

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
УКРАЇНИ ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ПОГОДЖЕНО

**Директор навчально-наукового
інституту енергетики, автоматики
і енергозбереження**
(назва ННІ)

_____ **Віктор КАПЛІУН** _____
(підпис) (ПІБ)

“ ___ ” _____ 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

**Завідувач кафедри
інженерії енергосистем**

_____ **Євген АНТИПОВ** _____
(підпис) (ПІБ)

“ ___ ” _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему

**Розробка систем вентиляції споруди цивільного захисту з теплоутилізатором з
функцією накопичення теплоти**

Спеціальність

_____ **144 – «Теплоенергетика»** _____
(код і назва)

Освітня програма

_____ **Інженерія відновлювальних джерел енергії та енергоменеджмент** _____
(назва)

Орієнтація освітньої

програми _____ **освітньо-професійна** _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

д.т.н., професор _____ **Валерій ГОРОБЕЦЬ** _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

к.т.н., доцент _____ **Євген АНТИПОВ** _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Виконав

_____ **Олександр КРАСНІКОВ** _____
(підпис) (ПІБ студента)

КИЇВ – 2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
УКРАЇНИ ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем

К.Т.Н., доцент АНТИПОВ Є.О.
(підпис)

« _____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Краснікову Олександрю Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність

144 «Теплоенергетика»

(код і назва)

Освітня програма

Інженерія відновлювальних джерел енергії та енергоменеджмент

(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи «Розробка систем вентиляції споруди цивільного захисту з теплоутилізатором з функцією накопичення теплоти»

затверджена наказом проректора НУБіП України від “ 18 ” 11 2024 р.№ 2060 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру _____

14.11.2025 р.

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: Технічна документація, нормативно – правова література.

1. Перелік питань, що підлягають дослідженню:
2. Аналіз існуючого стану систем вентиляції у спорудах цивільного захисту.
3. Нормативні вимоги до параметрів мікроклімату та повітрообміну в укриттях.
4. Принципи роботи систем вентиляції з рекуперацією та акумулюванням теплоти.
5. Розробка та розрахунок вентиляційної системи укриття з теплоутилізатором.
6. Техніко-економічне обґрунтування впровадження енергоефективної системи вентиляції.

Перелік графічного матеріалу (за потреби)

Дата видачі завдання “ 19 ” листопада 2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____

(підпис)

Антипов Є. О.

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____

(підпис)

Красніков О. С.

(прізвище та ініціали студента)

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота: пояснювальна записка – 90 сторінок, 2 таблиці, 6 рисунків, 34 джерела.

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена розробці та обґрунтуванню енергоефективної системи вентиляції споруди цивільного захисту з використанням теплоутилізатора та функції накопичення теплоти.

У першому розділі виконано аналіз сучасного стану вентиляційних систем у спорудах цивільного захисту. Розглянуто класифікацію та призначення захисних споруд, основні вимоги до параметрів мікроклімату та повітрообміну, а також чинну нормативно-правову базу проектування. Проаналізовано основні проблеми енергоефективності традиційних вентиляційних систем укриттів.

У другому розділі досліджено системи вентиляції, їх функціональне призначення, класифікацію та конструктивні особливості. Наведено аналіз основних типів вентиляційних установок, зокрема приточних, витяжних, припливно-витяжних і фільтровентиляційних систем. Окрему увагу приділено спеціалізованим вентиляційним системам для споруд цивільного захисту та огляду сучасного ринку виробників вентиляційного обладнання.

У третьому розділі розглянуто теоретичні основи теплоутилізації та акумулювання теплоти у вентиляційних системах. Проаналізовано принципи рекуперації теплоти, типи теплоутилізаторів і їх характеристики, а також методи накопичення теплової енергії. Наведено математичну модель теплового балансу вентиляційної системи та оцінено ефективність використання утилізованої теплоти.

У четвертому розділі наведено характеристику об'єкта дослідження — споруди цивільного захисту підвального типу. Описано геометричні параметри, конструктивні особливості приміщення, схему руху повітря та розміщення вентиляційних каналів. Визначено місткість споруди, умови перебування людей, режими вентиляції та потребу у застосуванні теплоутилізаційних технологій.

У п'ятому розділі виконано розрахункову частину системи вентиляції укриття з теплоутилізатором. Проведено розрахунок параметрів мікроклімату при повній та неповній посадці людей у зимовий і літній періоди. Визначено необхідну витрату повітря, теплові навантаження, ефективність рекуперації теплоти, а також доведено можливість зменшення потреби в додатковому догріві припливного повітря.

У шостому розділі виконано економічне обґрунтування впровадження системи вентиляції з теплоутилізатором. Розраховано капітальні витрати на обладнання та монтаж, річні витрати електроенергії, економію теплової енергії за рахунок рекуперації та чистий річний економічний ефект. Визначено доцільність впровадження проектного рішення з урахуванням режимів роботи споруди.

У висновках узагальнено результати теоретичних і розрахункових досліджень, підтверджено ефективність застосування теплоутилізатора з функцією накопичення теплоти у системі вентиляції споруди цивільного захисту та обґрунтовано доцільність впровадження запропонованих технічних рішень.

Ключові слова: споруда цивільного захисту, вентиляція, теплоутилізація, рекуперація теплоти, акумулювання теплоти, мікроклімат, енергоефективність, вентиляційна установка, економічне обґрунтування.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВЕНТИЛЯЦІЇ В СПОРУДАХ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ.....	14
1.1. Класифікація та призначення споруд цивільного захисту.....	14
1.2. Вимоги до мікроклімату та повітрообміну.....	14
1.3. Сучасні системи вентиляції у спорудах цивільного захисту.....	15
1.4. Нормативно-правова база проектування.....	15
1.5. Аналіз проблем енергоефективності.....	16
Висновки до розділу 1.....	16
РОЗДІЛ 2. СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ: КЛАСИФІКАЦІЯ, ФУНКЦІОНАЛЬНЕ ПРИЗНАЧЕННЯ, КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА СПЕЦІАЛІЗОВАНІ СИСТЕМИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ	18
2.1. Функціональна роль та актуальність систем вентиляції	18
2.2. Класифікаційний аналіз вентиляційних установок	19
2.3. Аналіз ключових типів вентиляційних установок та їх технологічних особливостей	21
2.4. Огляд ринку виробників та їх спеціалізації	22
2.5. Специфіка вентиляційних систем для споруд цивільного захисту	23
Висновки до розділу 2	24
РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЇ ТА НАКОПИЧЕННЯ ТЕПЛОТИ	25
3.1. Основні принципи рекуперації теплоти.....	25
3.2. Типи теплоутилізаторів та їх характеристика.....	25
3.3. Принципи акумулювання теплоти.....	27
3.4. Математична модель теплового балансу системи вентиляції.....	28
3.5. Оцінка ефективності використання теплоти у вентиляційній	

системі.....	28
3.6. Технічні рішення щодо поєднання рекуперації й акумулювання.....	29
3.7. Автоматизація та керування процесами теплообміну	29
Висновки до розділу 3	29
РОЗДІЛ 4. ХАРАКТЕРИСТИКА ТА ОПИС ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	31
4.1. Загальна характеристика об'єкта	31
4.2. Геометричні параметри та планувальні особливості	32
4.3. Конструкція приміщення та матеріали	32
4.4. Схема руху повітря та розміщення вентиляційних каналів	33
4.5. Місткість споруди та умови перебування	33
4.6. Вентиляційні режими та система повітрообміну	34
4.7. Енергозабезпечення та автономність	34
4.8. Потреба в теплоутилізації та обґрунтування дослідження	34
Висновки до розділу 4	35
РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА: ВЕНТИЛЯЦІЯ УКРИТТЯ З ТЕПЛОУТИЛІЗАТОРОМ	36
5.1. Розрахунок параметрів мікроклімату при повній посадці людей в зимовий період	36
5.2. Розрахунок параметрів мікроклімату при повній посадці людей в літній період	47
5.3. Розрахунок параметрів мікроклімату при неповній посадці людей в зимовий період	55
5.4. Розрахунок параметрів мікроклімату при неповній посадці людей в літній період	65
Висновки до розділу 5	77
РОЗДІЛ 6. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ З ТЕПЛОУТИЛІЗАТОРОМ.....	79
6.1. Вихідні дані та умови експлуатації	79

6.2. Капітальні витрати (CAPEX)	79
6.3. Річні витрати електроенергії вентиляційних установок	80
6.4. Визначення годин роботи системи	80
6.5. Розрахунок економії енергії від рекуперації	80
6.6. Економія на охолодженні	81
6.7. Річні витрати на електроенергію вентиляторів	82
6.8. Чистий річний економічний ефект	83
6.9. Термін окупності проекту	83
6.10. Капітальні витрати (CAPEX) на впровадження системи.....	84
6.11. Строк окупності.....	85
Висновки до розділу 6	85
ВИСНОВКИ	87
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	89

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

q_i — питоме теплове навантаження, Вт/м²;

Q — теплова потужність, Вт;

Q_0 — теплова потужність для підігріву припливного повітря без рекуперації, Вт;

$Q_{\text{догр}}$ — теплова потужність догріву припливного повітря, Вт;

$Q_{\text{утил}}$ — утилізована теплова потужність, Вт;

F_i — площа поверхні, м²;

S — площа приміщення, м²;

V — об'єм приміщення, м³;

L — витрата повітря, м³/год або м³/с;

\dot{m} — масова витрата повітря, кг/с;

ρ — густина повітря, кг/м³;

c_p — питома теплоємність повітря, Дж/(кг·К);

$t_{\text{вн}}$ — температура внутрішнього повітря, °С;

$t_{\text{зовн}}$ — температура зовнішнього повітря, °С;

$t_{\text{прип}}$ — температура припливного повітря, °С;

ΔT — різниця температур, К;

η — коефіцієнт теплової ефективності рекуператора;

N — кількість людей у приміщенні, осіб;

a — питома виділення CO₂ однією людиною, м³/год·особу;

C_0 — концентрація CO₂ у зовнішньому повітрі, м³/м³;

C_{max} — гранично допустима концентрація CO₂, м³/м³;

ACH — кратність повітрообміну, год⁻¹;

Δp — втрати тиску у вентиляційній мережі, Па;

$P_{\text{вент}}$ — електрична потужність вентилятора, Вт;

E — споживання електричної енергії, кВт·год;

$C_{\text{ел}}$ — вартість електричної енергії, грн/кВт·год;

$T_{\text{ок}}$ — термін окупності проекту, років.

Скорочення:

СЦЗ — споруда цивільного захисту;

ПВУ — припливно-витяжна установка;

ФВУ — фільтровентиляційна установка;

ККД — коефіцієнт корисної дії;

CO₂ — вуглекислий газ;

CAPEX — капітальні витрати;

OPEX — експлуатаційні витрати;

PCM — фазозмінні матеріали (Phase Change Materials);

ДБН — державні будівельні норми;

ДСТУ — державний стандарт України;

Терміни:

Рекуперація теплоти — процес передачі теплової енергії від витяжного повітря до припливного без їх змішування.

Теплоутилізатор — теплообмінний пристрій, призначений для відбору та повторного використання теплоти відпрацьованого повітря.

Акумуляування теплоти — накопичення теплової енергії з метою її подальшого використання для стабілізації температурного режиму.

Фільтровентиляція — режим вентиляції із очищенням повітря від шкідливих, радіоактивних та хімічних домішок.

Режим повної ізоляції — режим роботи вентиляційної системи без забору зовнішнього повітря з використанням регенерації газового складу.

ВСТУП

Актуальність: Сучасні виклики у сфері цивільного захисту України, зумовлені зростанням техногенних та воєнних загроз, обумовлюють необхідність удосконалення інженерного забезпечення захисних споруд різного призначення. Особливу роль у забезпеченні безпеки та життєдіяльності населення під час надзвичайних ситуацій відіграють споруди цивільного захисту, які повинні гарантувати належні санітарно-гігієнічні та мікрокліматичні умови перебування людей протягом тривалого часу.

Однією з ключових інженерних систем, без якої неможливе повноцінне функціонування укриттів, є система вентиляції. Вона забезпечує подачу необхідної кількості свіжого повітря, видалення вуглекислого газу та інших шкідливих продуктів життєдіяльності людини, регулювання температури і вологості, а також очищення повітря від пилу, аерозолів і небезпечних домішок. Недостатня ефективність вентиляції може призвести до погіршення самопочуття людей, зниження працездатності та створення потенційно небезпечних умов перебування в замкненому просторі.

Особливістю систем вентиляції споруд цивільного захисту є їх автономний режим роботи. У більшості випадків такі об'єкти повинні функціонувати незалежно від зовнішніх інженерних мереж або з мінімальним енергоспоживанням, що особливо актуально в умовах можливих перебоїв електропостачання. У зв'язку з цим питання енергоефективності вентиляційних систем набуває вирішального значення та потребує застосування сучасних технічних рішень, спрямованих на зменшення теплових і електричних витрат.

Одним із найбільш ефективних напрямів підвищення енергоефективності вентиляційних систем є використання теплоутилізаторів, які дозволяють повторно використовувати теплову енергію витяжного повітря для підігріву припливного потоку. Застосування рекуперації теплоти дає змогу суттєво знизити теплове навантаження на систему опалення в зимовий період та зменшити потребу в охолодженні повітря в літній період. Додаткове

впровадження функції акумулювання теплоти сприяє стабілізації температурного режиму приміщень, підвищенню надійності роботи системи та зменшенню пікових навантажень на джерела енергії.

Актуальність теми даної магістерської роботи зумовлена необхідністю поєднання вимог безпеки, надійності та енергоефективності при проектуванні вентиляційних систем укриттів. Застосування сучасних припливно-витяжних установок з теплоутилізаторами та системами накопичення теплоти дозволяє не лише забезпечити нормативні параметри мікроклімату, але й досягти значного зниження експлуатаційних витрат, що має важливе значення для об'єктів з тривалим або періодичним режимом використання.

Мета роботи — розробка енергоефективної системи вентиляції споруди цивільного захисту, оснащеної теплоутилізатором з функцією накопичення теплоти, яка забезпечить оптимальні параметри мікроклімату в різних режимах експлуатації та сприятиме зниженню загальних енерговитрат на вентиляцію і кондиціювання повітря.

Для досягнення поставленої мети в магістерській роботі необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Проаналізувати сучасний стан та нормативні вимоги до систем вентиляції споруд цивільного захисту в Україні.
2. Охарактеризувати об'єкт дослідження — споруду цивільного захисту підвального типу, її планувальні, конструктивні та експлуатаційні особливості.
3. Дослідити принципи роботи систем вентиляції з рекуперацією теплоти та акумулюванням теплової енергії, визначити їх переваги й обмеження.
4. Розробити тепловий і повітряний баланс вентиляційної системи укриття з урахуванням різних режимів роботи та заповненості приміщення.
5. Виконати розрахунок параметрів мікроклімату укриття в зимовий, літній та міжсезонний періоди з використанням припливно-витяжних установок з теплоутилізатором.

Провести техніко-економічне обґрунтування впровадження системи вентиляції з рекуперацією теплоти та визначити показники енергоефективності і строк окупності проекту.

Об'єкт - Система вентиляції споруди цивільного захисту з теплоутилізатором з функцією накопичення теплоти.

Предмет - процеси тепло і масопереносу в системі.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВЕНТИЛЯЦІЇ В СПОРУДАХ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ

1.1. Класифікація та призначення споруд цивільного захисту

Споруди цивільного захисту (СЦЗ) — це спеціально спроектовані будівлі або приміщення, призначені для захисту населення від впливу небезпечних факторів, що виникають унаслідок надзвичайних ситуацій військового чи техногенного характеру. До таких об'єктів належать:

- сховища (герметичні укриття, здатні забезпечувати повний захист);
- протирадіаційні укриття;
- найпростіші укриття (підвали, підземні стоянки, підземні переходи).

Основні вимоги до таких споруд визначені у ДБН В.2.2-5:2023 «Будинки і споруди. Споруди цивільного захисту» та ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010.

Вентиляційні системи мають забезпечувати підтримку допустимого рівня вмісту кисню, температури та вологості, а також очищення повітря від шкідливих домішок, пилу й аерозолів.

1.2. Вимоги до мікроклімату та повітрообміну

Умови мікроклімату в укриттях регламентуються санітарними нормами. Оптимальні параметри:

- температура повітря: +18...+22°C;
- відносна вологість: 40–65%;
- вміст CO₂ не більше 0,1% (1000 ppm);
- мінімальний повітрообмін — 10–15 м³/год на людину.

При цьому споруди повинні функціонувати в трьох режимах:

1. Режим чистої вентиляції — для нормальних умов;

2. Режим фільтровентиляції — при наявності шкідливих домішок у зовнішньому повітрі;

3. Режим ізоляції — при радіаційному чи хімічному зараженні атмосфери.

Під час роботи у фільтровентиляційному режимі особливе значення має якість фільтрації та герметичність повітропроводів.

1.3. Сучасні системи вентиляції у спорудах цивільного захисту

Системи вентиляції поділяються на:

- природні — використовують різницю температур і тиску, прості у конструкції, але малоефективні;
- механічні (примусові) — забезпечують стабільний повітрообмін незалежно від зовнішніх умов;
- комбіновані — поєднують обидва принципи.

Типова система включає:

- припливний вентилятор із фільтраційно-поглинальними коробками;
- витяжний канал із клапанами зворотного тиску;
- ручні або електричні приводи;
- резервне живлення (акумулятори, дизель-генератор).

Недоліком більшості існуючих систем є високі енергетичні втрати — тепло видаляється разом із відпрацьованим повітрям, що знижує ефективність і створює потребу у додатковому підігріві припливного потоку.

1.4. Нормативно-правова база проєктування

Основними нормативними документами, які регулюють проєктування систем вентиляції для споруд цивільного захисту, є:

- ДБН В.2.2-5:2023 «Споруди цивільного захисту»;
- ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування»;

- ДСТУ EN 16798-1:2020 «Енергетична ефективність будівель»;
- ДСТУ ISO 16890:2021 — стандарти фільтрації повітря;
- СНиП 2.04.05-91 — системи опалення, вентиляції та кондиціонування.

Ці документи визначають вимоги до кратності повітрообміну, температурних режимів, рівня шуму, герметичності та енергоефективності.

1.5. Аналіз проблем енергоефективності

Проблема енергоефективності вентиляційних систем у СЦЗ полягає у значних втратах теплоти. У зимовий період повітря, що видаляється з приміщення, має температуру 20–25°C, тоді як зовнішнє — може бути нижче 0°C. У результаті відбувається до 70% втрат теплової енергії.

Рішенням є використання теплоутилізаторів — рекуператорів або регенераторів, які передають частину теплоти витяжного повітря припливному потоку. Додатково, акумулювання теплоти у теплоємних матеріалах або фазозмінних речовинах дозволяє зберігати тепло навіть при перервах у роботі системи.

Таким чином, впровадження систем рекуперації з елементами збереження теплоти є актуальним напрямом підвищення автономності споруд цивільного захисту.

Висновки до розділу 1

На підставі проведеного аналізу можна зробити висновок, що системи вентиляції споруд цивільного захисту є критично важливим елементом життєзабезпечення, від якого безпосередньо залежить безпека людей. Суворі вимоги до мікроклімату та необхідність функціонування в трьох різних режимах обумовлюють структурну складність цих систем. Основним недоліком традиційних рішень є їхня низька енергоефективність, що проявляється у значних теплових втратах під час опалювального періоду.

Впровадження рекуперації тепла визначається як ключовий напрям підвищення енергетичної автономності укріттів. Інтеграція теплоутилізуючих пристроїв дозволяє істотно зменшити енерговитрати на підігрів припливного повітря без порушення нормативних параметрів мікроклімату. Таким чином, подальший розвиток вентиляційних систем для споруд цивільного захисту має бути спрямований на поєднання надійності, функціональності та енергоефективності.

РОЗДІЛ 2

СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ: КЛАСИФІКАЦІЯ, ФУНКЦІОНАЛЬНЕ ПРИЗНАЧЕННЯ, КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА СПЕЦІАЛІЗОВАНІ СИСТЕМИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ

2.1. Функціональна роль та актуальність систем вентиляції

Сучасні системи вентиляції є невід'ємним елементом інженерного обладнання будівель, основним призначенням якого є підтримання нормованих параметрів мікроклімату та безпеки середовища. Їх функціонал виходить за межі простого повітрообміну та включає комплекс завдань:

- Нормалізація газового, хімічного та аерозольного складу повітряного середовища.
- Термогідрометричне регулювання (стабілізація температури та відносної вологості).
- Евакуація надлишкових теплових потоків, шкідливих речовин та аеробіологічних забруднень.
- Забезпечення санітарно-гігієнічних та безпечних умов для перебування людей.
- Підвищення енергоефективності будівельного об'єкту шляхом утилізації (рекуперації) теплової енергії.

Особлива роль відводиться вентиляційним системам у спеціалізованих спорудах цивільного захисту (СЦЗ), де вони переходять у розряд систем життєзабезпечення, забезпечуючи фільтрацію повітря від специфічних забруднень та автономність функціонування в умовах надзвичайних ситуацій.

2.2. Класифікаційний аналіз вентиляційних установок

2.2.1. Класифікація за принципом організації повітрообміну. Системи з природним (гравітаційним) спонуканням: Використовують природні фізичні

фактори – різницю густини теплого та холодного повітря (тепловий напір) та вітровий тиск. Характеризуються енергонезалежністю, але мають суттєві недоліки: нестабільність та неможливість точного регулювання параметрів мікроклімату.

- Системи з механічним (штучним) спонуканням: Переміщення повітряних мас здійснюється вентиляторами. Це дозволяє забезпечити стабільність, транспортувати повітря на значні відстані, а також реалізувати складні технологічні процеси: очищення, нагрівання, охолодження, осушення/зволоження та рекуперацію тепла.



Рис. 2.1. Класифікація вентиляційних установок

2.2.2. Класифікація за функціонально-технологічним призначенням.

Приточні установки: Призначені для подачі підготовленого (очищеного, нагрітого/охолодженого) зовнішнього повітря. Типова комплектація включає вентилятор, фільтраційні секції, калорифер (електричний або водяний) та шумоглушник.

- **Витяжні установки:** Забезпечують видалення забруднених повітряних мас з локальних зон (технологічне обладнання, санітарні приміщення, зони виділення шкідливостей).

- Приточно-витяжні установки (ПВУ): Найбільш ефективні та збалансовані системи, що одночасно організують контрольовану подачу та видалення повітря. Для мінімізації енерговитрат часто інтегруються з рекуператорами.

- Вентиляційні установки з рекуперацією теплоти: Використовують теплообмінні апарати (пластинчасті, роторні, гліколеві) для передачі теплової енергії від витяжного потоку до приточного. Коефіцієнт відновлення теплоти (КВТ) може сягати 60–92%.

- Фільтровентиляційні установки (ФВУ): Спеціалізовані системи для захисту від специфічних загроз. Забезпечують багатоступінчасте очищення повітря від радіоактивного пилу, отруйних речовин, біологічних аерозолів за допомогою фільтрів тонкого очищення (F7-F9) та сорбційно-поглинальних касет на основі активованого вугілля.

- Вентиляційні установки спеціального призначення: Розроблені для об'єктів з підвищеними вимогами: медичні заклади (НЕРА-фільтрація), «чисті приміщення» фармацевтичної та мікроелектронної промисловості, харчові виробництва.

2.2.3. Класифікація за конструктивним виконанням та компоновкою.

Моноблочні установки: Усі функціональні елементи інтегровані в єдиний звукоізолюваний корпус. Переваги: мінімізація монтажних робіт, забезпечення високої герметичності та оптимізації характеристик на заводському етапі.

- Модульні (збірні) установки: Формуються з окремих типорозмірних секцій, що дозволяє гнучко компоувати систему під конкретні технічні вимоги об'єкта.

- Підвісні (компактні) установки: Для об'єктів з обмеженим простором (квартири, малі офіси).

- Покрівельні установки: Монтуються на покритті будівель, забезпечують вентиляцію великих об'ємів.

- Канальні установки: Вбудовуються в мережу повітроводів, призначені для локальної реалізації окремих функцій (нагрівання, фільтрації).

2.3. Аналіз ключових типів вентиляційних установок та їх технологічних особливостей

2.3.1. Приточні установки. Сфера застосування охоплює об'єкти, де необхідно компенсувати видалені об'єми повітря або організувати позитивний дисбаланс для запобігання інфільтрації забрудненого повітря (школи, офіси, виробничі цехи). Ключовим елементом є калорифер, розрахований на нагрівання зовнішнього повітря в зимовий період.

2.3.2. Приточно-витяжні установки з рекуперацією тепла. Приточно-витяжні установки з рекуперацією тепла є стандартом енергоефективності для сучасних громадських та житлових будівель (рис. 2.2.).

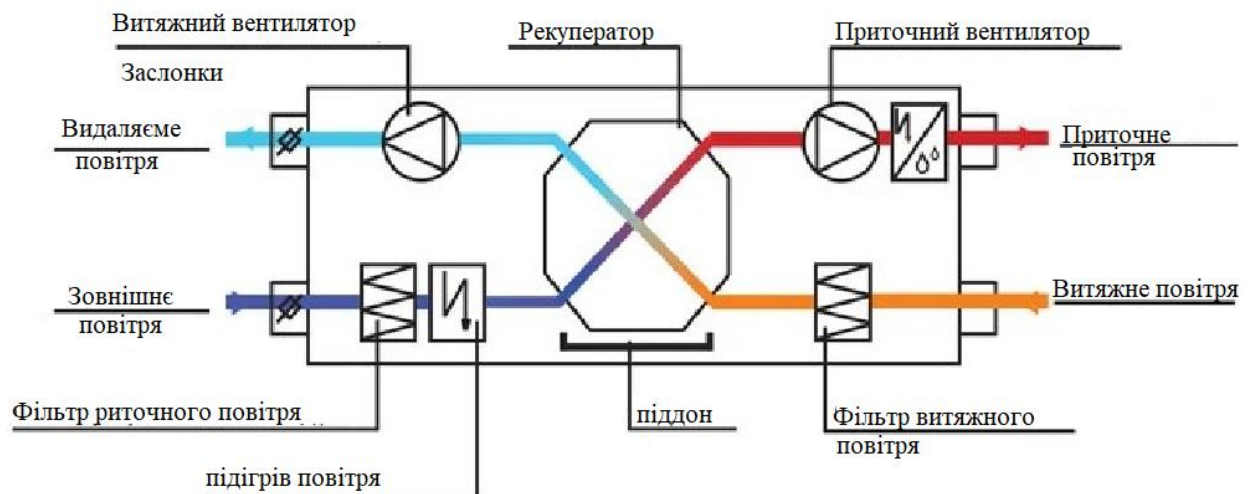


Рис. 2.2. Схема приточно-витяжної установки з рекуперацією тепла

Вибір типу рекуператора визначається техніко-економічним обґрунтуванням:

- Пластинчасті: Прості, енергонезалежні, вискоєфективні (до 85%), але можливе обмерзання.
- Роторні: Максимальний КВТ (до 92%), можливість рекуперації вологи, вища вартість.
- Гліколеві (з проміжним теплоносієм): Дозволяють розносити приточний та витяжний блоки, але мають нижчу ефективність.

2.3.3. Фільтровентиляційні установки (ФВУ). Це складні інженерні комплекси, що функціонують за принципом багатоступінчастої фільтрації. Технологічний ланцюг включає: фільтр попереднього очищення → фільтр тонкого очищення → сорбційний фільтр. Встановлюються на об'єктах критичної інфраструктури: СЦЗ, центри обробки даних (ЦОД), спеціальні лабораторії.

2.3.4. Установки регенерації повітря для режиму повної ізоляції. Використовуються виключно в спорудах цивільного захисту для підтримання життєдіяльності в умовах неможливості подачі зовнішнього повітря. Пристрої типу РП-100, ПП-5М здійснюють хімічне поглинання вуглекислого газу (CO₂) за рахунок реактивів (натронне вапно, надоксид калію) та компенсують витрати кисню, забезпечуючи автономність до 6 годин.

2.4. Огляд ринку виробників та їх спеціалізації

2.4.1. Вітчизняний ринок. VENTS (Україна): Лідер з масового виробництва побутового та напівпромислового обладнання.

- ОВЕН / «Вентиляційні системи України»: Спеціалізація на промислових системах для складних умов експлуатації.

- Спеціалізовані КБ: Розробка та виробництво ФВУ, клапанів надлишкового тиску та регенераторів повітря для потреб цивільного захисту.

2.4.2. Європейський ринок.

- Systemair (Швеція): Широкий спектр рішень, включаючи системи для «чистих приміщень».

- Maico (Німеччина): Орієнтація на високоякісні та малошумні системи комфортної вентиляції.

- Komfovent (Литва): Лідерство в галузі вискоефективних рекуперативних технологій.

- Wolf (Німеччина): Промислові модульні системи для складних технологічних процесів.

2.4.3. Виробники обладнання для цивільного захисту. Міжнародні компанії (на прикладі Switzerland LUWA) та спеціалізовані вітчизняні підприємства пропонують високонадійні фільтровентиляційні комплекси, що відповідають вимогам військових стандартів.

2.5. Специфіка вентиляційних систем для споруд цивільного захисту

Для СЦЗ характерна триєдина структура режимів функціонування вентиляції:

1. Черговий режим: Забезпечення базового повітрообміну (20–30 м³/год на людину).
2. Режим фільтровентиляції (ФВ): Активується при загрозі або факті хімічного, радіаційного, біологічного зараження атмосфери.
3. Режим повної ізоляції (регенерації): Автономна робота із закритим зовнішнім контуром.

Конструктивно такі системи обов'язково включають: фільтри високого класу, систему створення та підтримки надлишкового тиску, клапани герметизації, резервне електроживлення та механізми ручного приводу.

Висновки до розділу 2

Проведений аналіз демонструє, що сучасні вентиляційні установки являють собою диференційований за призначенням, конструкцією та ефективністю комплекс технічних рішень. Від простих систем комфортної вентиляції з рекуперацією вони еволюціонують до складних інженерних комплексів безпекового призначення. Для споруд цивільного захисту вентиляція стає критично важливою системою життєзабезпечення, що вимагає реалізації трьох режимів роботи, забезпечення максимальної надійності, автономності та здатності протидіяти специфічним загрозам, що формує окремий напрям для наукових досліджень та технічних розробок.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЇ ТА НАКОПИЧЕННЯ ТЕПЛОТИ

3.1. Основні принципи рекуперації теплоти

Рекуперація теплоти — це процес передачі теплової енергії від витяжного повітря до припливного без їх змішування. Принцип роботи заснований на теплопередачі через теплообмінну поверхню.

Основні типи теплообмінників, що застосовуються у вентиляційних системах:

- пластинчасті рекуператори (алюмінієві або полімерні);
- роторні рекуператори;
- трубчасті теплообмінники;
- рекуператори з проміжним теплоносієм (водяні або гліколеві контури).

Коефіцієнт теплової ефективності рекуператора (η) визначається як:

$$\eta = \frac{t_{\text{п}} - t_3}{t_{\text{в}} - t_3} \times 100\%, \quad (3.1)$$

де: $t_{\text{п}}$ — температура припливного повітря після рекуператора, °С; t_3 — температура зовнішнього повітря, °С; $t_{\text{в}}$ — температура витяжного повітря, °С.

Для якісних систем η досягає 70–90%, що дозволяє значно скоротити тепловтрати будівлі.

3.2. Типи теплоутилізаторів та їх характеристика

1. Пластинчасті рекуператори (рис. 3.3.)

Працюють за принципом проходження потоків повітря через канали, розділені металевими пластинами. Їх переваги — простота конструкції,

відсутність рухомих елементів, низькі експлуатаційні витрати. Недолік — можливість обмерзання при низьких температурах.

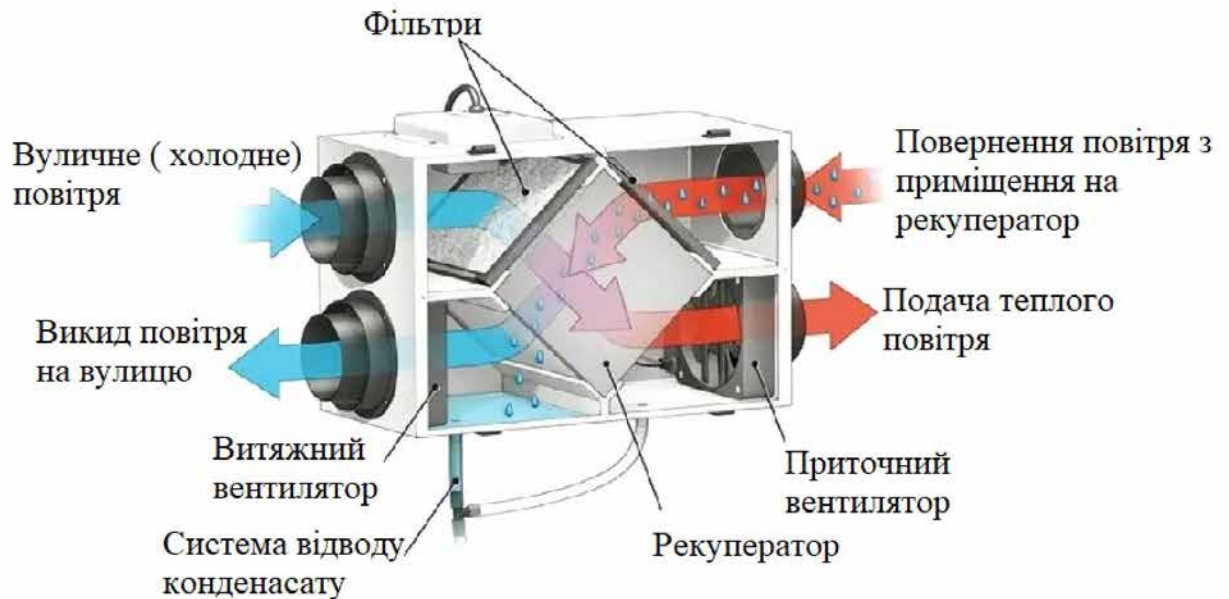


Рис. 3.1. Схема пластинчастого рекуператора

2. Роторні рекуператори (рис. 3.2.)

Складаються з обертового барабана з гофрованого алюмінію, який по черзі контактує з припливним і витяжним повітрям. Ефективність сягає 80–85%, при цьому частково передається й волога. Недолік — складніша конструкція та потреба в електроживленні.

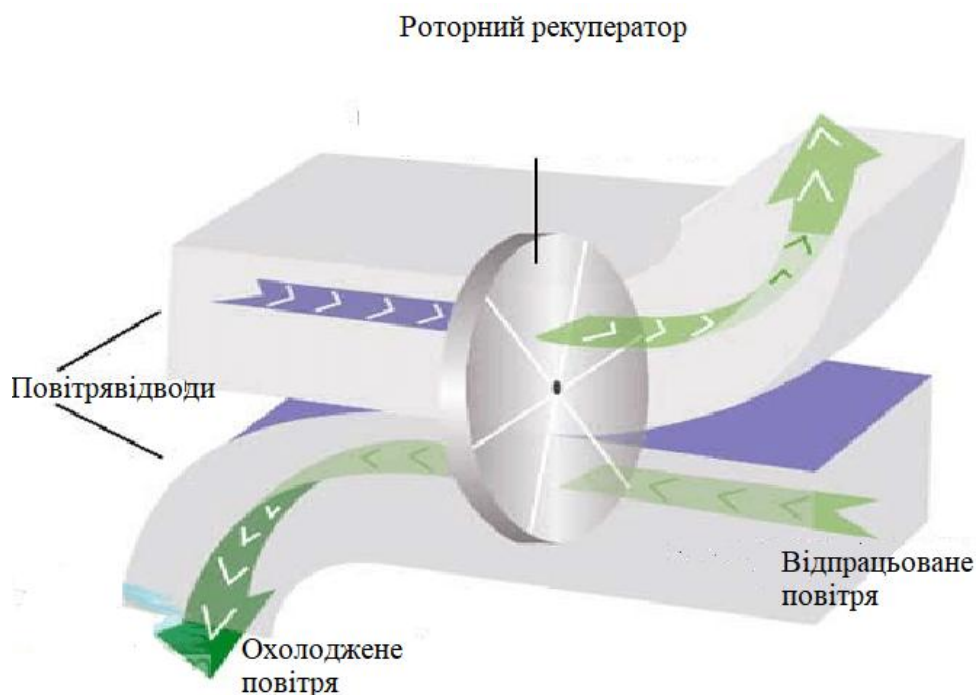


Рис. 3.2. Принципова схема роторного рекуператора

3. Регенератори з проміжним теплоносієм

У таких системах теплота передається через рідинне коло (вода, етиєнґліколь). Вони гнучкі в монтажі, проте мають нижчу ефективність (~60%).

4. Теплообмінники з фазозмінними матеріалами (PCM)

Використовують речовини, які при зміні агрегатного стану акумулюють або віддають тепло. Це дає змогу зберігати надлишкову теплову енергію навіть за зупинки системи.

3.3. Принципи акумулювання теплоти

Акумулювання теплоти — це процес накопичення енергії з подальшим використанням для стабілізації температурних режимів. Основні методи:

- чуттєве акумулювання (теплоємність води, каменю, бетону);
- фазове акумулювання (PCM — парафіни, солі гідратів);
- хімічне акумулювання (реакції поглинання або десорбції теплоти).

У системах вентиляції споруд цивільного захисту доцільно використовувати чуттєве або фазове акумулювання, адже вони не вимагають складного обладнання.

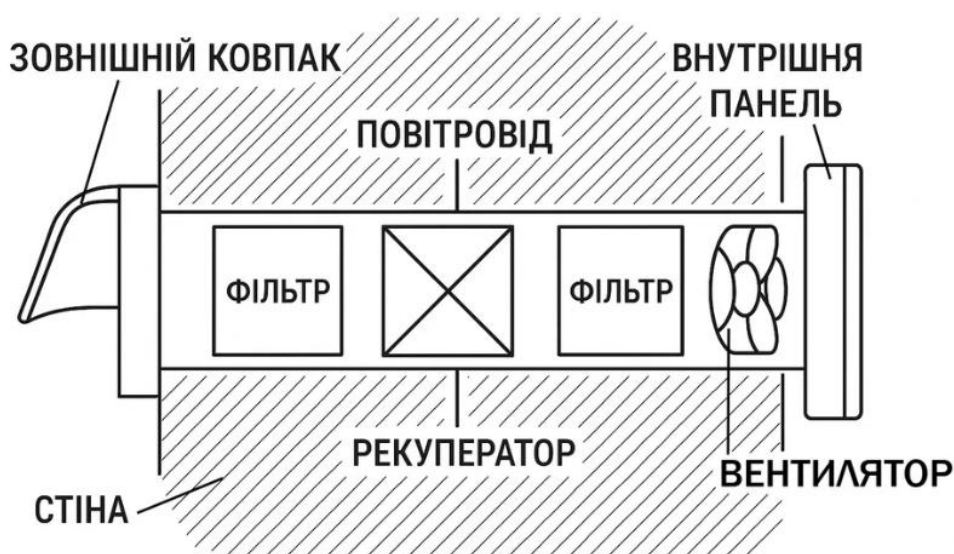


Рис. 3.3. Принципова схема рекуператора в системі

3.4. Математична модель теплового балансу системи вентиляції

Загальний тепловий баланс системи з утилізацією теплоти описується рівнянням:

$$Q_{\text{ут}} = \dot{m}c_p(t_{\text{в}} - t_{\text{з}})\eta,$$

де: $Q_{\text{ут}}$ — утилізована теплота, Вт; \dot{m} — масова витрата повітря, кг/с; c_p — теплоємність повітря (≈ 1005 Дж/кг·К); η — ефективність рекуператора.

У випадку наявності акумулятора теплоти з ємністю C_a , процес описується диференціальним рівнянням:

$$C_a \frac{dT_a}{dt} = Q_{\text{ут}} - Q_{\text{спр}},$$

де $Q_{\text{спр}}$ — витрати тепла на підтримання мікроклімату.

Розв'язання цього рівняння дозволяє оцінити динаміку нагріву/охолодження акумулятора та тривалість автономної роботи системи.

3.5. Оцінка ефективності використання теплоти у вентиляційній системі

Ефективність системи визначається коефіцієнтом енергозбереження:

$$E = \frac{Q_{\text{ут}}}{Q_{\text{заг}}} \times 100\%,$$

де $Q_{\text{заг}}$ — загальні теплові втрати будівлі без рекуперації.

Для споруд цивільного захисту, обладнаних теплоутилізатором і акумулятором, цей коефіцієнт може сягати 65–75%, що зменшує потребу у додатковому обігріві на 30–40%.

3.6. Технічні рішення щодо поєднання рекуперації й акумулявання

Комбінація рекуператора з теплоакумуляційним модулем дозволяє:

- підтримувати сталу температуру припливного повітря навіть при коливаннях зовнішньої;
- зберігати надлишкове тепло при відключенні енергопостачання;
- забезпечити плавне регулювання теплового режиму.

Типова схема включає:

1. Рекуператор пластинчастого типу.
2. Ємність-акумулятор (наприклад, резервуар з водою або РСМ-блок).
3. Циркуляційний контур із теплоносієм.
4. Автоматизований контролер температури.

3.7. Автоматизація та керування процесами теплообміну

Для забезпечення стабільності мікроклімату система повинна бути оснащена:

- датчиками температури, вологості, тиску CO₂;
- сервоприводами для регулювання повітряних клапанів;
- електронним контролером, який керує роботою вентиляторів і насосів;
- аварійним режимом роботи (перехід на акумуляційне живлення).

Інтелектуальне керування дозволяє мінімізувати енергоспоживання, адаптуючи інтенсивність вентиляції до реального навантаження (кількості людей, температури, часу доби).

Висновки до розділу 3

Теоретичне дослідження підтверджує, що теплоутилізатори є ключовим рішенням для підвищення ефективності вентиляції споруд цивільного захисту. Їх основна перевага полягає у зменшенні енерговитрат на 65-75% за рахунок повторного використання тепла від повітря, що видаляється. Для споруд цивільного захисту це забезпечує критично важливу стабільність температури припливного повітря навіть за різких зовнішніх умов. Поєднання рекуператорів з системами акумулювання теплоти дозволяє продовжити автономну роботу вентиляції під час перерв у електропостачанні. Таким чином, теплоутилізатори безпосередньо підвищують надійність та енергетичну незалежність систем життєзабезпечення захисних споруд.

РОЗДІЛ 4

ХАРАКТЕРИСТИКА ТА ОПИС ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1. Загальна характеристика об'єкта

Об'єктом дослідження є споруда цивільного захисту підвального типу, розташована під будівлею громадського призначення. Приміщення призначене для короткочасного та тривалого перебування людей у період надзвичайних ситуацій, зокрема хімічного, біологічного, радіаційного чи вибухового характеру. Конструкція СЦЗ відповідає вимогам ДБН В.2.2-5:2023 та загальним нормам проектування захисних споруд.

Споруда має лінійну (галерейну) конфігурацію, складається з одного основного довгого приміщення з двома окремими входами/виходами, обладнаними захисно-герметичними дверима та тамбурами (рис.4.1.). Внутрішній простір призначений для розміщення людей, вентиляційного обладнання та інженерних комунікацій.



Рис. 4.1. Основний коридор підвального приміщення

4.2. Геометричні параметри та планувальні особливості

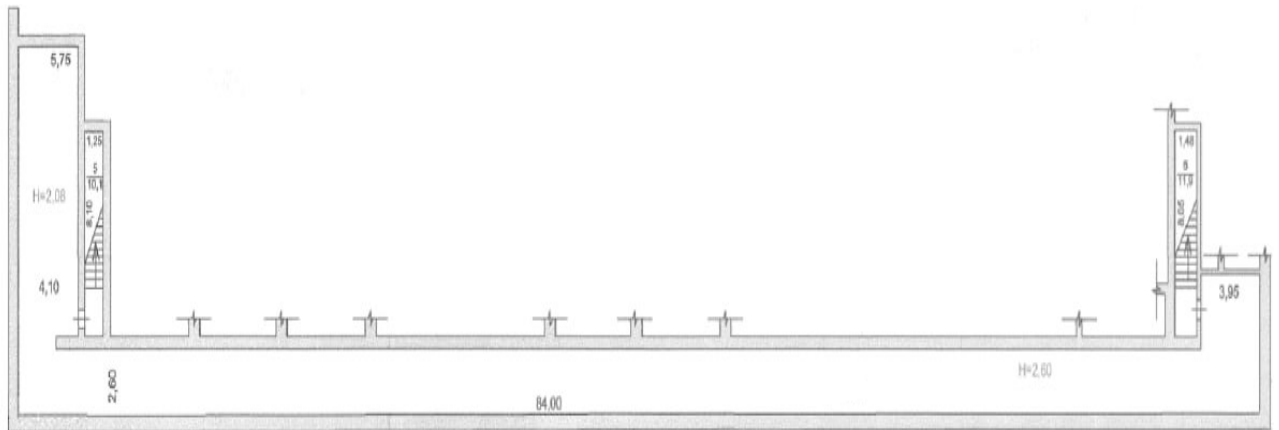


Рис. 4.2. Креслення підвального приміщення

На основі наданого креслення поздовжнього перерізу (рис. 4.2.) визначено такі основні геометричні величини:

- Загальна довжина укриття: 84,00 м
- Ширина коридорної частини: $\approx 2,60$ м
- Корисна внутрішня висота основного приміщення: $H = 2,60$ м
- Висота тамбурної частини: $H = 2,08$ м
- Глибина закладення 2,0–2,5 м залежно від ділянки
- Висота конструктивних сходових прямокутників: 3,95–5,75 м

З одного боку споруди передбачено вертикальний спуск із висотою 5,75 м та габаритами площадки $4,10 \times 2,00$ м. З протилежного боку — другий спуск висотою 3,95 м, що забезпечує аварійний вихід.

Такий двосторонній вихід відповідає вимогам щодо евакуації та нормам герметичного ізолювання укриття.

4.3. Конструкція приміщення та матеріали

Стіни та перекриття виконані з монолітного залізобетону, що забезпечує:

- стійкість до ударної хвилі;
- захист від уламків;

- герметичність;
- акустичну ізоляцію.

Товщина огорожувальних конструкцій становить орієнтовно 300–400 мм, що відповідає стандартам для протирадіаційних укриттів та сховищ.

Всередині передбачено:

- основний зал для людей,
- місця для сидіння,
- можливість установаження додаткових систем зберігання води та запасів,
- прокладку інженерних мереж (електрика, вентиляція, зв'язок).

4.4. Схема руху повітря та розміщення вентиляційних каналів

По довжині укриття розташовано ряд повітророзподільних патрубків, що забезпечують подачу припливного повітря вздовж усієї галереї. На кресленні їх видно як серію рівномірно розташованих вентиляційних виходів.

Система побудована за принципом:

- подача повітря — через верхню частину стіни;
- рух повітря по коридорній частині уздовж укриття;
- видалення — через витяжні канали, розміщені в верхній зоні тамбурів.

Таке рішення забезпечує:

- рівномірність параметрів мікроклімату;
- уникнення «застійних зон»;
- ефективну роботу в режимах чистої вентиляції та фільтровентиляції.

4.5. Місткість споруди та умови перебування

З урахуванням габаритів:

робочої площі $\approx 301,515 \text{ м}^2$,

укриття може вміщувати 100–500 осіб залежно від режиму:

- режим тривалого перебування: $0,75 \text{ м}^2/\text{особу}$;

- режим короткочасного укриття: 0,5 м²/особу.

4.6. Вентиляційні режими та система повітрообміну

Об'єкт підтримує три нормативні режими роботи вентиляції:

1. Режим чистої вентиляції (нормальний)

Подача зовнішнього повітря 20–30 м³/год на людину.

Використовується при відсутності загрози зараження атмосфери.

2. Режим фільтровентиляції

Подача 8–15 м³/год на людину через фільтровентиляційні установки:

ФВУ-15, ФВУ-30 або ФВП-100/200 (залежно від продуктивності).

Функції:

- очищення від пилу, аерозолів, газових домішок;
- захисна герметизація;
- створення надлишкового тиску +20...+50 Па.

4.7. Енергозабезпечення та автономність

Укриття має два рівні енергозабезпечення:

- основне електропостачання від мережі будівлі;
- резервне живлення — дизель-генератор або акумуляторна станція.

Це забезпечує безперервну роботу вентиляції навіть у разі знеструмлення.

4.8. Потреба в теплоутилізації та обґрунтування дослідження

Особливістю досліджуваного об'єкта є його велика довжина (84 м) та значний об'єм повітря, що призводить до:

- підвищених втрат теплоти в зимовий період;
- нерівномірного прогріву приміщення;
- значного навантаження на систему догріву припливного повітря.

Це обґрунтовує необхідність: застосування рекуператорів, встановлення теплоакмуляційного контуру, автоматизованого керування теплообмінними процесами.

Висновок до розділу 4

Описаний об'єкт дослідження є типовою підвальною спорудою цивільного захисту з довгою галерейною зоною, двома виходами та системою розподілу повітря. Конструктивні особливості, глибина розташування, значний об'єм і вимоги до автономності роблять необхідним удосконалення вентиляції шляхом застосування енергоефективних технологій теплоутилізації та акумулювання теплоти.

РОЗДІЛ 5
РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА:
ВЕНТИЛЯЦІЯ УКРИТТЯ З ТЕПЛОУТИЛІЗАТОРОМ

5.1. Розрахунок параметрів мікроклімату при повній посадці людей в зимовий період

5.1.1. Вихідні дані, допущення та нормативні орієнтири. Мета: забезпечити концентрацію $\text{CO}_2 \leq 1000$ ppm при повному заселенні укриття та підтримати комфортну температуру припливного повітря (+18...+20 °C) за допомогою припливно-витяжних установок (ПВУ) з пластинчастим рекуператором чуттєвого тепла. Економічну частину в цьому розділі не розглядаємо.

Нормативні орієнтири: мінімальна площа на 1 особу для укриттів у громадських будівлях — 0,6 м²/особу, метод CO_2 — $a=20$ л/год·особу; $C_0 \approx 0,4$ л/м³; $S_{\text{тах}} \approx 1,0$ л/м³. Режим роботи укриттів: I — чиста вентиляція; II — фільтровентиляція; III — ізоляція.

Параметри зовнішнього середовища для зимового режиму: $t_{\text{зовн}} = -10$ °C; внутрішнє проектне $t_{\text{вн}} = +20$ °C. Ефективність пластинчастого рекуператора $\eta = 0,75$ (чуттєвий теплообмін, без масообміну вологи).

Фізичні константи: густина повітря $\rho = 1,20$ кг/м³; теплоємність повітря $c_p = 1005$ Дж/(кг·K).

5.1.2. Геометрія укриття.

Таблиця 5.1

Геометричні параметри підвального приміщення

№	Назва	Довж., м	Шир., м	Вис., м	Площа S, м ²	Об'єм V, м ³
1	Основне	84	2,60	2,60	218,40	568,00
2	Додаткове №2	12,60	5,75	2,08	72,45	150,696
3	Додаткове №3	2,70	3,95	2,60	10,665	27,729
	Разом	—	—	—	301,515	746,425

Розрахунок загальної площі

$$\begin{aligned}
 S_1 &= 84 \times 2,6 = 218,4 \text{ м}^2 \\
 S_2 &= 12,6 \times 5,75 = 72,45 \text{ м}^2 \\
 S_3 &= 2,7 \times 3,95 = 10,665 \text{ м}^2 \\
 S_{\text{заг}} &= S_1 + S_2 + S_3 \\
 S_{\text{заг}} &= 218,4 + 72,45 + 10,665 = 301,515 \text{ м}^2
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

Розрахуємо об'єм приміщення

$$\begin{aligned}
 V_1 &= 84 \times 2,6 \times 2,6 = 84 \times 6,76 = 568,0 \text{ м}^3 \\
 V_2 &= 12,6 \times 5,75 \times 2,08 = 72,45 \times 2,08 = 150,696 \text{ м}^3 \\
 V_3 &= 2,7 \times 3,95 \times 2,6 = 10,665 \times 2,6 = 27,729 \text{ м}^3 \\
 V_{\text{заг}} &= V_1 + V_2 + V_3 \\
 V_{\text{заг}} &= 568,0 + 150,696 + 27,729 = 746,425 \text{ м}^3.
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

Загальний об'єм:

Сумарна площа $S_{\text{заг}} = 301,515 \text{ м}^2$; сумарний об'єм $V_{\text{заг}} = 746,425 \text{ м}^3$.

5.1.3. Розрахункова місткість укриття. Для надійності та руху людей враховуємо проходи, обладнання та зони без розміщення людей — 15 % площі. Ефективна площа під розміщення людей:

$$\begin{aligned}
 S_{\text{ефф}} &= S_{\text{заг}} \times 0,85 \\
 S_{\text{ефф}} &= 301,515 \times 0,85 = 256,29 \text{ м}^2
 \end{aligned}
 \tag{5.3}$$

Норматив: $f_1 = 0,6 \text{ м}^2/\text{особу}$. Кількість осіб:

$$\begin{aligned}
 N &= S_{\text{ефф}} / f_1 \\
 N &= 256,29 / 0,6 = 427 \text{ осіб}
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

Приймаємо $N = 427$ осіб для подальших розрахунків.

5.1.4. Розрахунок повітрообміну за критерієм CO_2 . Питомий повітрообмін на 1 людину L_1 визначається зі співвідношення виділень CO_2 та різниці концентрацій:

$$L_1 = a (C_{\text{max}} - C_0), \quad (5.5)$$

$$L_1 = 20 \text{ л/год} = 0,02 \text{ м}^3/\text{год}; C_0 = 0,4 \text{ л/м}^3; C_{\text{max}} = 1,0 \text{ л/м}^3$$

$$L_1 = 20 / (1,0 - 0,4) = 33,3 \text{ м}^3/\text{год} \cdot \text{особу}$$

Загальна витрата свіже-припливного повітря при $N = 427$:

$$L = L_1 \times N \quad (5.6)$$

$$L = 33,3 \times 427 = 14\,239 \text{ м}^3/\text{год} = 3,95 \text{ м}^3/\text{с}$$

Кратність повітрообміну:

$$\text{ACH} = L / V_{\text{заг}} \quad (5.7)$$

$$\text{ACH} = 14\,239 / 746,425 = 19,1 \text{ год}^{-1}$$

5.1.5. Перевірка мінімальних санітарних подач. Мінімум 15–20 $\text{м}^3/\text{год} \cdot \text{особу}$ виконується автоматично, адже наш $L_1 = 33,3 \text{ м}^3/\text{год} \cdot \text{особу}$. Критерій CO_2 — визначальний.

5.1.6. Розподіл витрати між приміщеннями і ПВУ. Сумарну витрату L розподіляємо пропорційно ефективній площі (з урахуванням, що основна маса людей у приміщенні №1). Для практичності приймаємо 90% витрати на Основне приміщення №1 і 10% на №2+№3.

$$L_1(\text{№1}) = 0,90 \times 14\,239 \approx 12\,815 \text{ м}^3/\text{год};$$

$$L_1(\text{№2+№3}) = 0,10 \times 14\,239 \approx 1\,424 \text{ м}^3/\text{год}$$

Система має чотири ПВУ, розташовані по периметру основного приміщення довжиною 84 м, кожна обслуговує свою частину (≈ 21 м) та під'єднані відгалуження до №2 і №3.

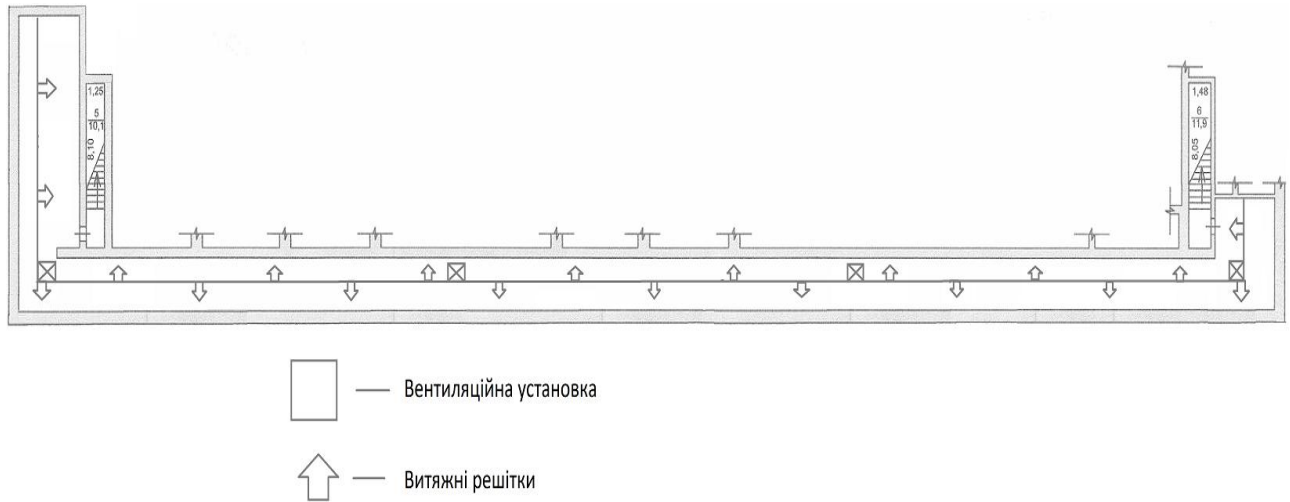


Рис. 5.1. Креслення підвального приміщення з встановленими ПВУ:
 $L(\text{ПВУ-А}) \approx 7\,120 \text{ м}^3/\text{год}$; $L(\text{ПВУ-Б}) \approx 7\,120 \text{ м}^3/\text{год}$

5.1.7. Підбір припливно-витяжних установок. Приймаємо 4 установки: Вентс ВУТ 3000 ПВ ЕС Р(V)/Н із пластинчастим рекуператором ($\eta \approx 0,75$), робочою ділянкою $3800 \text{ м}^3/\text{год}$. Загальна можливість системи: 18–20 тис. $\text{м}^3/\text{год}$, що забезпечує запас і режим II (фільтровентиляція).

5.1.8. Тепловий баланс із рекуперацією. Температура після рекуператора при $t_{\text{зовн}} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{\text{вн}} = +20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\eta = 0,75$:

$$t_{\text{після рек}} = t_{\text{зовн}} + \eta \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{зовн}}) \quad (5.8)$$

$$t_{\text{після рек}} = -10 + 0,75 \times (20 - (-10)) = +12,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Щоб подати $+18 \text{ }^\circ\text{C}$, потрібний догрів: $\Delta t_{\text{догр}} = 18 - 12,5 = 5,5 \text{ К}$.

Масова витрата при $L = 3,95 \text{ м}^3/\text{с}$: $\dot{m} = \rho L = 1,2 \times 3,95 = 4,74 \text{ кг/с}$.

Потужність догріву без урахування внутрішніх тепловиділень:

$$Q_{\text{догр}} = \dot{m} \times c_p \times \Delta t_{\text{догр}} \quad (5.9)$$

$$Q_{\text{догр}} = 4,74 \times 1005 \times 5,5 \approx 26,2 \text{ кВт}$$

Для порівняння, без рекуператора ($\Delta t=28$ К): $Q_0 \approx 133,5$ кВт. Ефект рекуперації — зменшення пікової потужності на ≈ 107 кВт ($\sim 80\%$).

5.1.9. Внутрішні тепловиділення (люди, вентилятори, освітлення).

Люди виділяють чуттєве тепло 55–60 Вт на особу (сидіння). Для $N = 104$:

$$Q_{\text{люди,55}} = 104 \cdot 0,055 = 5,72 \text{ кВт},$$

$$Q_{\text{люди,60}} = 104 \cdot 0,060 = 6,24 \text{ кВт}.$$

Електрична потужність вентиляторів переходить у тепло повітря. Для двох ПВУ приймаємо сумарно:

$$Q_{\text{вент}} \approx 3,6 \text{ кВт}.$$

Освітлення: приймаємо питомі тепловиділення від ламп $q_{\text{осв}} = 10$ Вт/м²,
 $S_{\text{заг}} = 301,515$ м²

$$Q_{\text{осв}} = q_{\text{осв}} \cdot S_{\text{заг}} \quad (5.10)$$

$$Q_{\text{осв}} = 10 \cdot 301,515 \approx 3015 \text{ Вт} \approx 3,02 \text{ кВт}.$$

Тоді сумарні внутрішні надходження:

- при 60 Вт/особу:

$$Q_{\text{внутр}} = Q_{\text{люди}} + Q_{\text{вент}} + Q_{\text{осв}} \quad (5.11)$$

$$Q_{\text{внутр,60}} = 6,24 + 3,6 + 3,02 \approx 12,86 \text{ кВт},$$

- при 55 Вт/особу:

$$Q_{\text{внутр,55}} = 5,72 + 3,6 + 3,02 \approx 12,34 \text{ кВт}.$$

Порівняння з потребою догріву до $+18$ °С

$Q_{\text{догр}} \approx 6,36$ кВт показує, що внутрішні тепловиділення перевищують потребу в догріві — калорифер у зимовий період при повному заселенні не потрібен.

5.1.10. Поріг заповненості для бездогрівної роботи і режим +20 °С.

Поріг $N_{\text{поріг}}$, за якого $Q_{\text{внутр}} \geq Q_{\text{догр}}$:

$$N_{\text{поріг}} = (Q_{\text{догр}} - Q_{\text{вент}})/W_{\text{сенс}} \quad (5.12)$$

При $W_{\text{сенс}} = 60$ Вт: $N_{\text{поріг}} \approx (26,2-3,6)/0,06 \approx 378$ осіб; при 55 Вт: $N_{\text{поріг}} \approx 413$ осіб.

Для подачі +20 °С ($\Delta t = 7,5$ К): $Q(20^\circ\text{C}) \approx 35,8$ кВт, отже знадобиться невеликий догрів 4–8 кВт понад внутрішні надходження.

5.1.11. Гідравлічний розрахунок повітроводів (магістраль і відгалуження). Для однієї ПВУ: $Q_1 = 7\ 120$ м³/год = 1,98 м³/с. Приймаємо проектну швидкість у магістралі $v \approx 5$ м/с:

$$A_{\text{маг}} = Q_1/v \quad (5.13)$$

$$A_{\text{маг}} = 1,98/5 = 0,396 \text{ м}^2; \quad d_{\text{екв}} \approx \sqrt{(4A/\pi)} \approx 0,71 \text{ м} \rightarrow \text{Ø}710$$

Для відгалужень до приміщень №2 і №3 (сумарно ~0,5–0,7 м³/с) приймаємо Ø400–500 (швидкість 4–6 м/с).

Сумарні втрати тиску (орієнтовно): прямі ділянки 0,6–1,0 Па/м; фільтри G4+F7 120–180 Па; рекуператор 120–200 Па; фасонки/решітки/глушники 100–150 Па. Разом $\Delta p \approx 500$ –550 Па. Необхідна потужність вентилятора на ПВУ: $P \approx (Q_1 \cdot \Delta p)/\eta_{\text{енс}} \approx (1,98 \cdot 540)/0,6 \approx 1,78$ кВт; сумарно ~3,6 кВт на дві ПВУ.

5.1.12. Розрахунок кількості решіток/дифузорів та їх параметрів. Для рівномірного промивання застосуємо по кожній половині зали 10–12 точок подачі (крок ~3,5–4,5 м). Середня витрата на точку подачі:

$$L_{\text{точ}} \approx (Q_1 \text{ для зони})/n \quad (5.14)$$

$$L_{\text{точ}} \approx 7\,120 / 10 \dots 12 \approx 600 \dots 700 \text{ м}^3/\text{год}$$

Площа живого перерізу однієї решітки для швидкості на виході 3,5–4,0 м/с:

$$F_{\text{реш}} \approx (L_{\text{точ}}/3600) / V_{\text{вих}} \quad (5.15)$$

$$F_{\text{реш}} \approx (0,17 \dots 0,19) / 3,8 \approx 0,045 \dots 0,050 \text{ м}^2$$

Це відповідає, наприклад, решітці умовного розміру 400×150 мм (чистий переріз залежить від моделі). Кидання струменя 5–8 м забезпечується при $\Delta t \approx 0 \dots +2 \text{ К}$.

Витяжні решітки розміщуються у протилежних до подачі зонах на висоті 1,2–1,5 м, із сумарною площею перерізу не меншою за приплив.

5.1.13. Динаміка CO₂ (перевірка часу реакції). Оцінимо часове наближення до стаціонару для приміщення об'ємом V та питомою подачею L: використаємо експоненційну модель заміни повітря із сталою часу $\tau = V/L$.

$$\tau = V_{\text{заг}} / L \quad (5.16)$$

$$\tau = 746,425 / 14\,239 \approx 0,0524 \text{ год} \approx 3,15 \text{ хв}$$

За 3τ (~9,5 хв) концентрація наближається до 95 % від стаціонарної. Це підтверджує швидку стабілізацію рівня CO₂ при зміні заповнюваності або режиму.

5.1.14. Вологісний баланс. Людина виділяє 0,04–0,05 кг/год водяної пари. Для N=427: $m_{\text{в}} \approx 17,1 \dots 21,4 \text{ кг/год}$. При зимових умовах вологовміст зовнішнього повітря низький; з подачею 14 239 м³/год волога ефективно видаляється. Пластинчастий рекуператор не переносить вологу, отже ризик підвищеної RH у залі мінімальний.

$$\Delta x \approx m_{\text{в}} / (\rho \cdot L) \quad (5.17)$$

$$\Delta x = 18 \text{ кг/год} / (1,2 \times 14\,239 / 3600) \approx 3,8 \text{ г/кг (порядок величини)}$$

5.1.15. Акустика та віброізоляція. Очікуваний рівень шуму вентиляторів із глушниками на магістралях — 55–60 дБ(А). Застосовуються гнучкі вставки на підключенні ПВУ, акустична ізоляція перших відрізків повітроводів і підвісів. Граничні рівні шуму для укриттів не перевищуються.

5.1.16. Режими II (фільтровентиляція) та III (ізоляція). У режимі II опір мережі зростає на 150–300 Па через ФПУ, витрата може бути скорегована до 0,8L, при цьому контроль CO₂ залишається головним. У режимі III (ізоляція) запас O₂ у повітрі: $V_{O_2} \approx 0,21 \times 746 \approx 157 \text{ м}^3$. Споживання O₂: $0,02 \text{ м}^3/\text{год} \cdot \text{особу} \times 427 \approx 8,54 \text{ м}^3/\text{год}$. При 5% зниженні O₂ час $\approx (0,05 \times 157) / 8,54 \approx 0,92 \text{ год}$. Отже режим III має бути тимчасовим та супроводжуватись швидким переходом до II або I.

5.1.17. Літній та міжсезонний режими. Влітку активується by-pass рекуператора, щоб уникнути небажаного підігріву припливу. В міжсезоння автоматика перемикає режими для мінімуму енерговитрат за сигналами $t/\phi/\text{CO}_2$, допускаючи подачу близьку до ізотермічної (+16...+20 °C).

5.1.18. Підсумок розрахункової частини.

- 1) Розрахункова місткість з урахуванням 15% проходів — 427 осіб.
- 2) Необхідна подача повітря за CO₂ — 14 239 м³/год (3,95 м³/с), АСН $\approx 19,1 \text{ год}^{-1}$.
- 3) Компоновка — чотири ПВУ (по периметру 84-метрового приміщення) по 3800 м³/год кожна (Вентс ВУТ 3000 ПВ ЕС).
- 4) Зимом після рекуператора +12,5 °C; при N=427 внутрішні надходження ($\approx 27\text{--}29 \text{ кВт}$) практично покривають догрів до +18 °C.
- 5) Магістраль Ø710, $\Delta p \approx 500\text{--}550 \text{ Па}$, сумарно $\sim 3,6 \text{ кВт}$ вентилятори; 10–12 решіток подачі на півзалу по 600–700 м³/год.
- 6) Динаміка CO₂ швидка ($\tau \approx 3,15 \text{ хв}$); вологість у нормі; режими II–III передбачені проектно, by-pass улітку.

Розрахункова частина може бути доповнена каталоговими підбором конкретних решіток/дифузорів і детальною мережевою гідравлікою по ділянках — за потреби виробника.

5.1.19. Повний тепловий баланс і робота рекуператора. Тепловий баланс припливно-витяжної системи з пластинчастим рекуператором для прийнятих витрат повітря та заповнюваності укриття.

5.1.20. Вихідні для теплового балансу

Сумарна витрата для $\text{CO}_2 \leq 1000 \text{ ppm}$ ($N = 427$ осіб): $L = 14\,239 \text{ м}^3/\text{год} = 3,95 \text{ м}^3/\text{с}$.

Густина повітря: $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3 \rightarrow$ масова витрата: $\dot{m} = \rho \cdot L = 1,2 \cdot 3,95 = 4,74 \text{ кг/с}$.

Теплоємність повітря: $c_p = 1005 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$.

Зима: $t_{\text{зовн}} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{вн}} = +20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Рекуператор пластинчастий (sensible): $\eta = 0,75$.

5.1.21. Дія рекуператора (підвищення температури припливу)

$$t_{\text{після рек}} = t_{\text{зовн}} + \eta \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{зовн}}) \quad (5.18)$$

$$t_{\text{після рек}} = -10 + 0,75(20 - (-10)) = +12,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Щоб подати у зал $+18 \text{ }^\circ\text{C}$, потрібний догрів:

$$\Delta T_{\text{догр}} = t_{\text{п}} - t_{\text{після рек}} \quad (5.19)$$

$$\Delta T_{\text{догр}} = 18 - 12,5 = 5,5 \text{ К}$$

Потужність на цей догрів (без внутрішніх надходжень):

$$Q_{\text{догр}} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T_{\text{догр}} \quad (5.20)$$

$$Q_{\text{догр}} = 4,74 \cdot 1005 \cdot 5,5 \approx 26,2 \text{ кВт}$$

Без рекуператора (нагрів від $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+18 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta T = 28 \text{ К}$):

$Q_0 = 4,74 \cdot 1005 \cdot 28 \approx 133,5 \text{ кВт} \rightarrow \text{ефект рекуперації} \approx \approx -107 \text{ кВт} (\approx -80 \%)$.

5.1.22. Внутрішні надходження тепла

а) Люди (сензительна частина): 55–60 Вт/особу (сидіння). Для $N = 427$:

$$Q_{\text{люди}} = N \cdot Q_{\text{люд}} \quad (5.21)$$

$$Q_{\text{люди}}(55) = 427 \cdot 0,055 \approx 23,5 \text{ кВт}; \quad Q_{\text{люди}}(60) = 427 \cdot 0,060 \approx 25,6 \text{ кВт}.$$

б) Вентилятори: вся електропотужність переходить у тепло повітря. За гідравлікою приймаємо $\sim 1,8 \text{ кВт/ПВУ} \rightarrow 2 \text{ ПВУ}$:

$$Q_{\text{вент}} \approx 3,6 \text{ кВт}.$$

Температурний приріст від вентиляторів:

$$\Delta T_{\text{вент}} = Q_{\text{вент}} / (m \cdot c_p) \quad (5.22)$$

$$\Delta T_{\text{вент}} = 3600 / (4,74 \cdot 1005) \approx 0,76 \text{ К}$$

5.1.23. Чи потрібен догрів при повному заповненні? Порівнюємо потребу догріву після рекуперації з внутрішніми надходженнями:

- Потрібно на догрів: $\approx 26,2 \text{ кВт}$.
- Є від людей + вентиляторів: $25,6 + 3,6 = 29,2 \text{ кВт}$ (при 60 Вт/особу) або $23,5 + 3,6 = 27,1 \text{ кВт}$ (при 55 Вт/особу).

Висновок: при $N = 427$ осіб та прийнятій витраті повітря рекуперація + внутрішні надходження закривають догрів до $+18 \text{ }^\circ\text{C}$ — калорифер може бути вимкнений або працювати мінімально.

Поріг заповненості, нижче якого калорифер уже стане потрібен (оцінка):

$$N_{\text{поріг}} = (Q_{\text{догр}} - Q_{\text{вент}}) / W_{\text{сенс}} \quad (5.23)$$

$$N_{\text{поріг}} \text{ 60 Вт} = (26,2 - 3,6) / 0,060 \approx 378 \text{ осіб};$$

$$N_{\text{поріг}} \text{ 55 Вт} \approx 413 \text{ осіб}$$

5.1.24. Якщо тримати +20 °С на припливі. Після рекуператора маємо +12,5 °С, до +20 °С: $\Delta T = 7,5$ К.

$$Q(20\text{ °C}) = m \cdot c_p \cdot 7,5 \approx 35,8 \text{ кВт.} \quad (5.24)$$

Внутрішні надходження (~27–29 кВт) не повністю покривають цю потребу → потрібен невеликий додатковий догрів 4–8 кВт. Енергооптимально для укриттів тримати +18 °С або застосовувати by-pass.

5.1.25. Вологість (коротко). Латентні виділення: 0,04–0,05 кг/год·особу → 18–21 кг/год пари на 427 осіб. Узимку зовнішнє повітря сухе; при $L \approx 14,2$ тис. м³/год відносна вологість у залі зазвичай < 60–70 %. Пластинчастий рекуператор не переносить вологу — це плюс для зимового осушення.

5.1.26. Динаміка CO₂ (стала часу)

$$\tau = V_{\text{заг}} / L \quad (5.25)$$

$$\tau = 746,425 / 14\,239 \approx 0,0524 \text{ год} \approx 3,15 \text{ хв} \rightarrow \text{за } 3\tau (\sim 9,5 \text{ хв}) \text{ досягається} \\ \approx 95 \% \text{ стаціонару}$$

5.1.27. Узагальнення для прийнятого сценарію. Після рекуператора: +12,5 °С.

- Для +18 °С: $Q_{\text{догр}} \approx 26,2$ кВт, що покривається людьми + вентиляторами при $N = 427$.

- Для +20 °С: потрібен невеликий догрів 4–8 кВт.

- При $N < \sim 380\text{--}410$ осіб калорифер починає підхоплювати догрів навіть на +18 °С.

- By-pass рекуператора влітку; у міжсезоння — автоматичний вибір режиму за $t/\varphi/\text{CO}_2$.

5.2. Розрахунок параметрів мікроклімату при повній посадці людей в літній період

5.2.1. Вихідні дані. Параметри зовнішнього середовища для літнього режиму: $t_{зовн} = 30^{\circ}\text{C}$; внутрішнє проектне $t_{вн} = +24^{\circ}\text{C}$. Ефективність пластинчастого рекуператора $\eta = 0,75$ (чуттєвий теплообмін, без масообміну вологи).

Фізичні константи: густина повітря $\rho = 1,20 \text{ кг/м}^3$; теплоємність повітря $c_p = 1005 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$.

Загальний об'єм:

Сумарна площа $S_{\text{заг}} = 301,515 \text{ м}^2$; сумарний об'єм $V_{\text{заг}} = 746,425 \text{ м}^3$.

5.2.2. Розрахункова місткість укриття. Для надійності та руху людей враховуємо проходи, обладнання та зони без розміщення людей — 15 % площі. Ефективна площа під розміщення людей:

$$S_{\text{ефф}} = S_{\text{заг}} \times 0,85 \quad (5.26)$$

$$S_{\text{ефф}} = 301,515 \times 0,85 = 256,29 \text{ м}^2$$

Норматив: $f_1 = 0,6 \text{ м}^2/\text{особу}$. Кількість осіб:

$$N = S_{\text{ефф}} / f_1 \quad (5.27)$$

$$N = 256,29 / 0,6 = 427 \text{ осіб}$$

Приймаємо $N = 427$ осіб для подальших розрахунків.

5.2.3. Розрахунок повітрообміну за критерієм CO_2 . Питомий повітрообмін на 1 людину L_1 визначається зі співвідношення виділень CO_2 та різниці концентрацій:

$$L_1 = a (C_{\text{max}} - C_0), \quad (5.28)$$

$$L_1 = 20 \text{ л/год} = 0,02 \text{ м}^3/\text{год}; C_0 = 0,4 \text{ л/м}^3; C_{\text{max}} = 0 \text{ л/м}^3$$

$$L_1 = 20 / (1,0 - 0,4) = 33,3 \text{ м}^3/\text{год} \cdot \text{особу}$$

Загальна витрата свіже-припливного повітря при $N = 427$:

$$L = L_1 \times N \quad (5.29)$$

$$L = 33,3 \times 427 = 14\,239 \text{ м}^3/\text{год} = 3,95 \text{ м}^3/\text{с}$$

Кратність повітрообміну:

$$\text{ACH} = L / V_{\text{заг}} \quad (5.30)$$

$$\text{ACH} = 14\,239 / 746,425 = 19,1 \text{ год}^{-1}$$

5.2.4. Перевірка мінімальних санітарних подач. Мінімум 15–20 $\text{м}^3/\text{год} \cdot \text{особу}$ виконується автоматично, адже наш $L_1=33,3 \text{ м}^3/\text{год} \cdot \text{особу}$. Критерій CO_2 — визначальний.

5.2.5. Розподіл витрати між приміщеннями і ПВУ. Сумарну витрату L розподіляємо пропорційно ефективній площі (з урахуванням, що основна маса людей у приміщенні №1). Для практичності приймаємо 90% витрати на Основне приміщення №1 і 10% на №2+№3.

$$\begin{aligned} L_1(\text{№1}) &= 0,90 \times 14\,239 \approx 12\,815 \text{ м}^3/\text{год}; \quad L_1(\text{№2}+\text{№3}) = \\ &= 0,10 \times 14\,239 \approx 1\,424 \text{ м}^3/\text{год} \end{aligned}$$

Система має чотири ПВУ, розташовані по периметру основного приміщення довжиною 84 м, кожна обслуговує свою половину (≈ 42 м) та під'єднані відгалуження до №2 і №3.

5.2.6. Тепловий баланс із рекуперацією. Температура після рекуператора при $t_{\text{зовн}}=30 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{\text{вн}}=+24 \text{ }^\circ\text{C}$, $\eta=0,75$:

$$t_{\text{після рек, літо}} = t_{\text{зовн,літо}} + \eta(t_{\text{вн,літо}} - t_{\text{зовн,літо}}) \quad (5.31)$$

$$t_{\text{після рек}} = 30 + 0,75(24 - 30) = 30 + 0,75 \cdot (-6) = 30 - 4,5 = 25,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Масова витрата при $L = 3,95 \text{ м}^3/\text{с}$: $\dot{m} = \rho L = 1,2 \times 3,95 = 4,74 \text{ кг/с}$.

Потрібно подати в зал повітря з температурою $+24 \text{ } ^\circ\text{C}$, отже необхідне додаткове охолодження після рекуператора:

$$\Delta T_{\text{охл,рек}} = t_{\text{після рек,літо}} - t_{\text{вн,літо}} \quad (5.32)$$

$$\Delta T_{\text{охл,рек}} = 25,5 - 24 = 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Потужність холодопродуктивності для цього:

$$Q_{\text{охл,рек}} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T_{\text{охл,рек}} \quad (5.33)$$

$$Q_{\text{охл,рек}} = 4,74 \cdot 1005 \cdot 1,5 \approx 7155 \text{ Вт} \approx 7,15 \text{ кВт.}$$

Якщо рекуператор вимкнений, припливне повітря заходить із температурою зовнішнього повітря $t_{\text{зовн,літо}} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Щоб охолодити його до $t_{\text{вн,літо}} = 24 \text{ } ^\circ\text{C}$:

$$\Delta T_{0,\text{охл}} = t_{\text{зовн,літо}} - t_{\text{вн,літо}} \quad (5.34)$$

$$\Delta T_{0,\text{охл}} = 30 - 24 = 6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Q_{0,\text{охл}} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T_{0,\text{охл}} \quad (5.35)$$

$$Q_{0,\text{охл}} = 4,74 \cdot 1005 \cdot 6 \approx 28,6 \text{ кВт.}$$

Ефект рекуперації влітку:

$$\Delta Q_{\text{літо}} = Q_{0,\text{охл}} - Q_{\text{охл,рек}} \quad (5.36)$$

$$\Delta Q_{\text{літо}} = 28,6 - 7,15 = 21,45 \text{ кВт.}$$

Тобто рекуператор дозволяє зменшити витрати холоду приблизно на 75 % у порівнянні з системою без утилізації.

5.2.7. Внутрішні тепловиділення (люди, вентилятори, освітлення).

Люди виділяють чуттєве тепло 55–60 Вт на особу (сидіння). Для $N=427$:

$$Q_{\text{люди}}(55) = 427 \times 0,055 \approx 23,5 \text{ кВт}; \quad Q_{\text{люди}}(60) = 25,6 \text{ кВт}$$

Ел. потужність вентиляторів переходить у тепло повітря. Для двох ПВУ приймаємо сумарно: $Q_{\text{вент}} \approx 3,6 \text{ кВт}$.

Додатково враховуємо тепловиділення від освітлення.

Приймаємо питоме тепловиділення освітлювальних приладів $q_{\text{осв}} = \frac{10 \text{ Вт}}{\text{м}^2}$

При загальній площі укриття $S_{\text{заг}}=301,515 \text{ м}^2$ отримаємо:

$$Q_{\text{осв}} = q_{\text{осв}} \cdot S_{\text{заг}} \tag{5.37}$$

$$Q_{\text{осв}} = 10 \cdot 301,515 \approx 3,02 \text{ кВт.}$$

Сумарний тепловий баланс у літній період

Сумарні теплові надходження, які треба відводити охолодженням:
від внутрішніх джерел (люди + вентилятори + освітлення)

$$Q_{\text{внутр}} \approx 30 \dots 32 \text{ кВт,}$$

від припливного повітря (після рекуператора)

$$Q_{\text{охл,рек}} \approx 7,15 \text{ кВт.}$$

Разом потреба в холоді при роботі рекуператора:

$$Q_{\Sigma, \text{з рек}} \approx 30 \dots 32 + 7,15 \approx 37 \dots 39 \text{ кВт.}$$

Якби рекуператора не було (охолоджувати від 30 до 24 °С):

$$Q_{\Sigma,0} \approx 30 \dots 32 + 28,6 \approx 59 \dots 61 \text{ кВт.}$$

Отже, застосування рекуператора в літній період зменшує сумарні витрати холодопродуктивності приблизно на 20–22 кВт.

5.2.8. Вологісний баланс (оціночно). Людина виділяє 0,04–0,05 кг/год водяної пари. Для $N=427$: $\dot{m}_v \approx 17,1 \dots 21,4$ кг/год.

Масова витрата сухого повітря за годину:

$$\dot{m}_{\text{сух}} = \rho \cdot L \quad (5.38)$$

$$\dot{m}_{\text{сух}} = 1,2 \cdot 14\,239 \approx 17\,087 \text{ кг/год.}$$

Оціночний приріст питомої вологості (по повітрю укриття):

$$\Delta\omega = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_{\text{сух}}} \quad (5.39)$$

$$\Delta\omega = \frac{17,1 \dots 21,4}{17\,087} \approx 0,0010 \dots 0,00125 \text{ кг/кг} \approx 1,0 \dots 1,25 \text{ г/кг.}$$

В літній період зовнішнє повітря зазвичай має високий вологовміст, тому питання відносної вологості вирішується спільно з системою охолодження/осушення (чилер, фанкойли). Пластинчастий рекуператор не переносить вологу, тому не погіршує вологісний режим.

5.2.9. Акустика та віброізоляція. Очікуваний рівень шуму вентиляторів із глушниками на магістралях — 55–60 дБ(А). Застосовуються гнучкі вставки на підключенні ПВУ, акустична ізоляція перших відрізків повітроводів і підвісів. Граничні рівні шуму для укриттів не перевищуються.

5.2.10. Режими II (фільтровентиляція) та III (ізоляція). У режимі II опір мережі зростає на 150–300 Па через ФПУ, витрата може бути скорегована до $0,8L$, при цьому контроль CO_2 залишається головним. У режимі III (ізоляція) запас O_2 у повітрі: $V_{\text{O}_2} \approx 0,21 \times 746 \approx 157 \text{ м}^3$. Споживання O_2 : $0,02 \text{ м}^3/\text{год} \cdot \text{особу} \times$

$427 \approx 8,54 \text{ м}^3/\text{год}$. При 5% зниженні O_2 час $\approx (0,05 \times 157)/8,54 \approx 0,92$ год. Отже режим III має бути тимчасовим та супроводжуватись швидким переходом до II або I.

5.2.11. Літній режими. Влітку активується by-pass рекуператора, щоб уникнути небажаного підігріву припливу. В міжсезоння автоматика перемикає режими для мінімуму енерговитрат за сигналами $t/\phi/\text{CO}_2$, допускаючи подачу близьку до ізотермічної (+16...+20 °C).

5.2.12. Повний тепловий баланс і робота рекуператора. Розрахунок теплового балансу припливно-витяжної системи з пластинчастим рекуператором для прийнятих витрат повітря та заповнюваності укріття.

5.2.13. Вихідні для теплового балансу. Сумарна витрата для $\text{CO}_2 \leq 1000$ ppm ($N = 427$ осіб): $L = 14\,239 \text{ м}^3/\text{год} = 3,95 \text{ м}^3/\text{с}$.

Густина повітря: $\rho = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3 \rightarrow$ масова витрата: $\dot{m} = \rho \cdot L = 1,2 \cdot 3,95 = 4,74 \text{ кг}/\text{с}$.

Теплоємність повітря: $c_p = 1005 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Зима: $t_{\text{зовн}} = 30^\circ\text{C}$; $t_{\text{вн}} = +24^\circ\text{C}$.

Рекуператор пластинчастий (sensible): $\eta = 0,75$.

5.2.14. Дія рекуператора (підвищення температури припливу).

$$t_{\text{після рек,літо}} = t_{\text{зовн,літо}} + \eta (t_{\text{вн,літо}} - t_{\text{зовн,літо}}) \quad (5.40)$$

$$t_{\text{після рек,літо}} = 30 + 0,75 (24 - 30) = 30 + 0,75 \cdot (-6) = 30 - 4,5 = 25,5^\circ\text{C}.$$

Щоб подати у зал +24 °C, потрібно охолодження:

$$\Delta T_{\text{охл,рек}} = t_{\text{після рек,літо}} - t_{\text{вн,літо}} \quad (5.41)$$

$$\Delta T_{\text{охл,рек}} = 25,5 - 24 = 1,5 \text{ К}.$$

Потужність охолодження припливу після рекуператора:

$$Q_{\text{охл,рек}} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T_{\text{охл,рек}} \quad (5.42)$$

$$Q_{\text{охл,рек}} = 4,746 \cdot 1005 \cdot 1,5 \approx 7,16 \text{ кВт.}$$

5.2.15. Охолодження без рекуператора (порівняння). Якщо рекуператора немає, охолоджуємо приплив з 30 до 24 °С:

$$\Delta T_{0,\text{охл}} = t_{\text{зовн,літо}} - t_{\text{вн,літо}} \quad (5.43)$$

$$\Delta T_{0,\text{охл}} = 30 - 24 = 6 \text{ К.}$$

$$Q_{0,\text{охл}} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T_{0,\text{охл}} \quad (5.44)$$

$$Q_{0,\text{охл}} = 4,746 \cdot 1005 \cdot 6 \approx 28,6 \text{ кВт.}$$

Ефект рекуперації влітку:

$$\Delta Q_{\text{літо}} = Q_{0,\text{охл}} - Q_{\text{охл,рек}} \quad (5.45)$$

$$\Delta Q_{\text{літо}} = 28,6 - 7,16 \approx 21,4 \text{ кВт,}$$

тобто економія ≈ 75 % холодопродуктивності на охолодження припливного повітря.

5.2.16. Внутрішні надходження тепла

а) Люди (сензибельна частина): 55–60 Вт/особу (сидіння). Для $N = 427$:

$$Q_{\text{люди}(55)} = 427 \cdot 0,055 \approx 23,5 \text{ кВт; } Q_{\text{люди}(60)} = 427 \cdot 0,060 \approx 25,6 \text{ кВт.}$$

б) Вентилятори: вся електропотужність переходить у тепло повітря. За гідравлікою приймаємо $\sim 1,8$ кВт/ПВУ $\rightarrow 2$ ПВУ:

$$Q_{\text{вент}} \approx 3,6 \text{ кВт.}$$

Температурний приріст від вентиляторів:

$$\Delta T_{\text{вент}} = Q_{\text{вент}} / (\dot{m} \cdot c_p) \quad (5.46)$$

$$\Delta T_{\text{вент}} = 3600 / (4,74 \cdot 1005) \approx 0,76 \text{ К}$$

5.2.17. Якщо тримати +24 °С на припливі. Після рекуператора маємо +12,5 °С, до +20 °С: $\Delta T = 7,5 \text{ К}$.

$$Q(20 \text{ °С}) = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (5.47)$$

$$Q(20 \text{ °С}) = 35,8 \text{ кВт.}$$

Внутрішні надходження (~27–29 кВт) не повністю покривають цю потребу → потрібен невеликий додатковий догрів 4–8 кВт. Енергооптимально для укриттів тримати +18 °С або застосувати by-pass.

5.2.18. Вологість. Вологісні виділення: 0,04–0,05 кг/год·особу → 18–21 кг/год пари на 427 осіб. Влітку повітря має високий вологовміст ; при $L \approx 14,2$ тис. м³/год відносна вологість у залі зазвичай < 80%. Пластинчастий рекуператор не переносить вологу — це плюс для осушення приміщення.

5.2.19 Динаміка CO₂. CO₂ не залежить від пори року, тому розрахунок лишається:

$$\tau = \frac{V_{\text{заг}}}{L} \quad (5.48)$$

$$\tau = \frac{746,425}{14\,239} \approx 0,0524 \text{ год} \approx 3,15 \text{ хв.}$$

За $3\tau \approx 9,5$ хв досягається ≈ 95 % стаціонарної концентрації CO₂.

5.2.20. Узагальнення для літнього сценарію (повна посадка)

- При $t_{\text{зовн,літо}} = 30 \text{ °С}$, $t_{\text{внутр}} = 24 \text{ °С}$ рекуператор охолоджує приплив з 30 до 25,5 °С.

- Для доведення до +24 °С потрібна холодопродуктивність:

-

$$Q_{\text{охл,рек}} \approx 7,16 \text{ кВт,}$$

без рекуператора:

$$Q_{0,охл} \approx 28,6 \text{ кВт.}$$

- Внутрішні тепловиділення (люди + вентилятори + освітлення) становлять $\approx 30\text{--}32$ кВт.
- Сумарне навантаження на систему охолодження з рекуператором — $\approx 37\text{--}39$ кВт, без нього — $\approx 59\text{--}61$ кВт.
- Отже, в літній період доцільно працювати в режимі 2 (з рекуперацією) спільно з системою охолодження (чилер, фанкойли), а автоматика має керувати режимами за $t/\varphi/\text{CO}_2$.

5.3. Розрахунок параметрів мікроклімату при неповній посадці людей в зимовий період

5.3.1. Реальні експлуатаційні обмеження при посадці людей. У реальних умовах частина стін не може бути використана для сидіння через:

- дверні прорізи;
- виходи та сходові клітки;
- вентиляційні шахти;
- вузькі проходи, де необхідно забезпечити евакуаційний коридор ≥ 1 м;
- технічні зони (електрощитова, труби, обладнання);

Корисна довжина стін для сидіння становить 25–35 % від геометричного периметра, залежно від планувальних рішень.

У цьому проекті, виходячи зі схеми фактичного розташування сидячих місць (104 місця), отримаємо реально доступну довжину:

$$L_{\text{еф}} = N \cdot b \tag{5.49}$$

$$L_{\text{еф}} = 104 \cdot 0,6 = 62,4 \text{ м}$$

Тобто в укритті доступно приблизно 62 м стін, що можна зайняти сидячими місцями.

5.3.2. Реальна кількість сидячих місць. Після врахування всіх обмежень максимальна реальна місткість складає:

$$N_{\text{реальне}} = \frac{L_{\text{еф}}}{b} \quad (5.50)$$

$$N_{\text{реальне}} = \frac{62,4}{0,6} = 104 \text{ особи}$$

Отже, реальна проектна місткість укриття — 104 сидячих місця.

5.3.3. Розрахунок повітрообміну за критерієм CO₂. Питомий повітрообмін на 1 людину L_1 визначається зі співвідношення виділень CO₂ та різниці концентрацій:

$$L_1 = a (C_{\text{max}} - C_0) \quad (5.51)$$

$$L_1 = 20 \text{ л/год} = 0,02 \text{ м}^3/\text{год};$$

$$C_0 = 0,4 \text{ л/м}^3; C_{\text{max}} = 1,0 \text{ л/м}^3;$$

$$L_1 = 20 / (1,0 - 0,4) = 33,3 \text{ м}^3/\text{год} \cdot \text{особу}$$

Загальна витрата свіже-припливного повітря при $N = 427$:

$$L = L_1 \times N \quad (5.52)$$

$$L = 33,3 \times 427 = 3463,2 \text{ м}^3/\text{год} = 0,962 \text{ м}^3/\text{с}$$

Кратність повітрообміну:

$$\text{ACH} = L / V_{\text{заг}} \quad (5.51)$$

$$\text{ACH} = 3463,2 / 746,425 = 4,64 \text{ год}^{-1}$$

5.3.4. Перевірка мінімальних санітарних подач. Мінімум 15–20 м³/год·особу виконується автоматично, адже наш $L_1=33,3$ м³/год·особу. Критерій CO₂ — визначальний.

5.3.5. Розподіл витрати між приміщеннями і ПВУ. Сумарну витрату L розподіляємо пропорційно ефективній площі (з урахуванням, що основна маса людей у приміщенні №1). Для практичності приймаємо 90% витрати на Основне приміщення №1 і 10% на №2+№3.

$$\begin{aligned} L_1(\text{№1}) &= 0,90 \times 3463,2 \approx 3116,9 \text{ м}^3/\text{год}; \quad L_1(\text{№2+№3}) = \\ &= 0,10 \times 3463,2 \approx 346,3 \text{ м}^3/\text{год} \end{aligned}$$

5.3.6. Тепловий баланс із рекуперацією. Температура після рекуператора при $t_{\text{зовн}} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{\text{вн}} = +20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\eta = 0,75$:

$$t_{\text{після рек}} = -10 + 0,75 \times (20 - (-10)) = +12,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Щоб подати $+18 \text{ }^\circ\text{C}$, потрібний догрів: $\Delta t_{\text{догр}} = 18 - 12,5 = 5,5 \text{ К}$.

Масова витрата при $L = 3,95 \text{ м}^3/\text{с}$: $\dot{m} = \rho L = 1,2 \times 0,962 = 1,15 \text{ кг/с}$.

Потужність догріву без урахування внутрішніх тепловиділень:

$$Q_{\text{догр}} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta t_{\text{догр}} \quad (5.52)$$

$$Q_{\text{догр}} = 1,15 \times 1005 \times 5,5 \approx 6,36 \text{ кВт}$$

5.3.7. Внутрішні тепловиділення (люди, вентилятори). Люди виділяють чуттєве тепло 55–60 Вт на особу (сидіння). Для $N = 104$:

$$Q_{\text{люди}}(55) = 104 \times 0,055 \approx 5,72 \text{ кВт}; \quad Q_{\text{люди}}(60) = 6,24 \text{ кВт}$$

Ел. потужність вентиляторів переходить у тепло повітря. Для двох ПВУ приймаємо сумарно: $Q_{\text{вент}} \approx 3,6 \text{ кВт}$.

Підсумок внутрішніх надходжень: $Q_{\text{внутр}} \approx 7 \dots 10 \text{ кВт}$.

Порівняння з потребою догріву до $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($Q_{\text{догр}} \approx 6,36\text{ кВт}$) показує, що калорифер або вимкнений, або працює мінімально при меншій кількості людей, так як менше замінюється повітря.

5.3.8. Поріг заповненості для бездогрівної роботи і режим $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поріг $N_{\text{поріг}}$, за якого $Q_{\text{внутр}} \geq Q_{\text{догр}}$:

$$N_{\text{поріг}} = (Q_{\text{догр}} - Q_{\text{вент}})/W_{\text{сенс}} \quad (5.53)$$

При $W_{\text{сенс}} = 60\text{ Вт}$: $N_{\text{поріг}} \approx (8,7 - 3,6)/0,06 \approx 85$ осіб; при 55 Вт : $N_{\text{поріг}} \approx 104$ осіб.

Для подачі $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\Delta t = 7,5\text{ К}$): $Q(20^{\circ}\text{C}) \approx 8,7\text{ кВт}$, отже знадобиться невеликий догрів 2-4 кВт понад внутрішні надходження.

5.3.9. Гідравлічний розрахунок повітроводів (магістраль і відгалуження). Для однієї ПВУ: $Q_1 = 3560\text{ м}^3/\text{год} = 0,99\text{ м}^3/\text{с}$. Приймаємо проектну швидкість у магістралі $v \approx 5\text{ м/с}$:

$$A_{\text{маг}} = Q_1/v \quad (5.54)$$

$$A_{\text{маг}} = 1,98/5 = 0,396\text{ м}^2; \quad d_{\text{екв}} \approx \sqrt{(4A/\pi)} \approx 0,71\text{ м} \rightarrow \text{Ø}710$$

Для відгалужень до приміщень №2 і №3 (сумарно $\sim 0,5\text{--}0,7\text{ м}^3/\text{с}$) приймаємо Ø400–500 (швидкість 4–6 м/с).

Сумарні втрати тиску (орієнтовно): прямі ділянки 0,6–1,0 Па/м; фільтри G4+F7 120–180 Па; рекуператор 120–200 Па; фасонки/решітки/глушники 100–150 Па. Разом $\Delta p \approx 500\text{--}550\text{ Па}$. Необхідна потужність вентилятора на ПВУ: $P \approx (Q_1 \cdot \Delta p)/\eta_{\text{енс}} \approx (1,98 \cdot 540)/0,6 \approx 1,78\text{ кВт}$; сумарно $\sim 3,6\text{ кВт}$ на дві ПВУ з яких повітря йде на відгалуджені частини.

5.3.10. Розрахунок кількості решіток/дифузорів та їх параметрів. Для рівномірного промивання застосуємо по кожній половині зали 10–12 точок подачі (крок $\sim 3,5\text{--}4,5\text{ м}$). Середня витрата на точку подачі:

$$L_{\text{точ}} \approx (Q_1 \text{ для зони})/n \quad (5.55)$$

$$L_{\text{точ}} \approx 7\,120 / 10 \dots 12 \approx 600 \dots 700 \text{ м}^3/\text{год}$$

Площа живого перерізу однієї решітки для швидкості на виході 3,5–4,0 м/с:

$$F_{\text{реш}} = (L_{\text{точ}}/3600) / v_{\text{вих}} \quad (5.56)$$

$$F_{\text{реш}} \approx (0,17 \dots 0,19) / 3,8 \approx 0,045 \dots 0,050 \text{ м}^2$$

Це відповідає, наприклад, решітці умовного розміру 400×150 мм (чистий переріз залежить від моделі). Кидання струменя 5–8 м забезпечується при $\Delta t \approx 0 \dots +2 \text{ К}$.

Витяжні решітки розміщуються у протилежних до подачі зонах на висоті 1,2–1,5 м, із сумарною площею перерізу не меншою за приплив.

5.3.11. Динаміка CO₂ (перевірка часу реакції). Оцінимо часове наближення до стаціонару для приміщення об'ємом V та питомою подачею L: використаємо експоненційну модель заміни повітря із сталою часу $\tau = V/L$.

$$\tau = V_{\text{заг}} / L \quad (5.57)$$

$$\tau = 746,425 / 3463,2 \approx 0,22 \text{ год} \approx 13,2 \text{ хв}$$

За 3τ (~30 хв) концентрація наближається до 95 % від стаціонарної. Це підтверджує швидку стабілізацію рівня CO₂ при зміні заповнюваності або режиму.

5.3.12. Вологісний баланс (оціночно). Людина виділяє 0,04–0,05 кг/год водяної пари. Для N=104: $m_{\text{в}} \approx 4,16 \dots 5,2 \text{ кг/год}$. При зимових умовах вологовміст зовнішнього повітря низький; з подачею 3463,2 м³/год волога ефективно видаляється. Пластинчастий рекуператор не переносить вологу, отже ризик підвищеної RH у залі мінімальний.

$$\Delta x \approx m_{\text{в}} / (\rho \cdot L) \quad (5.58)$$

$$\Delta x = 5 \text{ кг/год} / (1,2 \times 3463,2 / 3600) \approx 4,3 \text{ г/кг}$$

5.3.13. Акустика та віброізоляція. Очікуваний рівень шуму вентиляторів із глушниками на магістралях — 55–60 дБ(А). Застосовуються гнучкі вставки на підключенні ПВУ, акустична ізоляція перших відрізків повітроводів і підвісів. Граничні рівні шуму для укриттів не перевищуються.

5.3.14. Режими II (фільтровентиляція) та III (ізоляція). У режимі II опір мережі зростає на 150–300 Па через ФПУ, витрата може бути скорегована до 0,8L, при цьому контроль CO₂ залишається головним. У режимі III (ізоляція) запас O₂ у повітрі: $V_{O_2} \approx 0,21 \times 746 \approx 157 \text{ м}^3$. Споживання O₂: $0,02 \text{ м}^3/\text{год} \cdot \text{особу} \times 104 \approx 2,08 \text{ м}^3/\text{год}$. При 5% зниженні O₂ час $\approx (0,05 \times 157) / 2,08 \approx 3,774 \text{ год}$. Таким чином, режим III (ізоляція) допускається лише як короточасний аварійний, а основними режимами роботи системи є режим I (чиста вентиляція з рекуператором) та режим II (фільтровентиляція з ФПУ), в яких якість повітря контролюється за концентрацією CO₂.

5.3.15. Літній та міжсезонний режими. Влітку активується by-pass рекуператора, щоб уникнути небажаного підігріву припливу. В міжсезоння автоматика перемикає режими для мінімуму енерговитрат за сигналами $t/\phi/\text{CO}_2$, допускаючи подачу близьку до ізотермічної (+16...+20 °C).

5.3.16. Підсумок розрахункової частини

- 1) Розрахункова місткість з урахуванням місць – 104 осіб.
- 2) Необхідна подача повітря за CO₂ — 3463,2 м³/год , АСН $\approx 4,64 \text{ год}^{-1}$.
- 3) Компоновка — дві ПВУ (по торцях 84-метрового приміщення) по 9–10 тис. м³/год кожна (VENTS VUT 10 000 P(V)/H).
- 4) Зимом після рекуператора +12,5 °C; при N=104 внутрішні надходження ($\approx 6\text{--}7 \text{ кВт}$) практично покривають догрів до +18 °C.
- 5) Магістраль Ø710, $\Delta p \approx 500\text{--}550 \text{ Па}$, сумарно $\sim 3,6 \text{ кВт}$ вентиляторів; 10–12 решіток подачі на півзалу по 250–300 м³/год. Електроспоживання вентиляторів: 1,6–1,8 кВт на одну ПВУ, сумарно 3,2–3,6 кВт,

б) Динаміка CO₂ швидка ($\tau \approx 12,9$ хв); вологість у нормі; режими II–III передбачені проектно, by-pass улітку.

Розрахункова частина може бути доповнена каталоговими підбором конкретних решіток/дифузорів і детальною мережевою гідравлікою по ділянках — за потреби виробника.

5.3.17. Повний тепловий баланс і робота рекуператора. У цьому підрозділі детально показано тепловий баланс припливно-витяжної системи з пластинчастим рекуператором для прийнятих витрат повітря та заповнюваності укриття.

5.3.18. Вихідні для теплового балансу. Сумарна витрата для CO₂ ≤ 1000 ppm (N = 104 осіб): $L = 3463,2 \text{ м}^3/\text{год} = 0,962 \text{ м}^3/\text{с}$.

Густина повітря: $\rho = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3 \rightarrow$ масова витрата:

$$\dot{m} = \rho \cdot L \quad (5.59)$$

$$\dot{m} = 1,2 \cdot 0,962 = 1,1544 \text{ кг}/\text{с}.$$

Теплоємність повітря: $c_p = 1005 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Зима: $t_{\text{зовн}} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{вн}} = +20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Рекуператор пластинчастий (sensible): $\eta = 0,75$.

5.3.19. Дія рекуператора (підвищення температури припливу)

$$t_{\text{після рек}} = t_{\text{зовн}} + \eta \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{зовн}}) \quad (5.60)$$

$$t_{\text{після рек}} = -10 + 0,75(20 - (-10)) = +12,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Щоб подати у зал $+18 \text{ }^\circ\text{C}$, потрібний догрів:

$$\Delta T_{\text{догр}} = 18 - 12,5 = 5,5 \text{ К}.$$

Потужність на цей догрів (без внутрішніх надходжень):

$$Q_{\text{догр}} = 1,1544 \cdot 1005 \cdot 5,5 \approx 6380,9 \text{ Вт} \approx 6,38 \text{ кВт.}$$

Без рекуператора (нагрів від -10°C до $+18^\circ\text{C}$, $\Delta T = 28 \text{ K}$):

$$Q_0 = 1,1544 \cdot 1005 \cdot 28 \approx 32,48 \text{ кВт}$$

Ефект рекуперації:

$$\Delta Q = 32,48 - 6,38 \approx 26,1 \text{ кВт.}$$

5.3.20. Внутрішні надходження тепла. Люди (чуттєве тепло): 55–60 Вт/особу (сидіння). Для $N = 104$:

$$Q_{\text{люди,55}} = 104 \cdot 0,055 = 5,72 \text{ кВт,}$$

$$Q_{\text{люди,60}} = 104 \cdot 0,060 = 6,24 \text{ кВт.}$$

Вентилятори:

Електрична потужність вентиляторів переходить у тепло повітря. Для двох ПВУ:

$$Q_{\text{вент}} \approx 3,6 \text{ кВт.}$$

Освітлення:

Приймаємо питоме тепловиділення від освітлення:

$$q_{\text{осв}} = 10 \text{ Вт/м}^2, S_{\text{заг}} = 301,515 \text{ м}^2,$$

$$Q_{\text{осв}} = q_{\text{осв}} \cdot S_{\text{заг}} \tag{5.61}$$

$$Q_{\text{осв}} = 10 \cdot 301,515 \approx 3015 \text{ Вт} \approx 3,02 \text{ кВт.}$$

Сумарні внутрішні надходження тепла влітку:

- при 60 Вт/особу:

$$Q_{\text{внутр}} = Q_{\text{люди}} + Q_{\text{вент}} + Q_{\text{осв}} \quad (5.62)$$

$$Q_{\text{внутр},60} = 6,24 + 3,6 + 3,02 \approx 12,86 \text{ кВт},$$

- при 55 Вт/особу:

$$Q_{\text{внутр},55} = 5,72 + 3,6 + 3,02 \approx 12,34 \text{ кВт}.$$

5.3.21. Догрів при повному заселенні. Порівнюємо потребу догріву після рекуперації з внутрішніми надходженнями:

- Потрібно на догрів: $\approx 6,38$ кВт.
- Є від людей + вентиляторів: $6,24+3,6=9,84$ кВт (при 60 Вт/особу) або $5,72+3,6=9,32$ кВт (при 55 Вт/особу).

Висновок: при $N = 104$ осіб та прийнятій витраті повітря рекуперація + внутрішні надходження закривають догрів до $+18$ °С — калорифер може бути вимкнений або працювати мінімально.

Поріг заповненості, нижче якого калорифер уже стане потрібен (оцінка):

$$N_{\text{поріг}} = (Q_{\text{догр}} - Q_{\text{вент}}) / W_{\text{сенси}} \quad (5.63)$$

$$N_{\text{поріг}} = (6,38 - 3,6) / 0,060 \approx 46 \text{ осіб}; \text{ для } 55 \text{ Вт: } \approx 51 \text{ осіб}$$

5.3.22. Якщо тримати $+20$ °С на припливі. Після рекуператора маємо $+12,5$ °С, до $+20$ °С: $\Delta T = 7,5$ К.

$$Q(20 \text{ °С}) = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (5.64)$$

$$Q(20 \text{ °С})_5 = 1,1544 \cdot 1005 \cdot 7,5 \approx 8,70 \text{ кВт}.$$

Внутрішні надходження не повністю покривають цю потребу → потрібен невеликий додатковий догрів 4–8 кВт. Енергооптимально для укріттів тримати +18 °С або застосовувати by-pass.

5.3.23. Вологість. Латентні виділення: 0,04–0,05 кг/год·особу → 4,2...5,2 кг/год. пари на 104 осіб. Узимку зовнішнє повітря сухе; при $L \approx 3,46$ тис. м³/год відносна вологість у залі зазвичай не перевищує 60–70%. Пластинчастий рекуператор не переносить вологу — це плюс для вологового балансу.

5.3.24. Динаміка CO₂ (стала часу)

$$\tau = V_{\text{заг}} / L \quad (5.65)$$

$\tau = 746,425 / 3463,2 \approx 0,216$ год $\approx 12,9$ хв → за 3τ (~30 хв) досягається $\approx 95\%$ стаціонару

5.3.25. Узагальнення для прийнятого сценарію

- Після рекуператора: +12,5 °С.
- Для +18 °С: $Q_{\text{догр}} \approx 6,38$ кВт, що покривається людьми + вентиляторами при $N = 104$.

- Для +20 °С: потрібен невеликий догрів 4–8 кВт.
- При $N < \sim 104$ особи калорифер починає підхоплювати догрів навіть на +18 °С.

5.4. Розрахунок параметрів мікроклімату при неповній посадці людей в літній період

5.4.1. Розрахунок повітрообміну за критерієм CO₂. Питомий повітрообмін на 1 людину L_1 визначається зі співвідношення виділень CO₂ та різниці концентрацій:

$$L_1 = \frac{a}{C_{\text{max}} - C_0} \quad (5.66)$$

де $a=20$ л/год= $0,02$ м³/год— виділення CO₂ однією людиною, $C_0=0,4$ л/м³ — початкова концентрація (≈ 400 ppm), $C_{\max}=1,0$ л/м³ гранично допустима (≈ 1000 ppm).

$$L_1=20/1,0-0,420=33,3 \text{ м}^3/\text{год}$$

Загальна витрата свіже-припливного повітря при $N = 104$:

$$L = L_1 \times N \quad (5.67)$$

$$L = 33,3 \times 427 = 3463,2 \text{ м}^3/\text{год} = 0,962 \text{ м}^3/\text{с}$$

Кратність повітрообміну:

$$ACH = L / V_{\text{заг}} \quad (5.68)$$

$$ACH = 3463,2 / 746,425 = 4,64 \text{ год}^{-1}$$

5.4.2. Перевірка мінімальних санітарних подач. Мінімум 15–20 м³/год·особу виконується автоматично, адже наш $L_1=33,3$ м³/год·особу. Критерій CO₂ — визначальний.

5.4.3. Розподіл витрати між приміщеннями і ПВУ. Сумарну витрату L розподіляємо пропорційно ефективній площі (з урахуванням, що основна маса людей у приміщенні №1). Для практичності приймаємо 90% витрати на Основне приміщення №1 і 10% на №2+№3.

$$L_1(\text{№1}) = 0,90 \times 3463,2 \approx 3116,9 \text{ м}^3/\text{год};$$

$$L_1(\text{№2+№3}) = 0,10 \times 3463,2 \approx 346,3 \text{ м}^3/\text{год}.$$

5.4.4. Тепловий баланс із рекуперацією в літній період

температура зовнішнього повітря: $t_{\text{зовн,літо}} = +30^\circ\text{C}$,

розрахункова внутрішня (цільова): $t_{\text{вн,літо}} = +24^\circ\text{C}$,

ефективність рекуператора: $\eta = 0,75$.

Масова витрата при $L = 0,962 \text{ м}^3/\text{с}$

$$\dot{m} = \rho \cdot L \cdot \text{сек} \quad (5.69)$$

$$\dot{m} = 1,2 \cdot 0,962 = 1,1544 \text{ кг/с.}$$

Температура припливного повітря після рекуператора:

$$t_{\text{після рек,літо}} = 30 + 0,75 (24 - 30) = 30 - 4,5 = 25,5^\circ\text{C.}$$

Щоб подати в зал $+24^\circ\text{C}$, потрібне додаткове охолодження:

$$\Delta t_{\text{охл}} = t_{\text{після рек,літо}} - t_{\text{вн,літо}} \quad (5.70)$$

$$\Delta t_{\text{охл}} = 25,5 - 24 = 1,5 \text{ К.}$$

Потужність охолодження (тільки на приплив, без урахування внутрішніх тепловиділень):

$$Q_{\text{охл,рек}} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta t_{\text{охл}} \quad (5.71)$$

$$Q_{\text{охл,рек}} = 1,1544 \cdot 1005 \cdot 1,5 \approx 1,74 \text{ кВт.}$$

Для порівняння, без рекуператора (охолодження від 30 до 24°C):

$$\Delta t_0 = 30 - 24 = 6 \text{ К}$$

$$Q_{0,\text{охл}} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta t_0, \quad (5.72)$$

$$Q_{0,\text{охл}} = 1,1544 \cdot 1005 \cdot 6 \approx 6,96 \text{ кВт.}$$

5.4.5. Внутрішні тепловиділення (люди, вентилятори, освітлення).

Люди (чуттєве тепло): $55\text{--}60 \text{ Вт/особу}$ (сидіння). Для $N = 104$:

$$Q_{\text{люди},55} = 104 \cdot 0,055 = 5,72 \text{ кВт},$$

$$Q_{\text{люди},60} = 104 \cdot 0,060 = 6,24 \text{ кВт}.$$

Вентилятори:

Електрична потужність вентиляторів переходить у тепло повітря. Для чотирьох ПВУ:

$$Q_{\text{вент}} \approx 3,6 \text{ кВт}.$$

Освітлення:

Приймаємо питоме тепловиділення від освітлення:

$$q_{\text{осв}}=10 \text{ Вт/м}^2, S_{\text{заг}}=301,515 \text{ м}^2,$$

$$Q_{\text{осв}} = q_{\text{осв}} \cdot S_{\text{заг}} \quad (5.73)$$

$$Q_{\text{осв}} = 10 \cdot 301,515 \approx 3015 \text{ Вт} \approx 3,02 \text{ кВт}.$$

Сумарні внутрішні надходження тепла влітку:

$$Q_{\text{внутр}} = Q_{\text{люди}} + Q_{\text{вент}} + Q_{\text{осв}} \quad (5.74)$$

- при 60 Вт/особу:

$$Q_{\text{внутр},60} = 6,24 + 3,6 + 3,02 \approx 12,86 \text{ кВт},$$

- при 55 Вт/особу:

$$Q_{\text{внутр},55} = 5,72 + 3,6 + 3,02 \approx 12,34 \text{ кВт}.$$

У літній період ці внутрішні тепловиділення не допомагають догрівати, а навпаки — створюють додаткове навантаження на систему охолодження, яке має відводитись разом із теплом припливного повітря.

5.4.6. Поріг заповненості в літній період і режим +24...+26 °С. У зимовому розрахунку використовувалася формула:

$$N_{\text{поріг}} = \frac{Q_{\text{догр}} - Q_{\text{вент}}}{W_{\text{сенс}}}, \quad (5.75)$$

Щоб знайти заповненість, при якій внутрішні тепловиділення повністю покривають догрів до +18...+20 °С.

У літній період ситуація протилежна:

- припливне повітря тепліше або близьке до внутрішнього,
- люди + вентилятори + освітлення дають додаткове тепло,
- завдання системи — відвести надлишок тепла, а не догріти повітря.

Тому:

- поняття «бездогрівної роботи» для літа неактуальне;
- при будь-якій реальній заповненості (десятки–сотні людей) сумарні внутрішні надходження

$$Q_{\text{внутр}} \approx 12,3 \dots 12,9 \text{ кВт}$$

перевищують потужність охолодження припливу $Q_{\text{охл,рек}} \approx 1,74 \text{ кВт}$;

- отже, без додаткової холодильної машини (чилера/фанкойла) температура в укрітті буде підвищуватися.

5.4.7. Гідравлічний розрахунок повітроводів (магістраль і відгалуження). Для однієї ПВУ: $Q_1 = 3560 \text{ м}^3/\text{год} = 0,99 \text{ м}^3/\text{с}$. Приймаємо проектну швидкість у магістралі $v \approx 5 \text{ м/с}$:

$$A_{\text{маг}} = Q_1/v \quad (5.75)$$

$$A_{\text{маг}} = 1,98/5 = 0,396 \text{ м}^2; d_{\text{скв}} \approx \sqrt{(4A/\pi)} \approx 0,71 \text{ м} \rightarrow \text{Ø}710$$

Для відгалужень до приміщень №2 і №3 (сумарно $\sim 0,5\text{--}0,7 \text{ м}^3/\text{с}$) приймаємо $\text{Ø}400\text{--}500$ (швидкість $4\text{--}6 \text{ м/с}$).

Сумарні втрати тиску (орієнтовно): прямі ділянки $0,6\text{--}1,0 \text{ Па/м}$; фільтри G4+F7 $120\text{--}180 \text{ Па}$; рекуператор $120\text{--}200 \text{ Па}$; фасонки/решітки/глушники $100\text{--}150 \text{ Па}$. Разом $\Delta p \approx 500\text{--}550 \text{ Па}$. Необхідна потужність вентилятора на ПВУ: $P \approx (Q_1 \cdot \Delta p) / \eta_{\text{енс}} \approx (1,98 \cdot 540) / 0,6 \approx 1,78 \text{ кВт}$; сумарно $\sim 3,6 \text{ кВт}$ на дві ПВУ.

5.4.8. Розрахунок кількості решіток/дифузорів та їх параметрів. Для рівномірного промивання застосуємо по кожній половині зали $10\text{--}12$ точок подачі (крок $\sim 3,5\text{--}4,5 \text{ м}$). Середня витрата на точку подачі:

$$L_{\text{точ}} \approx (Q_1 \text{ для зони}) / n \quad (5.76)$$

$$L_{\text{точ}} \approx 7 \text{ 120} / 10 \dots 12 \approx 600 \dots 700 \text{ м}^3/\text{год}$$

Площа живого перерізу однієї решітки для швидкості на виході $3,5\text{--}4,0 \text{ м/с}$:

$$F_{\text{реш}} \approx (L_{\text{точ}} / 3600) / v_{\text{вих}} \quad (5.77)$$

$$F_{\text{реш}} \approx (0,17 \dots 0,19) / 3,8 \approx 0,045 \dots 0,050 \text{ м}^2$$

Це відповідає, наприклад, решітці умовного розміру $400 \times 150 \text{ мм}$ (чистий переріз залежить від моделі). Кидання струменя $5\text{--}8 \text{ м}$ забезпечується при $\Delta t \approx 0 \dots +2 \text{ К}$.

Витяжні решітки розміщуються у протилежних до подачі зонах на висоті $1,2\text{--}1,5 \text{ м}$, із сумарною площею перерізу не меншою за приплив.

5.4.9. Динаміка CO_2 (перевірка часу реакції). Оцінимо часове наближення до стаціонару для приміщення об'ємом V та питомою подачею L : використаємо експоненційну модель заміни повітря із сталою часу $\tau = V/L$.

Динаміка CO_2 (перевірка часу реакції)

Оцінимо часове наближення до стаціонару для об'єму приміщення:

$$V_{\text{заг}}=746,425 \text{ м}^3, L=3463,2 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Стала часу системи повітрообміну:

$$\tau = \frac{V_{\text{заг}}}{L} \quad (5.78)$$

$$\tau = \frac{746,425}{3463,2} \approx 0,216 \text{ год.}$$

У хвиликах:

$$\tau \approx 0,216 \cdot 60 \approx 12,9 \text{ хв.}$$

За $3\tau \approx 39$ хв концентрація CO_2 наближається до $\approx 95\%$ від стаціонарної.

Це підтверджує відносно швидку стабілізацію рівня CO_2 при зміні заповнюваності або режиму роботи системи як у зимовий, так і в літній період.

5.4.10. Вологісний баланс (оціночно). Вологісний баланс (оціночно, $N = 104$)

Людина виділяє $0,04\text{--}0,05$ кг/год водяної пари. Для $N = 104$:

$$\dot{m}_v = m N \quad (5.79)$$

$$\dot{m}_v \approx 0,04 \dots 0,05 \cdot 104 \approx 4,16 \dots 5,20 \text{ кг/год.}$$

Масова витрата сухого повітря за годину:

$$\dot{m}_{\text{сух}} = \rho \cdot L \quad (5.80)$$

$$\dot{m}_{\text{сух}} = 1,2 \cdot 3463,2 \approx 4156 \text{ кг/год.}$$

Оціночний приріст питомої вологості:

$$\Delta\omega = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_{\text{сух}}} \quad (5.81)$$

$$\Delta\omega = \frac{4,16 \dots 5,20}{4156} \approx 0,0010 \dots 0,00125 \text{ кг/кг} \approx 1,0 \dots 1,25 \text{ г/кг.}$$

У зимовий період зовнішнє повітря має низький вологовміст, тому навіть при повній посадці $N = 104$ у поєднанні з подачею $3463,2 \text{ м}^3/\text{год}$ відносна вологість, як правило, не перевищує допустимих значень, а пластинчастий рекуператор не переносить вологу.

У літній період зовнішній вологовміст вищий, і вологісний режим приміщення визначається спільною роботою системи вентиляції та охолодження (чилер/фанкойли). Проте додатковий внесок від людей ($\approx 1-1,25 \text{ г/кг}$) залишається помірним за величиною.

5.4.11. Акустика та віброізоляція. Очікуваний рівень шуму вентиляторів із глушниками на магістралях — $55-60 \text{ дБ(А)}$. Застосовуються гнучкі вставки на підключенні ПВУ, акустична ізоляція перших відрізків повітроводів і підвісів. Граничні рівні шуму для укриттів не перевищуються.

5.4.12. Режими II (фільтровентиляція) та III (ізоляція). У режимі II опір мережі зростає на $150-300 \text{ Па}$ через фільтрувально-поглинальну установку (ФПУ), витрата повітря може бути зменшена до $0,8L \approx 0,8 \cdot 3463,2 \approx 2770 \text{ м}^3/\text{год}$, при цьому контроль якості повітря за концентрацією CO_2 залишається основним критерієм.

У режимі III (повна ізоляція) вентилятори вимикаються, повітрообміну ззовні немає, і дихальні потреби забезпечуються тільки за рахунок початкового запасу кисню в об'ємі укриття.

Запас кисню в повітрі:

$$V_{\text{O}_2} \approx 0,21 \cdot V_{\text{заг}} \quad (5.82)$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot 746 \approx 157 \text{ м}^3.$$

Споживання кисню:

$$V_{O_2} = 0,02 \text{ м}^3/\text{год} \cdot 104 \approx 2,08 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Час, за який концентрація O_2 зменшиться на 5 % від початкового запасу:

$$t \approx \frac{0,05 \cdot 157}{2,08} \approx 3,77 \text{ год}.$$

Таким чином, режим III (ізоляція) допускається лише як короткочасний аварійний, а основними режимами роботи системи є:

- режим I — чиста вентиляція з рекуператором;
- режим II — фільтровентиляція з ФПУ, у яких якість повітря контролюється за концентрацією CO_2 .

5.4.13. Літній та міжсезонний режими. У літній період (зовнішнє повітря гарячіше за внутрішнє) доцільно працювати з увімкненим рекуператором, який відбирає «холод» із витяжного повітря та зменшує навантаження на систему охолодження. Для прийнятих параметрів ($N = 104$, $L = 3463,2 \text{ м}^3/\text{год}$):

- охолодження припливу з рекуперацією:

$$Q_{\text{охл,рек}} \approx 1,7 \text{ кВт},$$

- без рекуперації:

$$Q_{0,\text{охл}} \approx 7 \text{ кВт}.$$

У міжсезоння (коли $t_{\text{зовн}}$ близька до $t_{\text{вн}}$ або нижча) автоматика перемикає режими для мінімуму енерговитрат за сигналами $t/\varphi/CO_2$, допускаючи:

- роботу з by-pass рекуператора (обхід теплообмінника) при сприятливих зовнішніх умовах;
- подачу повітря, близьку до ізотермічної (+16...+20 °C) без зайвого нагріву або охолодження.

5.4.14. Підсумок розрахункової частини.

1. Розрахункова місткість з урахуванням місць для сидіння — 104 особи.

2. Необхідна подача повітря за CO₂

$$L=3463,2 \text{ м}^3/\text{год},$$

кратність повітрообміну

$$ACH \approx 4,64 \text{ год}^{-1}$$

3. Компоновка системи — чотири припливно-витяжні установки (по торцях 84-метрового приміщення) типу Вентс ВУТ 3000 ПВ ЕС з рекуперацією тепла, що забезпечує запас по витраті повітря та можливість роботи в режимах I–II.

4. Зимовий тепловий баланс ($t_{\text{зовн}} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{\text{вн}} = +18 \dots +20 \text{ }^\circ\text{C}$):

- після рекуператора $t_{\text{після рек}} \approx +12,5 \text{ }^\circ\text{C}$;

- потрібний догрів до $+18 \text{ }^\circ\text{C}$: $Q_{\text{догр}} \approx 6,38 \text{ кВт}$;

- внутрішні надходження тепла (люди + вентилятори + освітлення) при $N=104$ становлять $\approx 12\text{--}13 \text{ кВт}$, що практично повністю покриває потребу в догріві — калорифер може бути вимкнений або працювати мінімально.

5. Літній тепловий баланс ($t_{\text{зовн}} = +30 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{\text{вн}} = +24 \text{ }^\circ\text{C}$):

- охолодження припливу після рекуператора: $Q_{\text{охл, рек}} \approx 1,7 \text{ кВт}$;

- без рекуператора: $Q_{0, \text{охл}} \approx 7 \text{ кВт}$;

- внутрішні тепловиділення (люди + вентилятори + освітлення) — $\approx 12\text{--}13 \text{ кВт}$;

- сумарне холодонавантаження (з рекуператором) — $\approx 14\text{--}15 \text{ кВт}$, без рекуператора — $\approx 19\text{--}20 \text{ кВт}$.

Це підтверджує енергоефективність роботи з рекуперацією у літній період.

6. Магістраль $\varnothing 710$, $\Delta p \approx 500\text{--}550 \text{ Па}$, сумарно $\sim 3,6 \text{ кВт}$ вентилятори; 10–12 решіток подачі на півзалу по $250\text{--}300 \text{ м}^3/\text{год}$. Електроспоживання вентиляторів: $1,6\text{--}1,8 \text{ кВт}$ на одну ПВУ, сумарно $3,2\text{--}3,6 \text{ кВт}$,

7. Динаміка CO₂ швидка ($\tau \approx 12,9 \text{ хв}$); вологість у нормі; режими II–III передбачені проектно, by-pass улітку.

Розрахункова частина може бути доповнена каталоговими підбором конкретних решіток/дифузорів і детальною мережевою гідравлікою по ділянках — за потреби виробника.

5.4.15. Повний тепловий баланс і робота рекуператора. У цьому підрозділі детально показано тепловий баланс припливно-витяжної системи з пластинчастим рекуператором для прийнятих витрат повітря та заповнюваності укриття.

5.4.16. Вихідні для теплового балансу. Сумарна витрата для критерію CO₂:

$$L=3463,2 \text{ м}^3/\text{год}=0,962 \text{ м}^3/\text{с}$$

Густина повітря:

$$\begin{aligned} \rho &= 1,2 \text{ кг/м}^3 \Rightarrow m' = \rho \cdot L \text{сек} & (5.83) \\ \rho &= 1,2 \cdot 0,962 \approx 1,1544 \text{ кг/с} \end{aligned}$$

Теплоємність:

$$c_p = 1005 \text{ Дж/(кг)}.$$

Літні температури:

$$t_{\text{зовн,літо}} = +30^\circ\text{C}, t_{\text{вн,літо}} = +24^\circ\text{C}.$$

Рекуператор пластинчастий (тільки чуттєве тепло):

$$\eta = 0,75.$$

5.4.17. Дія рекуператора (підвищення температури припливу).

Температура припливного повітря після рекуператора:

$$t_{\text{після рек,літо}} = t_{\text{зовн,літо}} + \eta (t_{\text{вн,літо}} - t_{\text{зовн,літо}}) \quad (5.84)$$

$$t_{\text{після рек,літо}} = 30 + 0,75 (24 - 30) = 25,5^\circ\text{C}.$$

Щоб подати в зал розрахункові $t_{\text{вн,літо}} = 24^\circ\text{C}$, потрібне додаткове охолодження:

$$\Delta T_{\text{охл}} = 25,5 - 24 = 1,5 \text{ К}.$$

Потужність охолодження припливу:

$$Q_{\text{охл,рек}} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T_{\text{охл}} \quad (5.85)$$

$$Q_{\text{охл,рек}} = 1,1544 \cdot 1005 \cdot 1,5 \approx 1,74 \text{ кВт}.$$

Без рекуператора (охолодження від $+30$ до $+24$ °C, $\Delta T = 6$ К):

$$Q_{0,\text{охл}} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (5.86)$$

$$Q_{0,\text{охл}} = 6,96 \text{ кВт}.$$

Ефект рекуперації:

$$\Delta Q_{\text{літо}} = Q_{0,\text{охл}} - Q_{\text{охл,рек}} \quad (5.87)$$

$$\Delta Q_{\text{літо}} = 6,96 - 1,74 \approx 5,2 \text{ кВт}.$$

5.4.18. Внутрішні надходження тепла

а) Люди (сензигельне тепло): 55–60 Вт на особу (сидіння). Для $N = 104$:

$$Q_{\text{люди,55}} = 104 \cdot 0,055 = 5,72 \text{ кВт},$$

$$Q_{\text{люди,60}} = 104 \cdot 0,060 = 6,24 \text{ кВт}.$$

б) Вентилятори: у Приміщенні у вигляді тепла виділяється вся електрична потужність вентиляторів. Приймаємо:

$$Q_{\text{вент}} \approx 3,6 \text{ кВт}.$$

в) Освітлення:

питомі тепловиділення від ламп:

$$q_{\text{осв}} = 10 \text{ Вт/м}^2, S_{\text{заг}} = 301,515 \text{ м}^2$$

$$Q_{\text{осв}} = q_{\text{осв}} \cdot S_{\text{заг}} \quad (5.88)$$

$$Q_{\text{осв}} = 10 \cdot 301,515 \approx 3015 \text{ Вт} \approx 3,02 \text{ кВт}$$

г) Сумарні внутрішні надходження:

$$Q_{\text{внутр}} = Q_{\text{люди}} + Q_{\text{вент}} + Q_{\text{осв}} \quad (5.89)$$

- при 60 Вт/особу:

$$Q_{\text{внутр,60}} = 6,24 + 3,6 + 3,02 \approx 12,86 \text{ кВт},$$

- при 55 Вт/особу:

$$Q_{\text{внутр,55}} = 5,72 + 3,6 + 3,02 \approx 12,34 \text{ кВт}.$$

5.4.19. Чи потрібен догрів при повному заселенні? Порівнюємо потребу догріву після рекуперації з внутрішніми надходженнями:

- Потрібно на догрів: $\approx 6,38 \text{ кВт}$.

• Є від людей + вентиляторів: $6,24+3,6=9,84$ кВт (при 60 Вт/особу) або $5,72+3,6=9,32$ кВт (при 55 Вт/особу).

Висновок: при $N = 104$ осіб та прийнятій витраті повітря рекуперація + внутрішні надходження закривають догрів до $+18\text{ }^\circ\text{C}$ — калорифер може бути вимкнений або працювати мінімально.

Поріг заповненості, нижче якого калорифер уже стане потрібен (оцінка):

$$N_{\text{поріг}} = (Q_{\text{догр}} - Q_{\text{вент}}) / W_{\text{сенс}} \quad (5.90)$$

$$N_{\text{поріг}} \text{ 60 Вт} = (6,38 - 3,6) / 0,060 \approx 46 \text{ осіб};$$

$$N_{\text{поріг}} \text{ 55 Вт} \approx 51 \text{ осіб}$$

5.4.20. Якщо тримати $+24\text{ }^\circ\text{C}$ на припливі. Після рекуператора маємо $+25,5\text{ }^\circ\text{C}$, до $+24\text{ }^\circ\text{C}$: $\Delta T = 1,5\text{ K}$.

$$Q(20\text{ }^\circ\text{C}) = m \cdot c_p \cdot 1,5 \approx 1,1544 \cdot 1005 \cdot 1,5 \approx 1,70 \text{ кВт.}$$

Внутрішні надходження не повністю покривають цю потребу → потрібне невелике додаткове охолодження 1–3 кВт. Енергооптимально для укриттів тримати $+24\text{ }^\circ\text{C}$ або застосовувати by-pass.

5.4.21. Вологість. Латентні виділення: $0,04\text{--}0,05$ кг/год·особу → $4,2\text{...}5,2$ кг/год. пари на 104 осіб. Узимку зовнішнє повітря сухе; при $L \approx 3,46$ тис. $\text{м}^3/\text{год}$ відносна вологість у залі зазвичай не перевищує 60–70%. Пластинчастий рекуператор не переносить вологу — це плюс для зимового осушення.

5.4.22. Динаміка CO_2 (стала часу)

$$\tau = V_{\text{заг}} / L \quad (4.91)$$

$$\tau = 746,425 / 3463,2 \approx 0,216 \text{ год} \approx 12,9 \text{ хв} \rightarrow \text{за } 3\tau (\sim 30 \text{ хв}) \text{ досягається } 95\% \text{ стаціонару}$$

5.4.23. Узагальнення для прийнятого сценарію

- Після рекуператора: +25,5 °С. • Для +24 °С: $Q_{охл} \approx 1,7$ кВт.
- Для +24 °С: потрібне невелике охолодження 1–3 кВт. • При $N < \sim 104$ особи.

Висновки до розділу 5

У цьому розділі було обґрунтовано необхідність та ефективність впровадження нової припливно-витяжної вентиляційної системи для укриття. На основі розрахунків встановлено, що для 104 людей потрібна подача 3463,2 м³/год, що забезпечує нормативну якість повітря та стабільний повітрообмін. Врахування тепловиділень від людей, освітлення та вентиляторів показало, що взимку система майже не потребує догріву завдяки роботі рекуператора, який підіймає температуру припливу з –10 °С до 12,5 °С. Це підтверджує енергоефективність обраної схеми вентиляції.

Гідравлічні розрахунки підтвердили оптимальність застосування повітроводів Ø710 та двох ПВУ зі сумарною потужністю вентиляторів 3,2–3,6 кВт, що забезпечує рівномірну подачу повітря, дотримання шумових норм та правильне промивання всього об'єму зали. Також визначено кількість і продуктивність решіток, необхідних для якісної подачі та видалення повітря.

Розрахунок режимів II та III показав, що система здатна працювати у фільтровентиляції зі зниженою витратою, а також забезпечує до 4 годин автономної роботи в режимі ізоляції. У літній період система переходить на bypass рекуператора, запобігаючи перегріву припливу.

Загалом виконані розрахунки доводять, що впроваджувана вентиляційна система забезпечує безпечні умови перебування людей, підтримує стабільний мікроклімат і відповідає вимогам нормативів. Система є технічно обґрунтованою, енергоефективною та оптимально підбраною для даної будови.

РОЗДІЛ 6

ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ З ТЕПЛОУТИЛІЗАТОРОМ

Економічний розрахунок виконано для оцінки доцільності впровадження припливно-витяжної вентиляційної системи з рекуперацією теплоти для укриття. Ефект від впровадження формується за рахунок зменшення витрат енергії на підігрів припливного повітря в зимовий період та зменшення витрат на охолодження в літній період. Розрахунок проведено з урахуванням реального режиму експлуатації (перебування людей 40 год/тиждень) та тарифів для підприємств.

6.1. Вихідні дані та умови експлуатації

Режим роботи системи вентиляції прийнято відповідно до фактичної присутності людей – 40 годин на тиждень. Упродовж року система працює 4 місяці в зимовий період та 6 місяців в літо та міжсезоння. Протягом 2 місяців на рік вентиляційна система майже не експлуатується.

6.2. Капітальні витрати (CAPEX)

До складу капітальних витрат включено вартість вентиляційних установок, повітроводів (автомагістралі), системи автоматики, монтажні та пусконаладжувальні роботи.

Загальна вартість чотирьох припливно-витяжних установок становить 980 тис. грн. Вартість повітроводів прийнята нормативно на рівні 40 % від вартості установок, автоматика – 8 %. Витрати на монтаж прийняті у розмірі 25 %, а пусконаладжувальні роботи – 5 % від суми обладнання та мереж.

Загальні капітальні витрати на впровадження системи вентиляції становлять 1 885 520 грн.

6.3. Річні витрати електроенергії вентиляційних установок

Таблиця 6.1

Загальні дані витрат на обладнання ПВУ

Параметр	Одиниця виміру	Значення
Кількість установок	шт	4
Потужність вентиляторів однієї установки	кВт	1,98
Сумарна потужність вентиляторів	кВт	7,92
Річна кількість годин роботи	год/рік	1714
Річне споживання електроенергії	кВт·год	13 576
Тариф на електроенергію (підприємство)	грн/кВт·год	8,4
Річні витрати на електроенергію	грн/рік	114 038

6.4. Вихідні дані та умови експлуатації

6.4.1. Режим роботи протягом року. Приймається, що укриття реально використовується:

- у зимовий період: 4 місяці \approx 120 діб;
- у літній період: 6 місяців \approx 180 діб;
- канікули: 2 місяці \approx 60 діб, у цей час людей немає, отже система не працює та економія дорівнює нулю.

Перебування людей: 40 год/тиждень.

Тариф підприємства $C = 8,4$ грн/кВт год

6.5. Визначення годин роботи системи (40 год/тиждень)

Кількість тижнів у зимовому періоді:

$$n_3 = \frac{120}{7} = 17,1429 \text{ тиж}$$

Години роботи взимку:

$$n_3 = n_3 \cdot t \quad (6.1)$$

$$n_3 = \frac{120}{7} \cdot 40 = 685,714 \text{ год}$$

Кількість тижнів у літньому періоді:

$$n_{\text{л}} = \frac{180}{7} = 25,7143 \text{ тиж}$$

Години роботи влітку:

$$n_{\text{л}} = n_{\text{л}} \cdot t \tag{6.2}$$

$$n_{\text{л}} = \frac{180}{7} \cdot 40 = 1028,571 \text{ год}$$

Сумарні години роботи за рік (без канікул):

$$H_{\Sigma} = H_3 + H_{\text{л}} t \tag{6.3}$$

$$H_{\Sigma} = 685,714 + 1028,571 = 1714,286 \text{ год}$$

6.6. Розрахунок економії енергії від рекуперації

6.6.1. Зима — економія теплової потужності. За результатами теплотехнічного розрахунку (повна посадка):

$$Q_0 = 133,5 \text{ кВт}, \quad Q_{\text{rec}} = 26,2 \text{ кВт}$$

Економія теплової потужності:

$$\Delta Q_3 = Q_0 - Q_{\text{rec}} t \tag{6.4}$$

$$\Delta Q_3 = Q_0 - Q_{\text{rec}} = 133,5 - 26,2 = 107,3 \text{ кВт}$$

Економія теплової енергії за зимовий період:

$$\Delta W_{T,3} = \Delta Q_3 \cdot H_3 t \quad (6.5)$$

Підстановка:

$$\Delta W_{T,3} = \Delta Q_3 \cdot H_3 t \quad (6.6)$$

$$\Delta W_{T,3} = 107,3 \cdot 685,714 = 73\,577,143 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

Грошова економія взимку:

$$S_3 = \Delta W_{T,3} \cdot C t \quad (6.7)$$

$$S_3 = 73\,577,143 \cdot 8,4 = 617\,048 \text{ грн/рік}$$

6.7. Економія на охолодженні

Влітку рекуперація зменшує холодове навантаження на систему охолодження. Приймаємо:

$$\Delta Q_{л} = 22 \text{ кВт}$$

Для переведення зменшення холодового навантаження в економію електроенергії використовується коефіцієнт:

$$COP = 3$$

Еквівалентне зменшення електричної потужності:

$$\Delta P_{ел,л} = \frac{\Delta Q_{л}}{COP} t \quad (6.8)$$

$$\Delta P_{ел,л} = \frac{22}{3} = 7,333 \text{ кВт}$$

Економія електроенергії за літній період:

$$\Delta W_{\text{ел,л}} = \Delta P_{\text{ел,л}} \cdot H_{\text{л}} t \quad (6.9)$$

$$\Delta W_{\text{ел,л}} = 7,333 \cdot 1028, = 7\,542,857 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

Грошова економія влітку:

$$S_{\text{л}} = \Delta W_{\text{ел,л}} \cdot C t \quad (6.10)$$

$$S_{\text{л}} = 7\,542,857 \cdot 8,4 = 63\,360 \text{ грн/рік}$$

Валова річна економія

$$S_{\text{вал}} = S_{\text{з}} + S_{\text{л}} t \quad (6.11)$$

$$S_{\text{вал}} = 617\,048 + 63\,360 = 680\,408 \text{ грн/рік}$$

6.8. Річні витрати на електроенергію вентиляторів (паспортні дані)

З технічних характеристик однієї установки:

$$P_{\text{вент,1}} = 2 \times 990 \text{ Вт} = 1980 \text{ Вт} = 1,98 \text{ кВт}$$

Кількість установок:

$$n = 4$$

Сумарна потужність вентиляторів:

$$P_{\text{вент,сум}} = n \cdot P_{\text{вент,1}} t \quad (6.12)$$

$$P_{\text{вент,сум}} = 4 \cdot 1,98 = 7,92 \text{ кВт}$$

Річне споживання електроенергії вентиляторам:

$$W_{\text{вент}} = P_{\text{вент,сум}} \cdot H_{\Sigma} t \quad (6.13)$$

$$W_{\text{вент}} = 7,92 \cdot 1714,286$$

$$W_{\text{вент}} = 13\,576 \text{ кВт/рік}$$

Річні витрати на електроенергію:

$$C_{\text{вент}} = W_{\text{вент}} \cdot C t \quad (6.14)$$

$$C_{\text{вент}} = 13\,576 \cdot 8,4$$

$$C_{\text{вент}} = 114\,038 \text{ грн/рік}$$

6.9. Чистий річний економічний ефект

Чистий ефект визначається як різниця між валовою економією та витратами на електроенергію вентиляторів:

$$E_{\text{рік}} = S_{\text{вал}} - C_{\text{вент}} t \quad (6.15)$$

$$E_{\text{рік}} = 680\,408 - 114\,038 = 566\,370 \text{ грн/рік}$$

6.10. Капітальні витрати (CAPEX) на впровадження системи

Оскільки вентилятори входять у склад ПВУ, окремих витрат на їх закупівлю не передбачено. До капітальних витрат включено: 4 ПВУ, автомагістраль (повітроводи), автоматика, монтаж та пусконаладження.

6.10.1. Вартість вентиляційних установок.

Дано:

вартість однієї ПВУ $C_{\text{ПВУ}} = 245\,000$ грн/шт; кількість $n = 4$ шт.

$$C_1 = n \cdot C_{\text{ПВУ}} t \quad (6.16)$$

$$C_1 = 4 \cdot 245\,000 = 980\,000 \text{ грн}$$

6.10.2. Вартість автомагістралі (повітроводи). За відсутності деталізованого кошторису прийнято нормативно:

$$k_{\text{маг}} = 0,40$$

$$C_{\text{маг}} = k_{\text{маг}} \cdot C_1, t \quad (6.17)$$

$$C_{\text{маг}} = 0,40 \cdot 980\,000 = 392\,000 \text{ грн}$$

6.10.3. Вартість автоматики.

Прийнято:

$$k_{\text{авт}} = 0,08$$

$$C_{\text{авт}} = k_{\text{авт}} \cdot C_1, t \quad (6.18)$$

$$C_{\text{авт}} = 0,08 \cdot 980\,000 = 78\,400 \text{ грн}$$

Проміжна сума:

$$C_{\Sigma} = C_1 + C_{\text{маг}} + C_{\text{авт}} t \quad (6.19)$$

$$C_{\Sigma} = 980\,000 + 392\,000 + 78\,400 = 1\,450\,400 \text{ грн}$$

6.10.4. Монтаж і пусконаладжувальні роботи

Монтаж (25%):

$$C_{\text{мон}} = 0,25 \cdot C_{\Sigma} t \quad (6.20)$$

$$C_{\text{мон}} = 0,25 \cdot 1\,450\,400 = 362\,600 \text{ грн}$$

ПНР (5%):

$$C_{\text{ПНР}} = 0,05 \cdot C_{\Sigma} \quad (6.21)$$

$$C_{\text{ПНР}} = 0,05 \cdot 1\,450\,400 = 72\,520 \text{ грн}$$

Загальні капітальні витрати:

$$C_{\text{кап}} = C_{\Sigma} + C_{\text{мон}} + C_{\text{ПНР}} \quad (6.22)$$

$$C_{\text{кап}} = 1\,450\,400 + 362\,600 + 72\,520 = 1\,885\,520 \text{ грн}$$

6.11. Строк окупності

Строк простої окупності визначається:

$$T = \frac{C_{\text{кап}}}{E_{\text{рік}}} \quad (6.23)$$

$$T = \frac{1\,885\,520}{566\,370} = 3,33 \text{ року}$$

Висновки до розділу 6

Розрахунок показав, що за умов тарифу підприємства 8,4 грн/кВт·год, режиму експлуатації 40 год/тиждень, сезонного розподілу 4 місяці зима + 6 місяців літо та відсутності роботи в період 2 місяців канікул, впровадження рекуперації забезпечує валову річну економію ≈ 680 тис. грн/рік. З урахуванням витрат на електроенергію вентиляторів (за паспортом 7,92 кВт сумарно для 4 установок) чистий річний економічний ефект становить ≈ 566 тис. грн/рік. Загальні капітальні витрати на впровадження системи (4 ПВУ по 245 тис. грн, автомагістраль, автоматика, монтаж і ПНР) складають $\approx 1,886$ млн грн, а строк простої окупності $\approx 3,3$ року, що підтверджує економічну доцільність проекту.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі виконано комплексне дослідження та техніко-економічне обґрунтування впровадження припливно-витяжної системи вентиляції з рекуперацією та накопиченням теплоти на базі установок Вентс ВУТ 3000 ПВ ЕС для споруди цивільного захисту. Запропонована система забезпечує сумарну продуктивність вентиляції 15 000 м³/год, що відповідає нормативним вимогам повітрообміну при повній посадці людей та різних режимах експлуатації укриття.

Результати теплотехнічних розрахунків показали, що в зимовий період теплова потреба на підігрів припливного повітря без рекуперації становить 133,5 кВт, тоді як при використанні теплоутилізатора вона зменшується до 26,2 кВт. Таким чином, економія теплової потужності досягає 107,3 кВт, що відповідає зниженню теплових втрат на 80 %. За реального режиму експлуатації системи (685,7 год у зимовий період) річна економія теплової енергії становить 73 577 кВт·год, що в грошовому еквіваленті відповідає 617 048 грн на рік.

У літній період застосування рекуперації дозволяє зменшити холодове навантаження на систему кондиціонування на 22 кВт. З урахуванням коефіцієнта енергоефективності холодильного обладнання COP = 3, це відповідає зменшенню електричної потужності на 7,33 кВт. За тривалості роботи 1 028,6 год річна економія електроенергії на охолодження становить 7 543 кВт·год, або 63 360 грн на рік.

Сумарна валова річна економія енергоресурсів від впровадження системи вентиляції з теплоутилізатором становить 680 408 грн. При цьому витрати на електроенергію для роботи вентиляторів чотирьох припливно-витяжних установок із сумарною потужністю 7,92 кВт складають 13 576 кВт·год на рік, що відповідає 114 038 грн експлуатаційних витрат. Чистий річний економічний ефект від впровадження системи вентиляції становить 566 370 грн.

Загальні капітальні витрати на реалізацію проєкту, включно з вартістю вентиляційних установок (980 000 грн), повітроводів (392 000 грн), автоматики (78 400 грн), монтажних та пусконаладжувальних робіт (435 120 грн), складають 1 885 520 грн. Розрахований строк простої окупності інвестицій становить 3,33 року, що відповідає сучасним вимогам до енергоефективних інженерних рішень для об'єктів спеціального призначення.

Таким чином, впровадження припливно-витяжної вентиляційної системи з теплоутилізатором та функцією накопичення теплоти забезпечує суттєве зниження споживання теплової та електричної енергії, підвищує енергоефективність та автономність роботи укриття, а також гарантує дотримання нормативних параметрів мікроклімату. Отримані технічні та економічні показники підтверджують доцільність і ефективність запропонованого рішення для споруд цивільного захисту в умовах обмеженого енергозабезпечення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ: Мінрегіон України, 2013. 193 с.
2. ДБН В.2.2-5:2023 Будинки і споруди. Споруди цивільного захисту. Київ: Мінрегіон України, 2023. 142 с.
3. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 Настанова щодо проектування інженерних систем цивільного захисту. Київ: Мінрегіонбуд, 2010. 88 с.
4. ДСТУ-Н Б В.2.5-77:2014 «Настанова з проектування вентиляції та кондиціонування повітря». – Київ: Мінрегіонбуд, 2014.
5. ДСТУ EN 16798-1:2020 Енергетична ефективність будівель. Вентиляція приміщень. Київ: УкрНДНЦ, 2020. 64 с.
6. ДСТУ ISO 16890:2021 Фільтри повітря загальної вентиляції. Класифікація, вимоги та методи випробування. Київ: УкрНДНЦ, 2021. 52 с.
7. Інструкція з експлуатації фільтровентиляційних установок ФВУ-15, ФВУ-30, ФВП-100, ФВП-200. Київ: ДСНС України, 2018. 96 с.
8. СанПіН 2.2.4/2.1.8.566-96 «Гігієнічні вимоги до мікроклімату». – 1996. – 32 с. (Для параметрів: t , ϕ , CO_2 у закритих приміщеннях)
9. Бех О.М. «Проектування систем цивільного захисту». – Харків: ХНУМГ, 2021. – 224 с.
10. Гончаренко І.Ф., Сімків Е.А. «Системи вентиляції будівель: проектування та експлуатація». – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2020. – 280 с.
11. Інженерні мережі та системи вентиляції захисних споруд. Лекційний курс НУОУ (Національний університет оборони України). – Київ, 2020. – 89 с.
12. Коваленко Л.С., Шеховцов А.А. Вентиляція та кондиціонування повітря. Харків: ХНУБА, 2018. 312 с.
13. Кучеренко В.І. «Будівлі та споруди підвального типу і їх інженерні системи». – Київ: Ліра-К, 2016. – 248 с.
14. Подчашинський Ю.С. Вентиляція та повітророзподіл. Київ: Каравела, 2019. 360 с.

15. Пономаренко В.С. «Інженерний захист населення та територій». – Київ: НАУ, 2017. – 284 с. (Опис конструкцій сховищ, герметизації, тамбурів)
16. Промвентиляція. Модульні вентиляційні установки: технічний опис. – Харків, 2023.
17. VENTS (Ventilation Systems). Каталог вентиляційного обладнання 2023–2024. – ТОВ «Вентиляційні системи», Київ, 2024.
18. ASHRAE Handbook HVAC Systems and Equipment. Atlanta: ASHRAE, 2020. 1056 p.
19. ASHRAE Handbook Fundamentals. Atlanta: ASHRAE, 2021. 1120 p.
20. ASHRAE Standard 62.1-2022 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Atlanta: ASHRAE, 2022. 78 p.
21. ASHRAE Handbook — HVAC Applications. – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2023.
22. Dincer I., Rosen M.A. Thermal Energy Storage Systems and Applications. Chichester: Wiley, 2021. 624 p.
23. EN 308:2022 Heat exchangers. Test procedures for performance of air-to-air heat recovery devices. Brussels: CEN, 2022. 54 p.
24. FEMA P-361 «Safe Rooms for Tornadoes and Hurricanes: Design and Construction Guidance». – Washington, 2021. – 236 p (Частково використовується для міжнародних вимог до підземних споруд та автономності)
25. Komfovent. VERSO and RHP Ventilation Units. Technical Catalogue. – Komfovent, Vilnius, 2023.
26. LUWA Air Engineering. Cleanroom and Special Ventilation Systems. Zurich: LUWA AG, 2023. 68 p.
27. Maico Ventilation. Ventilation Equipment Catalogue. Villingen-Schwenningen: Maico, 2022. 164 p.
28. Mehling H., Cabeza L.F. Heat and Cold Storage with PCM. Berlin: Springer, 2008. 308 p.
29. NFPA 90A-2021 «Standard for the Installation of Air-Conditioning and

Ventilating Systems». – NFPA, 2021. – 88 p. (Для пожежних вимог до підземних вентиляційних систем)

30. Saghir M.Z. Heat Exchangers: Fundamentals and Design. Boca Raton: CRC Press, 2019. 355 p.

31. Scherer M., Muller B. «Underground Shelters and Protective Structures: Design and Engineering». – Springer, 2015. – 312 p.

32. Systemair Group. Air Handling Units Catalogue 2022–2024. Skinnskatteberg: Systemair AB, 2023. 214 p.

33. Wolf GmbH. Air Handling Units KG TOP, KG Flex. Technical Manual. Mainburg: Wolf GmbH, 2023. 140 p.

34. Zalba B., Marin J.M., Cabeza L.F., Mehling H. Review on thermal energy storage: materials and applications. Applied Thermal Engineering. 2003. Vol. 23. P. 251–283.