувальник, кафедра Будівництва, міського господарства та архітектури Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, email: djedjulavv@gmail.com , ORCID 0000-0002-2740-077

Рябчинський Максим Олександрович - аспірант, кафедра Будівництва, міського господарства та архітектури Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, email: riabchynskyi@tutamail.com https://orcid.org/0009-0001-1980-9761

Чугу Михайло Анатолійович - аспірант, кафедра Будівництва, міського господарства та архітектури Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, email: ChuguM@proton.me, https://orcid.org/0009-0007-0802-9309

V. Dzhedzhula
M. Riabchynskyi
M. Chuhu

MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF ENERGY CONSUMPTION OF VENTILATION SYSTEMS IN PUBLIC CATERING FACILITIES

Vinnytsia National Technical University

In this work, an analysis of modern approaches to optimizing the energy consumption of ventilation systems in public catering facilities is carried out. Regulatory requirements for air quality and microclimate parameters are considered, in particular the permissible levels of CO_2 concentration and temperature. Based on the analysis, it was found that traditional systems with constant air supply have increased energy costs and do not always ensure optimal conditions. A mathematical model is proposed that describes the energy consumption of the ventilation system, as well as the changes in CO_2 concentration and indoor temperature depending on the ventilation operating mode. Two scenarios are implemented: constant air supply and optimized variable supply regulated according to the load. The calculations were performed in the MATLAB environment, and the results were visualized in the form of graphs indicating regulatory limits and key points. The simulation showed that the optimized mode allows for a significant reduction in energy consumption while maintaining comfortable conditions. A quantitative comparison of energy costs for both modes was carried out, confirming the effectiveness of the approach. The results of the work can be used to modernize ventilation systems in public catering facilities. The proposed method can also be adapted for other types of public buildings.

Keywords: *mathematical modeling, optimization model, energy saving, ventilation and air conditioning*

Dzhedzhula Viacheslav - Doctor of Economics, Professor, Energy Auditor, Certified Design Engineer, Department of Construction, Urban Economy, and Architecture Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: djedjulavv@gmail.com , ORCID 0000-0002-2740-077

Riabchynskyi Maksym – PhD student, Department of Construction, Urban Economy and Architecture, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, email: riabchynskyi@tutamail.com, https://orcid.org/0009-0001-1980-9761

Chuhu Mykhailo – PhD student, Department of Construction, Urban Economy and Architecture, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, email: ChuguM@proton.me, https://orcid.org/0009-0007-0802-9309