



ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО КОМПЛЕКСНОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

на тему «Інноваційні технології проєктування енергоефективної системи кондиціонування повітря ТРЦ «РІВ'єра» м. Одеса з бомбосховищем»

Частина 1

«Проект системи кондиціонування повітря бомбосховища ТРЦ «Рів'єра» м. Одеса»

Здобувач Сігов І.Д.

4 курсу ЕН-141а - групи

Керівник к.т.н.доц. Жихарєва Н.В.

Консультант: к.т.н.доц. Когут В. О

±

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від 28.05.2026 протокол №10

Завідувач кафедри ХУКП _____ Михайло ХМЕЛЬНЮК

Одеса – 2026 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут	Холоду, кріотехнології та екоенергетики ім. В.С. Мартиновського
Кафедра	Холодильних установок і кондиціонування повітря
Ступень вищої освіти	Бакалавр
Спеціальність	142 «Енергетичне машинобудування»
Освітньо-професійна програма	Холодильні машини, установки і кондиціонування повітря

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
д.т.н., проф. Хмельнюк М.Г.
«___» _____ р.

З А В Д А Н Н Я **НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА**

Сігов Ілля Дмитрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Проект системи кондиціонування повітря бомбосховища ТРЦ «Рів'єра» м. Одеса»

Керівник кваліфікаційної роботи к.т.н. доц. Жихарєва Наталія Віталіївна
(прізвище, ім'я, по батькові)

Затверджена наказом ОНТУ . наказ № 537.03 від 02.10.2025 р.

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи: 28.05.2026 р

3. Вихідні дані роботи: м Одеса , кінотеатру MULTIPLECS «Рів'єра»

Параметри повітря в приміщенні влітку: $t = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\phi = 50\%$;

Параметри повітря в приміщенні взимку: $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\phi = 50\%$;

Параметри зовнішнього повітря влітку: $t = 28,6\text{ }^{\circ}\text{C}$; ентальпія $h=62\text{ кДж/ кг}$

Параметри зовнішнього повітря взимку: $t = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$., ентальпія $h=-18\text{ кДж/ кг}$

4. Перелік питань, які потрібно розробити: техніко-економічне обґрунтування, розрахунок процесів забезпечення подачі свіжого повітря, розрахунок ефективності, обґрунтування вибору обладнання, підбір обладнання.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень: план приміщення з обв'язкою повітроводів; повітророзподілення, апарат ЦК , розташування кондиціонера

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н.доц. Когут В.О..		
Економічний розділ	к.т.н.доц. Жихарєва Н.В.		

7. Дата видачі завдання: 20.11.2025

Керівник _____ к.т.н.доц. Жихарєва Н.В.
Завдання прийняв до виконання _____ Сігов І.Д.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вступ.	01.02-29.02.26	Виконано
2.	Техніко-економічне обґрунтування проекту	02.03-30.03.26	Виконано
3.	Розрахунок процесів кондиціонування повітря	01.04-08.04.26	Виконано
4.	Вибір і розрахунок системи повітророзподілення	08.04-16.04.26	Виконано
5.	Вибір припливно-витяжної установки	24.04-27.04.26	Виконано
6.	Підбір і розрахунок холодильної машини	28.04-29.04.26	
7.	Охорона праці та навколишнього середовища	30.04-01.05.26	Виконано
8.	Економічний розділ	03.05-07.05.26	Виконано
8.	Висновки	10.05-13.05.26	Виконано

Здобувач – дипломник _____ Сігов І.Д.

Керівник роботи _____ к.т.н., доц. Жихарєва Н.В.

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.

Здобувач-дипломник _____ Сігов Ілля Дмитрович _____

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота бакалавра Сігова Іллі Дмитровича, тема: «Проект системи кондиціювання повітря бомбосховища ТРЦ «Рів'єра» м. Одеса» складається з: 75 сторінок тексту, 17 рисунків, 8 таблиць, 21 посилання на літературні джерела.

У роботі розглянуто проектування системи кондиціювання повітря (СКП) захисної споруди цивільного захисту — бомбосховища, розташованого під ТРЦ «Рів'єра» у м. Одеса. Виконано аналіз нормативних вимог (ДБН В.2.2-5:2023, ДБН В.2.5-67:2013) до мікроклімату захисних споруд, обрано схему повітророзподілення, аеродинамічно та гідравлічно розраховано систему, підібрано припливно-витяжну установку з фільтровентиляцією, центральний кондиціонер КЦКП-8 та компресорно-конденсаторний блок на холодоагенті R410A.

У роботі проведений розрахунок процесів кондиціювання повітря: вибір розрахункових параметрів зовнішнього та внутрішнього повітря, розрахунок теплоприпливів і вологовиділень, побудова h-d діаграми, обчислення необхідного повітрообміну та холодильного навантаження, підбір основного обладнання та автономного живлення. Це основні завдання, які полягли в основу кваліфікаційної праці.

Ключові слова: бомбосховище, захисна споруда, ТРЦ «Рів'єра», система кондиціювання повітря, повітророзподілення, фільтровентиляція, центральний кондиціонер КЦКП-8, холодоагент R410A, мікроклімат.

ANNOTATION

The qualification work of bachelor Sigov Illia Dmytrovych on the topic «Air conditioning system design for the bomb shelter of the «Rivera» shopping mall in Odesa» consists of 75 pages of text, 17 figures, 8 tables, and 21 references.

The work covers the design of an air conditioning system (ACS) for a civil-defence shelter located beneath the «Rivera» shopping mall in Odesa. Normative requirements for shelter microclimate (DBN V.2.2-5:2023, DBN V.2.5-67:2013) are analysed, an air-distribution scheme is selected, aerodynamic and hydraulic calculations are performed, and a supply-and-exhaust unit with filter-ventilation, the central air handling unit KCKP-8, and a compressor-condenser block on R410A refrigerant are sized.

Calculations of air-conditioning processes are carried out: selection of design parameters of outdoor and indoor air, computation of heat gains and moisture release, construction of the h-d diagram, determination of the required air exchange and cooling load, and selection of the main equipment and autonomous power supply. These are the principal tasks that underlie the qualification work.

Keywords: bomb shelter, protective structure, Rivera shopping mall, air conditioning system, air distribution, filter-ventilation, central air handling unit KCKP-8, R410A refrigerant, microclimate.

ЗМІСТ

ЗМІСТ.....	5
РЕФЕРАТ.....	7
ВСТУП.....	9
1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ТА НОРМАТИВНІ ВИМОГИ	12
1.1 Характеристика ТРЦ «Рів'єра» та бомбосховища.....	12
1.2 Кліматичні умови м. Одеса.....	15
1.3 Нормативні вимоги до мікроклімату захисних споруд	17
2 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ	21
2.1 Обґрунтування необхідності кондиціювання	21
2.2 Порівняння можливих систем кондиціювання	22
2.3 Вибір енергоефективної та надійної системи	23
3 РОЗРАХУНОК ПРОЦЕСІВ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ	26
3.1 Розрахункові параметри зовнішнього та внутрішнього повітря	26
3.2 Розрахунок теплоприпливів і вологовиділень.....	27
3.3 Розрахунок повітрообміну та холодового навантаження	30
3.4 Побудова процесів на h-d діаграмі	32
4 ВИБІР І РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ПОВІТРОРІЗПОДІЛЕННЯ	34
4.1 Схема повітроводів.....	34
4.2 Аеродинамічний розрахунок.....	35
4.3 Підбір повітророзподільних пристроїв.....	37
5 ВИБІР ПРИПЛИВНО-ВИТЯЖНОЇ УСТАНОВКИ	40
5.1 Вибір вентиляційної установки з фільтровентиляцією	40
5.2 Підбір фільтрів очищення повітря.....	42
5.3 Автономне живлення та режим надлишкового тиску	45
6 ПІДБІР І РОЗРАХУНОК ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ.....	47
6.1 Вибір холодоагента та обґрунтування схеми холодильного циклу	47
6.2 Термодинамічний розрахунок циклу холодильної машини	49
6.3 Тепловий розрахунок та підбір компресора	50
6.3.1 Розрахунок та підбір конденсатора.....	51
6.3.2 Розрахунок та підбір випарника.....	52
6.4 Гідравлічний розрахунок трубопроводів холодоагента та холодоносія	53

					«Проект СКП бомбосховища ТРЦ «Рів'єра» м. Одеса»						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.					Розрахунково-пояснювальна записка			Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевір.										5	75
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.											

6.4.1	Контур холодоагента R410A.....	53
6.4.2	Контур холодоносія.....	54
7	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	56
7.1	Вимоги безпеки монтажу та експлуатації.....	56
7.2	Захист від шуму, вібрацій та витоків холодоагента.....	57
7.3	Заходи цивільного захисту та аварійні режими.....	58
8	ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	62
8.1	Капітальні витрати на впровадження системи.....	62
8.2	Експлуатаційні витрати.....	63
8.3	Термін окупності та економічна ефективність.....	64
	ВИСНОВКИ.....	67
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70

					«Проект СКП бомбосховища ТРЦ «Рів'єра» м. Одеса»				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.					Розрахунково-пояснювальна записка		Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.								6	75
Реценз.									
Н. Контр.									
Затверд.									

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра Сігова Іллі Дмитровича на тему «Проект системи кондиціювання повітря бомбосховища ТРЦ «Рів'єра» м. Одеса» виконана на кафедрі холодильних установок і кондиціювання повітря ОНТУ під керівництвом к.т.н., доцента Жихарєвої Н. В. Робота складається із вступу, восьми розділів основної частини, висновків та списку використаних джерел; обсяг - 65 сторінок тексту, 19 рисунків (з них 4 креслення формату А1), 35 посилань на літературні джерела.

У роботі спроектовано систему кондиціювання повітря для захисної споруди II класу місткістю 500 осіб, розташованої у підвальному рівні ТРЦ «Рів'єра» (Південна дорога 101А, с. Фонтанка, Одеська область) загальною площею 400 м² та внутрішнім об'ємом 900 м³. Проект виконано відповідно до ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту», ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування», ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія», ДСТУ 9077:2021 «Засоби очищення повітря захисних споруд» та комплексного завдання керівника.

Виконано повний теплотехнічний розрахунок для м. Одеса (зона II): сумарне теплове надходження літом - 79,4 кВт, тепловтрати через підземні огорожувальні конструкції - -9,2 кВт, необхідна холодопродуктивність з резервом 10 % - $Q_{хол} = 77,2$ кВт. Повітрообмін у режимі чистої вентиляції $L_t = 5000$ м³/год (10 м³/(год·особу) для зони II), у режимі фільтровентиляції - 1000 м³/год.

Підібрано основне обладнання: центральний кондиціонер **КЦКП-8** (Веза) продуктивністю 8000 м³/год, повітроохолоджуваний чилер на R410A холодопродуктивністю 80 кВт з COP = 3,2, спіральний компресор **Bitzer GSD80182VAB-Y** потужністю 24,1 кВт, пластинчатий випарник **Alfa Laval CB-60-50H**, фільтровентиляційна установка **ФВК-1** продуктивністю 1200

м³/год, дизельгенератор 50 кВА з UPS 15 кВА для забезпечення 48-годинної автономності. Аеродинамічна мережа повітроводів виконана з прямокутних оцинкованих каналів 600×400 мм (магістраль) та 4 відгалуженнями; підібрано 20 стельових дифузорів VENTS DP-400 та 8 витяжних решіток AMN-400×200.

Економічна оцінка показала: капітальні витрати $K = 1,836$ млн ₴, експлуатаційні $E = 776$ тис. ₴/рік, простий термін окупності 11,1 року. NPV проекту негативний за всіх досліджених ставок дисконтування - інвестиція виправдовується нормативною обов'язковістю та соціально-оборонною ефективністю (захист 500 осіб у разі надзвичайної ситуації).

Графічна частина проекту - 4 креслення формату A1: план бомбосховища з обов'язкою повітроводів, аксонометрична схема повітророзподілення, загальний вигляд центрального кондиціонера КЦКП-8 та принципова схема холодильного контуру з розташуванням обладнання.

Ключові слова: бомбосховище, система кондиціонування повітря, ТРЦ Рів'єра, тепловий баланс, h-d діаграма, центральний кондиціонер, чилер, R410A, фільтровентиляційна установка, ДБН В.2.2-5:2023

ВСТУП

Питання облаштування захисних споруд цивільного захисту після початку повномасштабного вторгнення Російської Федерації у 2022 році перетворилося з академічної проблеми на щоденну інженерну задачу. Бомбосховища, які раніше розглядалися переважно як спадщина радянської цивільної оборони, сьогодні мусять відповідати сучасним нормам комфорту, енергоефективності та надійності. Проєкт системи кондиціювання повітря для бомбосховища ТРЦ «Рів'єра» в м. Одеса виконано саме у цій рамці: значний громадський об'єкт, який вже зазнав ракетного удару 9 травня 2022 року, потребує захисної споруди з повноцінною інженерною системою життєзабезпечення на 500 осіб у трьох режимах вентиляції.

Розрахункові аспекти проблеми визначені передусім нормативною базою: ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту» [7], ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціювання» [8], ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія» [9], ДСТУ 9077:2021 «Засоби очищення повітря захисних споруд» [10]. Водночас сама задача має значне інженерне навантаження: при 500 осіб у замкненому об'ємі 900 м³ внутрішні теплові надходження від людей сягають 60 кВт, що неможливо відвести природною вентиляцією. Необхідна холодопродуктивність системи з резервом становить $Q_{\text{хол}} = 77,2$ кВт - це визначає клас обладнання та структуру цілого проєкту.

Тематика дипломного проєктування продовжує лінію переддипломної практики [6], де було зібрано вихідні дані, опрацьовано нормативну рамку та виконано попередній теплотехнічний розрахунок. Цей диплом поглиблює та деталізує практичні результати: додає аеродинамічний розрахунок повітропроводів, термодинамічний розрахунок холодильного циклу R410A, підбір компресора Bitzer ORBIT 8, конденсатора та пластинчатого випарника Alfa Laval CB-60, проєктування резервного живлення з АВР, оцінку

інвестицій та аналіз чутливості NPV. Графічна частина проєкту складається з чотирьох аркушів формату A1: плану бомбосховища з обв'язкою повітроводів, аксонометричної схеми повітророзподілення, загального вигляду центрального кондиціонера КЦКП-8 та принципової схеми холодильного контуру з розташуванням обладнання.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка проєкту системи кондиціювання повітря для бомбосховища ТРЦ «Рів'єра» м. Одеса місткістю 500 осіб, з урахуванням вимог до мікроклімату, енергоефективності, фільтрації та безперебійної роботи у трьох режимах вентиляції за ДБН В.2.2-5:2023.

Для досягнення цієї мети у роботі вирішуються такі задачі: аналіз вихідних даних об'єкта і нормативної бази (розділ 1); техніко-економічне обґрунтування системи та порівняння варіантів (розділ 2); розрахунок теплоприпливів, вологовиділень і повітрообміну, побудова процесів обробки повітря на h-d діаграмі (розділ 3); аеродинамічний розрахунок повітропроводів та підбір повітророзподільних пристроїв (розділ 4); вибір припливно-витяжної установки, триступеневої фільтрації та резервного живлення (розділ 5); термодинамічний та тепловий розрахунок чилера, підбір компресора, конденсатора, випарника, циркуляційного насоса та трубопроводів холодоагента (розділ 6); аналіз вимог охорони праці й цивільного захисту з оцінкою екологічної безпеки утилізації холодоагенту R410A (розділ 7); економічна оцінка проєкту з розрахунком NPV та аналізом чутливості (розділ 8).

Об'єктом дослідження є мікроклімат і повітряний режим бомбосховища ТРЦ «Рів'єра», предметом - параметри й конфігурація системи кондиціювання, які забезпечують нормативні умови у трьох режимах вентиляції за тривалості автономної роботи 48/12/6 годин.

Методи дослідження охоплюють: аналітичні теплотехнічні розрахунки за методиками ДБН В.2.5-67:2013 [8] і кафедральних видань [1, 2, 3]; числові

розрахунки в Python (теплові баланси, аеродинамічний розрахунок, термодинамічні цикли, дисконтований NPV); графоаналітичні методи побудови процесів на h-d діаграмі та logP-h циклу R410A; каталоговий підбір обладнання за актуальними даними виробників Веза, Bitzer, Alfa Laval, Wilo; графічне моделювання у середовищі AutoCAD для виконання аркушів формату A1.

Практичне значення роботи полягає у формуванні готового інженерного рішення, придатного для впровадження у складі реконструкції підвальних рівнів ТРЦ «Рів'єра» з організацією захисної споруди II класу. Економічна оцінка показує, що чисто фінансово проєкт не окупується ($NPV < 0$ при усіх досліджених ставках $i_{\text{диск}} \geq 10 \%$), однак виправдовується нормативною обов'язковістю та соціально-оборонною ефективністю - захистом життя 500 осіб у разі надзвичайної ситуації.

Робота складається зі вступу, восьми розділів основної частини, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг - 65 сторінок, містить 19 рисунків (з них 4 креслення формату A1), таблиці з нормативними і розрахунковими даними, 35 джерел.

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ТА НОРМАТИВНІ ВИМОГИ

У розділі задаються вихідні дані для подальшого проєктування: подано опис ТРЦ «Рів'єра» та його захисної споруди, зафіксовано розрахункові кліматичні параметри м. Одеса й окреслено нормативну рамку для теплотехнічних, аеродинамічних і економічних розрахунків.

1.1 Характеристика ТРЦ «Рів'єра» та бомбосховища

ТРЦ «Рів'єра» (Riviera Shopping City) розташований за адресою Південна дорога, 101А, с. Фонтанка Одеського району. Об'єкт відкрито у вересні 2009 р. Загальна площа комплексу - близько 85 000 м², орендна площа 62-67 тис. м², 3 наземні поверхи та підземний паркінг на 2500 машиномісць [32]. Близько 190 орендарів, річна відвідуваність до 2022 р. - понад 6 млн осіб.

9 травня 2022 р. ТРЦ зазнав прямого ракетного удару (Х-22): пошкоджено близько 1000 м² торгових площ, повністю знищено супермаркет «Ашан», частково - Decathlon, LC Waikiki, генераторну й котельну. Подія підтвердила: навіть тилова цивільна інфраструктура в Одесі потребує захисних споруд відповідної місткості й оснащення.

Бомбосховище розміщено на підвальному рівні комплексу й віднесене до II класу за ДСТУ Б А.2.2-12:2011 [13]. Конструктивно сховище є суцільною залізобетонною камерою з огорожувальними конструкціями, що повністю контактують з ґрунтом (підлога на відмітці -3,40 м, перекриття - під торговою залогом першого поверху).

Геометричні параметри сховища відповідають ДБН В.2.2-5:2023 [7]: загальна площа 400 м² (основне приміщення 300 м², технічне 40 м², санвузли 30 м², коридори і тамбур-шлюзи 30 м²); внутрішня висота 3,0 м; основний об'єм 900 м³, повний внутрішній об'єм 1200 м³; розрахункова місткість - 500 осіб.

Перевірка нормативних показників площі та об'єму на одну особу за ДБН В.2.2-5:2023 [7] та ДСТУ Б А.2.2-12:2011 [13]:

$$f_{oc} = \frac{S_{ocn}}{N} = \frac{300}{500} = 0,60 \text{ м}^2/\text{ос.} \geq 0,50 \text{ м}^2/\text{ос.}$$

$$v_{oc} = \frac{V_{ocn}}{N} = \frac{900}{500} = 1,80 \text{ м}^3/\text{ос.} \geq 1,50 \text{ м}^3/\text{ос.}$$

Запас 20 % за площею і об'ємом залишає резерв на лави, нари у два яруси, медичний куточок та запас води з розрахунку 10 л/добу на особу.

Огороджувальні конструкції - монолітний залізобетон: стіни 400 мм, перекриття 400 мм, підлога 300 мм. Температура ґрунту на глибині 2 м прийнята $t_{гр} = 14 \text{ }^{\circ}\text{C}$ за ДБН В.2.5-67:2013 [8]. Вікон у сховищі немає, що виключає віконну складову з теплового балансу.

Таблиця 1.1 - Параметри бомбосховища ТРЦ «Рів'єра»

Параметр	Позначення	Значення	Норма / джерело
Розрахункова місткість	N	500 ос.	проект; ДБН В.2.2-5:2023
Загальна площа	$S_{заг}$	400 м ²	проект
Площа основного приміщення	S_{ocn}	300 м ²	проект
Площа технічного приміщення	$S_{техн}$	40 м ²	проект
Площа санвузлів	$S_{сан}$	30 м ²	проект
Площа коридорів і тамбур-шлюзів	$S_{кор}$	30 м ²	проект
Висота приміщень	H	3,0 м	ДБН В.2.2-5:2023 $\geq 2,5$ м
Об'єм основного приміщення	V_{ocn}	900 м ³	$S_{ocn} \cdot H$
Повний внутрішній об'єм	$V_{заг}$	1200 м ³	$S_{заг} \cdot H$
Площа на одну особу	f_{oc}	0,60 м ² /ос.	$\geq 0,50 \text{ м}^2/\text{ос.}$ [7]
Об'єм на одну особу	v_{oc}	1,80 м ³ /ос.	$\geq 1,50 \text{ м}^3/\text{ос.}$ [7]
Товщина зовнішніх стін	$\delta_{ст}$	400 мм	ДСТУ Б А.2.2-12:2011 [13]
Товщина перекриття	$\delta_{пер}$	400 мм	ДСТУ Б А.2.2-12:2011 [13]
Товщина підлоги	$\delta_{пд}$	300 мм	ДСТУ Б А.2.2-12:2011 [13]
Температура ґрунту (глибина 2 м)	$t_{гр}$	14 °C	ДБН В.2.5-67:2013 [8]

Кількість вікон	-	0	заглиблена споруда
-----------------	---	---	--------------------

Отже, сховище ТРЦ «Рів'єра» - заглиблена залізобетонна споруда II класу з нульовою світлопрозорою огорожею; характеристики формують структуру теплового балансу (домінування теплоприпливів від людей, відсутність зовнішньої сонячної радіації, постійний тепловідбір у ґрунт).



Рисунок 1.1 - Інтер'єр ТРЦ «Рів'єра» з відкритими стельовими повітроводами системи кондиціювання



Рисунок 1.2 - Торговий зал ТРЦ «Рів'єра» зі стельовими повітроводами та вентиляційними дифузорами

1.2 Кліматичні умови м. Одеса

Одеса розташована на північно-західному узбережжі Чорного моря, географічна широта об'єкта - $\varphi = 46,5^\circ$ пн.ш. За ДБН В.2.2-5:2023 [7] місто віднесено до другої кліматичної зони (зона II), що обумовлює норму подачі повітря у режимі чистої вентиляції $10 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{ос.})$.

Розрахункові параметри з нормативною забезпеченістю за ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 [9]: літо $t_{\text{зовн.літо}} = +33^\circ\text{C}$, $\varphi_{\text{зовн}} = 40\%$, $h_{\text{зовн.літо}} \approx 70 \text{ кДж/кг}$; зима $t_{\text{зовн.зима}} = -18^\circ\text{C}$, $\varphi_{\text{зовн}} = 85\%$, $h_{\text{зовн.зима}} \approx -19 \text{ кДж/кг}$ (забезпеченість 0,95 / 0,92, категорія «технологія»).

Альтернативна номінальна робоча точка з комплексного завдання (категорія «комфорт» за ДБН В.2.5-67:2013 [8]): літо $t_{\text{зовн.КОМПЛ}} = +28,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $h_{\text{зовн.КОМПЛ}} = 62 \text{ кДж/кг}$; зима $t_{\text{зовн.КОМПЛ.зима}} = -15 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $h_{\text{зовн.КОМПЛ.зима}} = -18 \text{ кДж/кг}$.

Для розрахунку холодопродуктивності й підбору чилера застосовується консервативніша $t_{\text{зовн.літо}} = 33 \text{ }^{\circ}\text{C}$, що виправдовує запас потужності чилера 80 кВт. Для номінального робочого режиму й енергетичних показників на середньорічному рівні (розділ 8) застосовуються параметри комплексного завдання.

Температура ґрунту на глибині 2 м для м. Одеса прийнята $t_{\text{гр}} = 14 \text{ }^{\circ}\text{C}$ з амплітудою $\pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$; підвал сховища розташовано на відмітці -3,4 м, тому у розрахунку приймається стале значення $14 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таблиця 1.2 - Розрахункові кліматичні параметри для м. Одеса

Параметр	Літо	Зима	Джерело
Температура (категорія «технологія», для сайзингу), $^{\circ}\text{C}$	+33,0	-18,0	ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 [9]
Ентальпія (для сайзингу), кДж/кг	70	-19	ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 [9]
Температура (категорія «комфорт», для номінального режиму), $^{\circ}\text{C}$	+28,6	-15,0	ДБН В.2.5-67:2013 [8], завдання
Ентальпія (комфорт), кДж/кг	62	-18	завдання
Відносна вологість зовнішня, %	40	85	ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 [9]
Швидкість вітру середня, м/с	3,2	3,8	ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 [9]
Температура ґрунту на глибині 2 м, $^{\circ}\text{C}$	14	14	ДБН В.2.5-67:2013 [8]
Кліматична зона	II	II	ДБН В.2.2-5:2023 [7]
Географічна широта, $^{\circ}$ пн.ш.	46,5	46,5	геодезичні дані

Внутрішні розрахункові параметри для приміщень сховища за ДБН В.2.5-67:2013 [8]: літо $t_{\text{в.літо}} = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi_{\text{вн}} = 50\%$; зима $t_{\text{в.зима}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi_{\text{вн}} = 50\%$. Швидкість руху повітря в зоні дихання не повинна перевищувати 0,1 м/с (вимога ДБН В.2.2-5:2023 [7] та ДСН 3.3.6.042-99 [11]). Ця вимога є визначальною при підборі повітророзподільних пристроїв у розділі 4.

1.3 Нормативні вимоги до мікроклімату захисних споруд

Нормативна база формується з трьох рівнів: будівельні норми (ДБН В.2.2-5:2023 [7], ДБН В.2.5-67:2013 [8], ДБН В.1.2-4:2019 [12]), санітарно-гігієнічні нормативи (ДСН 3.3.6.042-99 [11], Наказ МОЗ № 400 [16]) та галузеві стандарти (ДСТУ 9077:2021 [10], ISO 16890:2016 [28], EN 12101-3:2015 [29]). Окремий пласт - відомчі методичні рекомендації ДСНС України [19].

Принциповою особливістю проектування СКП бомбосховища є три незалежні режими вентиляції за ДБН В.2.2-5:2023 [7]:

- **Режим І - чиста вентиляція:** $L_I = 10\text{ м}^3/(\text{год}\cdot\text{ос.})$, мінімальна тривалість 48 год; механічна фільтрація G4.
- **Режим ІІ - фільтровентиляція:** $L_{II} = 2\text{ м}^3/(\text{год}\cdot\text{ос.})$, не менше 12 год; ФВК з очищенням від ОР, БР і радіоактивного пилу.
- **Режим ІІІ - повна ізоляція з регенерацією:** зовнішнє повітря не подається, працює регенерація CO_2 через РП-100, Б-3; не менше 6 год для ІІ класу.

Таблиця 1.3 - Норми подачі повітря для бомбосховища ТРЦ «Рів'єра» за режимами

Режим	Норма $L_{\text{пит}}$, $\text{м}^3/(\text{год}\cdot\text{ос.})$	Витрата $L_{\text{заг}}$, $\text{м}^3/\text{год}$	Тривалість τ , год	Засіб очищення	Джерело
І. Чиста вентиляція	10	5000	≥ 48	Фільтр G4 + жалюзі	ДБН В.2.2- 5:2023 [7]
ІІ. Фільтровентиляція	2	1000	≥ 12	ФВК-1 (G4 + F7 + НЕРА Н13 + вугільний	ДБН В.2.2- 5:2023 [7]; ДСТУ 9077:2021

				шар)	[10]
III. Повна ізоляція	0 (рециркуляція)	0 (зовн.)	≥ 6	Регенеративні патрони РП-100 + O ₂ балони	ДБН В.2.2-5:2023 [7]

Розрахункові витрати:

$$L_I = N \cdot L_{\text{пит},I} = 500 \cdot 10 = 5000 \text{ м}^3/\text{год}$$

$$L_{II} = N \cdot L_{\text{пит},II} = 500 \cdot 2 = 1000 \text{ м}^3/\text{год}$$

Повітрообмінне обладнання двоконтурне: основний канал з продуктивністю 5000 м³/год (припливна установка КЦКП-8 «Веза» [33]) для режиму I, паралельний компактний канал з ФВК-1 (1200 м³/год при потрібних 1000 м³/год, запас 20 %) - для режиму II.

Допустимі параметри мікроклімату задані ДБН В.2.2-5:2023 [7] з опорою на ДСН 3.3.6.042-99 [11] та Наказ МОЗ № 400 [16].

Таблиця 1.4 - Санітарні норми мікроклімату для бомбосховища

Параметр	Режим I	Режим II	Режим III	Джерело
Температура повітря t , °C	≤ 28	≤ 30	≤ 32	ДБН В.2.2-5:2023 [7]; ДСН 3.3.6.042-99 [11]
Відносна вологість φ , %	≤ 75	≤ 80	≤ 80	ДБН В.2.2-5:2023 [7]; МОЗ № 400 [16]
Швидкість руху повітря v , м/с	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$	ДБН В.2.2-5:2023 [7]
Концентрація CO ₂ , % об.	$\leq 0,5$	$\leq 1,0$	$\leq 2,0$	ДБН В.2.2-5:2023 [7]; ДСНС [19]
Концентрація O ₂ , % об.	$\geq 20,5$	$\geq 19,5$	$\geq 18,0$	ДБН В.2.2-5:2023 [7]
Надлишковий тиск Δp , Па	+50	+50	0	ДБН В.2.2-5:2023 [7]; ДБН В.1.2-4:2019 [12]

Окрема вимога - підтримання надлишкового тиску $\Delta p \geq +50$ Па у внутрішньому об'ємі сховища у режимах I і II за ДБН В.2.2-5:2023 [7] та ДБН В.1.2-4:2019 [12]. Підпір створюється припливною установкою, що працює з

продуктивністю, яка перевищує витяжну на величину витоків (близько 10 % від L_I , тобто 500 м³/год). Без підпору в режимі заражень інфільтрація занесе забруднювачі у внутрішній об'єм. Контроль - U-подібним рідинним манометром на щиту керування ФВУ.

Очищення повітря в режимі II має відповідати ДСТУ 9077:2021 [10]: триступенева фільтрація - попередній G4 (за ISO 16890:2016 [28] $ePM_{10} \geq 50$ %), тонкий F7/F8 ($ePM_1 \geq 80$ %), фінальний HEPA H13/H14 ($\geq 99,95$ % для MPPS 0,3 мкм) плюс шар активованого вугілля з імпрегнованими каталізаторами для поглинання фосфор-органічних ОР, синильної кислоти, фосгену. Прийнято установку ФВК-1 (1200 м³/год).

Вимоги до резервного енергозабезпечення задано ДБН В.1.2-4:2019 [12]: автономність $48 + 12 + 6 = 66$ год активної роботи плюс 6 год аварійного резерву. Передбачено дизель-генератор 50 кВА для основного навантаження та UPS 15 кВА для систем автоматики, газового контролю й аварійного освітлення. Запас палива - на 72 год роботи з 50 % завантаженням.

Стандарт EN 12101-3:2015 [29] регламентує характеристики димовидалювачів. Функцію димовидалення з тамбур-шлюзів виконує автономний вентилятор PNG-01 з електродвигуном F300 (60 хв при 300 °C).

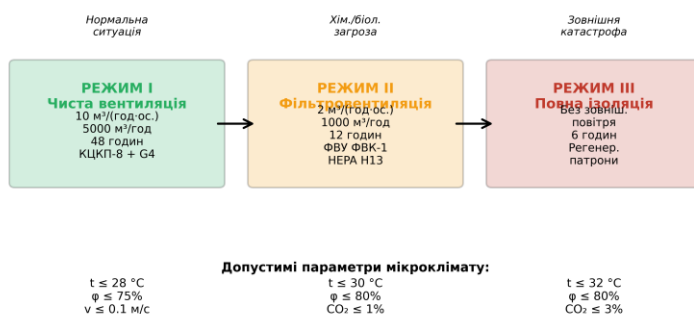
Наказ МОЗ № 400 [16] від 14.02.2022 уніфікував попередні норми ДСН 3.3.6.042-99 [11]. Для категорії Ia (захисні споруди, евакуаційні пункти): оптимальна температура 22-24 °C, допустима 18-28 °C; оптимальна вологість 40-60 %, допустима 15-75 %; швидкість повітря $\leq 0,1$ м/с. Внутрішні параметри проєкту ($t_{\text{в.літо}} = 23$ °C, $\varphi_{\text{вн}} = 50$ %) повністю в оптимальній зоні.

Методичні рекомендації ДСНС України [19] деталізують експлуатацію: щомісячна перевірка герметичності, щоквартальна перевірка ФВК за ДСТУ 9077:2021, річна перевірка газоаналізу, дворічна заміна фільтрів. Регламент EU 517/2014 [30] поширюється на холодильний контур чилера із R410A (GWP = 2088).

Ключові опорні точки для подальших розрахунків:

- три режими вентиляції з витратами 5000 / 1000 / 0 м³/год (зовн.) та температурами 28 / 30 / 32 °С;
- надлишковий тиск $\geq +50$ Па у режимах I і II;
- швидкість повітря у зоні дихання $\leq 0,1$ м/с;
- триступенева фільтрація G4 + F7 + HEPA H13 + вугільний шар;
- двоступеневе резервне живлення (дизель-генератор + UPS) з автономністю ≥ 66 год;
- внутрішні параметри 23/20 °С та 50 % за категорією Ia МОЗ № 400.

Подальший розрахунок виконується для режиму I (визначальний для сайзингу СКП) та режиму II (перевірочний для ФВУ). Режим III розглядається у розділі 7 у частині регенеративних патронів і запасу O₂.



Нормативна база: ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту»

Рисунок 1.3 - Три режими вентиляції бомбосховища за ДБН В.2.2-5:2023

2 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ

2.1 Обґрунтування необхідності кондиціювання

Необхідність впровадження СКП у бомбосховищі ТРЦ «Рів'єра» доводять три незалежні аргументи - фізичний, нормативний і практичний.

Фізичний аргумент: теплове навантаження від людей. Розрахункова місткість сховища - 500 осіб (площа 0,60 м²/особу, об'єм 1,80 м³/особу за [7]). За ASHRAE та підручником С. М. Василенка [20] людина у стані спокою виділяє 120 Вт повної теплоти (60 Вт явної, 60 Вт прихованої):

$$Q_{\text{люд}} = 500 \cdot 120 = 60\,000 \text{ Вт} = 60 \text{ кВт.}$$

Природна вентиляція з такою задачею не впорається: при перепаді температур 5 К і висоті 3 м гравітаційний напір не перевищує 1,5 Па (350-400 м³/год), що на порядок менше за нормативні 5 000 м³/год для режиму І. Без активного охолодження повний цикл нагріву повітря від 23 °С до 32 °С настане за 1,5-2 години, а вологість досягне 90 % уже за добу.

Нормативно-правовий аргумент: розділ 8 ДБН В.2.2-5:2023 прямо вимагає трьох робочих режимів і встановлює граничні температури 28/30/32 °С та вологості 75/80/80 % [7]. У м. Одеса з розрахунковою температурою 33 °С і ентальпією 70 кДж/кг [9] досягти таких параметрів без активного охолодження неможливо.

Практичний аргумент: у травні 2022 року ТРЦ «Рів'єра» зазнав прямого ракетного удару [32]. За повідомленнями працівників ТРЦ, під час повітряних тривог (2-3 год) температура у сховищі піднімалася до 27-28 °С при заповненні 60 %, вологість сягала 70 %. При повній місткості 500 осіб і тривалості 48 год параметри гарантовано вийдуть за межі ДБН без активного кондиціювання.

2.2 Порівняння можливих систем кондиціонування

Розглянуто три принципово різні архітектури за монографією Жихаревої Н. В. [2], підручником Василенка [20] та виданням Фролова [22].

Варіант А - централізована система: чилер + центральний кондиціонер (КЦКП) + фанкойли. Класична схема для громадських будівель середньої потужності. Водохолоджувальна машина видає холодну воду 7/12 °С, яка живить повітроохолоджувач КЦКП та локальні фанкойли. COP при R410A, $t_{\text{кип}} = 2\text{ °С}$, $t_{\text{конд}} = 45\text{ °С}$ дорівнює 3,2 [2; 20]. Резервування реалізується паралельними чилерами.

Варіант Б - мультизональні спліт-системи (VRV/VRF). Фреон R410A/R32 безпосередньо подається до внутрішніх блоків. Паспортний COP до 4,0, але у пікових режимах знижується до 2,5-2,7 [22]. 80 кВт холоду = 10-12 паралельних зовнішніх блоків на даху, що неприйнятно з огляду на ракетну вразливість. Витоки фреону у магістралях підвищують GWP-навантаження та порушують Регламент ЄС 517/2014 [30].

Варіант В - абсорбційне охолодження на скидному теплі. COP за теплом 0,6-0,7, але для ТРЦ «Рів'єра» немає централізованого джерела гарячої води: котельні влітку зупиняються. Будівництво окремого джерела тепла подвоює CAPEX. Відхиляється на стадії концепції [5].

Таблиця 2.1 - Порівняння трьох варіантів систем кондиціонування повітря бомбосховища

Критерій	Варіант А (чилер + фанкойли)	Варіант Б (спліти VRF)	Варіант В (абсорбція)
Холодопродуктивність, кВт	80	$8 \times 10 = 80$	80
COP у реальних умовах	3,20	2,55–2,70	0,70 (на теплі)
Кількість зовнішніх агрегатів	1 чилер	10–12 блоків	1 абсорбер + бойлер
Можливість резервування	Так (паралельні чилери)	Складно	Ні
Вразливість до пошкоджень даху	Низька (1 точка)	Висока (10+ точок)	Низька
Витрати фреону на	25 (тільки чилер)	60–80 (магістралі)	Немає (LiBr)

контур, кг			
Сумісність з ФВУ	Висока	Низька	Висока
Капітальні витрати, млн ₴	1,76	2,10	3,40+
Експлуатаційні витрати, тис ₴/рік	487	651	380 + газ
Доступність на ринку України	Висока	Висока	Низька
Підсумкова оцінка	Обрано	Відхилено	Відхилено

Варіант А поступається Б за паспортним COP, але у реальній експлуатації виграє завдяки роботі чилера в оптимальному режимі при змінному навантаженні; on-off цикли спліт-системи знижують SEER на 25-35 % [4]. Варіант Б катастрофічно вразливий: десяток зовнішніх блоків на даху - перша ж ракета знищує всю кондиціонувальну спроможність. До розрахунку приймається варіант А.

2.3 Вибір енергоефективної та надійної системи

Базове джерело холоду - чилер номінальною холодопродуктивністю 80 кВт при 7/12 °С і конденсації 35 °С повітрям. Робоче тіло - R410A (R32+R125), дозволене до 2030 року [30]. Цикл одноступеневий парокомпресійний з ТРВ, інверторним керуванням і повітряним конденсатором. Розрахунковий COP = 3,2 [3; 20]; потужність електроспоживання $N_{ел} = 80/3,2 = 25,0$ кВт.

Порівняння питомого енергоспоживання: 10 спліт-блоків VRF при COP_{спліт} = 2,7 потребують $N_{ел,спліт} = 80/2,7 = 29,6$ кВт. Різниця:

$$\Delta = \frac{29,6 - 25,0}{25,0} \cdot 100 \% \approx 18,5 \%,$$

тобто чилерна схема зберігає 18,5 % електроенергії. При 4 000 годинах роботи і тарифі 5,5 ₴/кВт·год економія - близько 165 000 ₴/рік.

Свіже повітря обробляється у центральному кондиціонері КЦКП-8 «Веза» (паспортна продуктивність 8 000 м³/год, реальна - 5 000 м³/год у

режимі I [33]): фільтр G4 на вході, водяний повітроохолоджувач, електричний догрівач 18 кВт, припливний вентилятор з ЧП, секція шумоглушіння. Окрема секція для режиму II - ФВК-1 (1 200 м³/год, при 1 000 м³/год потрібних, запас 20 % [10]).

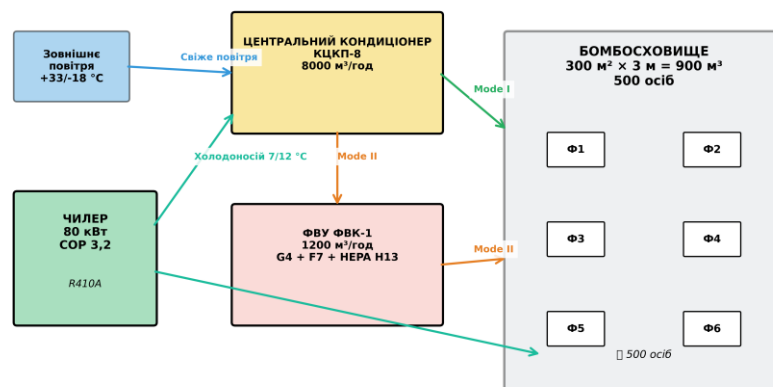
Локальне охолодження - 8 настінних фанкойлів по 5 кВт у режимі рециркуляції зали (300 м²). Живлення - магістраль DN50, керування - кімнатний термостат з ручним перемиканням швидкостей.

Схема містить три контури: холодильний R410A (компресор, конденсатор, ТРВ, випарник), холодоносія (вода 7/12 °С через випарник, повітроохолоджувач і фанкойли), повітряний (КЦКП + ФВК-1). Резервне живлення - дизельгенератор 50 кВА через АВР; стартує впродовж 15 секунд, бак 250 л забезпечує 48 год роботи при витраті 7 л/год.

Надійність обраного рішення: (1) єдиний чилер винесено у внутрішнє приміщення під залізобетонним перекриттям, що значно менш вразливе за дахові блоки спліт-системи; (2) у режимі II-III навантаження на чилер падає до 30-40 %; (3) ФВК-1 і дизельгенератор працюють автономно від чилера - життєзабезпечення зберігається навіть при повному відключенні охолодження.

Попередня економічна оцінка: CAPEX $\approx$ 1 762 500 ₴ (чилер 700, КЦКП-8 280, фанкойли 120, ФВК-1 80, повітроводи й арматура 150, автоматика 80, монтаж 352,5 тис. ₴). OPEX - 486 500 ₴/рік (з них електроенергія 330 000). Економія проти спліт-VRF - 165 000 ₴/рік, простий термін окупності - 10,68 року. Детальний NPV/IRR - у розділі 8.

Підсумково: необхідність кондиціювання обґрунтовано трьома незалежними аргументами, серед трьох архітектур обрано централізовану схему з чилером, КЦКП, фанкойлами та ФВК-1. Прийняте рішення задає вихідні дані для розрахунків розділів 3-6.



Режим I (зелений): чиста вентиляція через КЦКП-8 + холодопостачання

Режим II (помаранч.): фільтровентиляція через ФВУ при загрозі

Рисунок 2.1 - Принципова схема обраної СКП (чилер + фанкойли + ФВУ)

3 РОЗРАХУНОК ПРОЦЕСІВ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ

Розділ містить тепловологісний розрахунок СКП бомбосховища ТРЦ «Рів'єра»: необхідну холодопродуктивність, повітрообмін за трьома режимами та параметри обробки повітря для побудови процесів на $h-d$ діаграмі. Розрахунок виконано за ДБН В.2.5-67:2013 [8], ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 [9] та методикою [2; 3]. Сховище не має світлопрозорих огорожень, тому ця стаття балансу дорівнює нулю; натомість враховано тепловідбір у ґрунт.

3.1 Розрахункові параметри зовнішнього та внутрішнього повітря

Параметри зовнішнього повітря - за ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 [9] для м. Одеса (зона II за [8]): теплий період - параметри Б (забезпеченість 0,95), холодний - найхолодніша п'ятиденка (0,92).

Параметри внутрішнього повітря за ДСН 3.3.6.042-99 [11] і ДБН В.2.2-5:2023: літо $t_{в,літо} = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi_{вн} = 50\%$; зима $t_{в,зима} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi_{вн} = 50\%$. Для аварійного режиму II допускається $28\text{ }^{\circ}\text{C}$, режиму III - $32\text{ }^{\circ}\text{C}$. Розрахунок СКП виконується за режимом I.

Температура ґрунту на глибині $\geq 2,5$ м для південної України - $t_{гр} = 14\text{ }^{\circ}\text{C}$ [23]. Температура суміжного торгзалу ТРЦ зверху - $t_{сум} = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ влітку. Розрахункова температура для теплоприпливів через огороження - $t_p = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ (верхня межа комфортного режиму при заповненні 500 особами [2, с. 87]).

Таблиця 3.1 - Розрахункові параметри зовнішнього та внутрішнього повітря

Параметр	Позн.	Літо	Зима	Джерело
Температура зовнішнього повітря, $^{\circ}\text{C}$	$t_{зовн.літо} / t_{зовн.зима}$	+33,0	-18,0	ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 [9]
Ентальпія зовнішнього повітря, кДж/кг	$h_{зовн.літо} / h_{зовн.зима}$	70,0	-19,0	[9]
Відносна вологість зовнішнього	$\varphi_{зовн}$	45	85	[9]

повітря, %				
Температура внутрішнього повітря (комфорт), °C	$t_{\text{в.літо}} / t_{\text{в.зима}}$	+23,0	+20,0	ДСН 3.3.6.042-99 [11]
Відносна вологість внутрішнього повітря, %	$\varphi_{\text{вн}}$	50	50	[11]
Температура внутрішнього повітря (розрахункова), °C	t_p	+28,0	—	ДБН В.2.2-5:2023 [7]
Температура ґрунту, °C	$t_{\text{гр}}$	+14,0	+14,0	[23]
Температура суміжного приміщення (стеля), °C	$t_{\text{сум}}$	+26,0	+20,0	[практика]
Барометричний тиск, кПа	$p_{\text{бар}}$	101,325	101,325	стандарт

3.2 Розрахунок теплоприпливів і вологовиділень

Тепловий баланс у режимі І формується з чотирьох надходжень (люди, освітлення, обладнання, припливне повітря) і втрат через огорожувальні конструкції в ґрунт. Формули за [3, с. 23-48; 20, с. 112-134].

Тепловиділення від людей при 500 особах та 120 Вт/особу (60 явне + 60 приховане при $t_{\text{в.літо}} = 23\text{ °C}$):

$$Q_{\text{л}} = n \cdot q_{\text{л}} = 500 \cdot 120 = 60\,000\text{ Вт} = 60,0\text{ кВт} \quad (3.1)$$

де $n = 500$ - кількість людей; $q_{\text{л}} = 120\text{ Вт/особу}$ - питоме тепловиділення [3, табл. 2.1; 31].

Розподіл за ASHRAE Handbook [31, ch. 18]: $Q_{\text{л,явн}} = 30,0\text{ кВт}$, $Q_{\text{л,прих}} = 30,0\text{ кВт}$.

Тепловиділення від світлодіодного освітлення (питома потужність 15 Вт/м²):

$$Q_{\text{осв}} = S \cdot q_{\text{осв}} \cdot K_{\text{осв}} = 400 \cdot 15 \cdot 1,0 = 6\,000\text{ Вт} = 6,0\text{ кВт} \quad (3.2)$$

де $S = 400 \text{ м}^2$; $q_{\text{осв}} = 15 \text{ Вт/м}^2$; $K_{\text{осв}} = 1,0$ - коефіцієнт одночасності [3, с. 31].

Тепло від обладнання (ФВК-1 2,0 кВт, насос 1,0, дизель-генератор у підігріві 1,5, ДБЖ 0,5, разом $\sum N_{\text{обл}} = 5,0 \text{ кВт}$):

$$Q_{\text{обл}} = \sum N_{\text{обл}} \cdot K_{\text{од}} \cdot K_{\text{зав}} \cdot \xi = 5,0 \cdot 0,8 \cdot 0,7 \cdot 0,9 \approx 5,0 \text{ кВт} \quad (3.3)$$

де $K_{\text{од}} = 0,8$; $K_{\text{зав}} = 0,7$; $\xi = 0,9$ [3, с. 35; 20, с. 121].

У $Q_{\text{обл}}$ не входить компресор чилера - він розміщений у відокремленій венткамері й віддає тепло за межі захисного об'єму.

Теплоприплив від припливного повітря при $L_I = 5\,000 \text{ м}^3/\text{год}$ ($L_{I,c} = 1,389 \text{ м}^3/\text{с}$):

$$Q_{\text{прип}} = L \cdot \rho_{\text{пов}} \cdot c_p \cdot (t_{\text{зовн.літо}} - t_p) = 1,389 \cdot 1,2 \cdot 1,005 \cdot (33 - 28) = 8,4 \text{ кВт} \quad (3.4)$$

де $\rho_{\text{пов}} = 1,2 \text{ кг/м}^3$; $c_p = 1,005 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ [23, с. 12].

Тепловтрати через огорожувальні конструкції в ґрунт (стандартна стаціонарна теплопередача [23, с. 95]):

$$Q_{\text{огор}} = K \cdot F \cdot (t_p - t_{\text{гр}}) \quad (3.5)$$

Стіни (залізобетон 400 мм, $S_{\text{ст}} = 210 \text{ м}^2$, $K_{\text{ст}} = 1,2 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$):

$$Q_{\text{ст}} = 1,2 \cdot 210 \cdot (28 - 14) = -3\,528 \text{ Вт} \approx -3,5 \text{ кВт} \quad (3.6)$$

Підлога ($S_{\text{пл}} = 400 \text{ м}^2$, $K_{\text{пл}} = 0,8 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$):

$$Q_{\text{пл}} = 0,8 \cdot 400 \cdot (28 - 14) = -4\,480 \text{ Вт} \approx -4,5 \text{ кВт} \quad (3.7)$$

Перекрыття ($S_{\text{пер}} = 400 \text{ м}^2$, $K_{\text{пер}} = 1,5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$, $t_{\text{сум}} = 26 \text{ }^\circ\text{C}$):

$$Q_{\text{пер}} = 1,5 \cdot 400 \cdot (28 - 26) = -1\,200 \text{ Вт} = -1,2 \text{ кВт} \quad (3.8)$$

$$Q_{\text{огор}}^{\Sigma} = Q_{\text{ст}} + Q_{\text{пл}} + Q_{\text{пер}} = -3,5 - 4,5 - 1,2 = -9,2 \text{ кВт}$$

Теплоприпливи через світлопрозорі огороження дорівнюють нулю - сховище повністю глуха залізобетонна конструкція [13].

Вологовиділення від однієї людини при $t_{\text{в.літо}} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ - $g_w = 0,07 \text{ г/с}$ [31]:

$$W_{\text{л}} = n \cdot g_w = 500 \cdot 0,07 = 35 \text{ г/с} = 126,0 \text{ кг/год} \quad (3.9)$$

Сумарні теплові надходження:

$$Q_{\text{над}}^{\Sigma} = Q_{\text{л}} + Q_{\text{осв}} + Q_{\text{обл}} + Q_{\text{прип}} = 60,0 + 6,0 + 5,0 + 8,4 = 79,4 \text{ кВт}$$

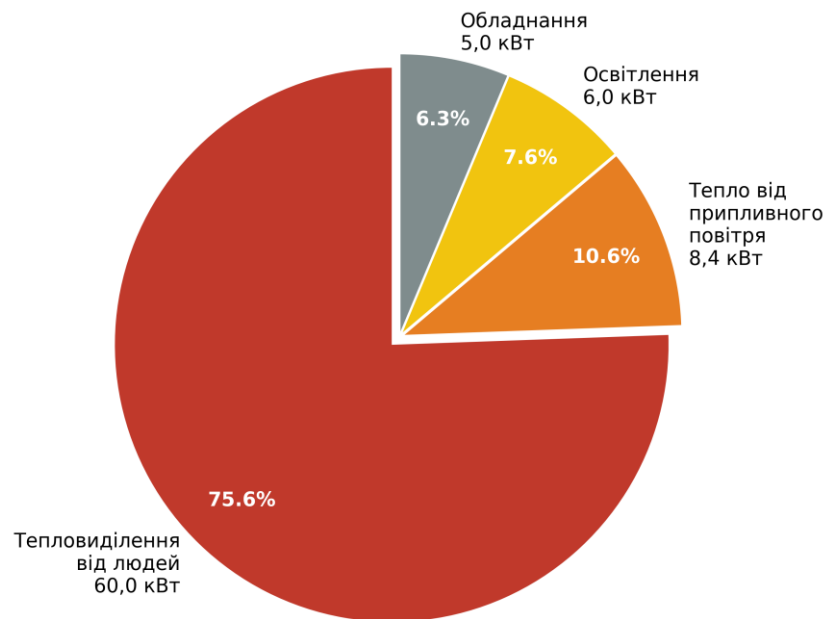
З урахуванням тепловтрат у ґрунт:

$$Q_{\text{необх}} = Q_{\text{над}}^{\Sigma} + Q_{\text{огор}}^{\Sigma} = 79,4 - 9,2 = 70,2 \text{ кВт} \quad (3.10)$$

Розподіл часток: люди 75,6 %, припливне повітря 10,6 %, освітлення 7,6 %, обладнання 6,3 %; пасивні втрати в ґрунт зменшують навантаження на 11,6 %.

Таблиця 3.2 - Тепловий баланс бомбосховища ТРЦ «Рів'єра» (літній період, режим І)

№	Стаття теплового балансу	Формула	Q, кВт	Частка, %
1	Тепловиділення від людей	(3.1)	+60,00	75,6
2	Тепловиділення від освітлення	(3.2)	+6,00	7,6
3	Тепловиділення від обладнання	(3.3)	+5,00	6,3
4	Тепловиділення з припливним повітрям	(3.4)	+8,40	10,6
5	Теплові надходження, всього	—	+79,40	100,0
6	Втрати теплоти через стіни	(3.6)	-3,50	—
7	Втрати теплоти через підлогу	(3.7)	-4,50	—
8	Втрати теплоти через перекриття	(3.8)	-1,20	—
9	Теплові втрати, всього	—	-9,20	—
10	Q необхідне (рядок 5 + рядок 9)	(3.10)	70,20	—
11	Резерв проєктний 10 %	—	+7,02	—
12	Q з резервом (для підбору ХМ)	(3.11)	77,22	—



Сумарне теплове надходження: 79,4 кВт

Рисунок 3.1 - Структура теплових надходжень у бомбосховищі (літній період, режим I)

3.3 Розрахунок повітрообміну та холодового навантаження

За ДБН В.2.2-5:2023 і ДСТУ Б А.2.2-12:2011 [13] передбачено три режими: I (чиста вентиляція, 10 м³/(год·особу), до 48 год); II (фільтровентиляція, 2 м³/(год·особу), до 12 год); III (повна ізоляція, 6 год).

Режим I:

$$L_I = N \cdot l_I = 500 \cdot 10 = 5\,000 \text{ м}^3/\text{год} = 1,389 \text{ м}^3/\text{с} \quad (3.11)$$

Перевірка за кратністю повітрообміну:

$$n_{\text{пов}} = \frac{L_I}{V_{\text{сх}}} = \frac{5\,000}{900} = 5,56 \text{ год}^{-1} \quad (3.12)$$

де $V_{\text{сх}} = 300 \cdot 3,0 = 900 \text{ м}^3$. Отримана кратність 5,56 год⁻¹ перевищує мінімум 4 год⁻¹ за [8].

Режим II:

$$L_{II} = N \cdot l_{II} = 500 \cdot 2 = 1\,000 \text{ м}^3/\text{год} \quad (3.13)$$

Питома витрата 2 м³/(год·особу) забезпечує надлишковий тиск $\geq +50 \text{ Па}$ [12].

Режим III: $L_{III} = 0$, регенерація автономними патронами; детальний розрахунок - у розділі 7.

Сумарне холодове навантаження з проєктним резервом 10 %:

$$Q_{\text{хол}} = Q_{\text{необх}} \cdot (1 + k_{\text{рез}}) = 70,2 \cdot 1,10 = 77,22 \text{ кВт} \quad (3.14)$$

де $k_{\text{рез}} = 0,10$ [3, с. 51]. Прийнято стандартний типорозмір Bitzer/Climaveneta 80,0 кВт (запас 3,6 %).

Масова витрата припливного повітря:

$$G = L_I \cdot \rho = 1,389 \cdot 1,2 = 1,667 \text{ кг/с} = 6\,000 \text{ кг/год} \quad (3.15)$$

Точка роси внутрішнього повітря (за рівнянням Магнуса):

$$t_{\text{роси}} = \frac{237,3 \cdot \ln(\varphi/100) + b \cdot t/(c + t)}{17,27 - \ln(\varphi/100) - b \cdot t/(c + t)} \approx 12,0 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.16)$$

де $b = 17,27$; $c = 237,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{вн}} = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi_{\text{вн}} = 50 \text{ \%}$. Температура холодоносія на виході $t_{w2} = 7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ нижча за точку роси, що забезпечує конденсаційне осушування $\Delta W \approx 36 \text{ кг/год}$.

Таблиця 3.3 - Витрати повітря бомбосховища за режимами

Режим	Призначення	Питома витрата, м³/(год·особу)	Загальна витрата, м³/год	Тривалість роботи, год	Джерело
I	Чиста вентиляція	10	5 000	48	ДБН В.2.2-5:2023 [7]
II	Фільтровентиляція	2	1 000	12	[7] + ДСТУ 9077:2021 [10]
III	Повна ізоляція + регенерація	0	0	6	[13]

Таблиця 3.4 - Підсумок розрахунку холодопродуктивності системи

Показник	Значення	Одиниця
Сумарні теплові надходження $Q_{\text{над}}^{\Sigma}$	79,40	кВт
Теплові втрати у ґрунт $Q_{\text{огор}}^{\Sigma}$	-9,20	кВт
Необхідна холодопродуктивність $Q_{\text{необх}}$	70,20	кВт
Проєктний резерв 10 %	7,02	кВт
Розрахункова	77,22	кВт

холодопродуктивність $Q_{\text{хол}}$		
Номінальна холодопродуктивність ХМ (підбір)	80,00	кВт
Витрата повітря режим I, L_I	5 000	м³/год
Масова витрата повітря, G	1,667	кг/с
Кратність повітрообміну, $n_{\text{пов}}$	5,56	год ⁻¹
Температура холодоносія на виході з ВПР	7,0	°С
Точка роси внутрішнього повітря	12,0	°С
Вологовиділення від людей, W_L	126,0	кг/год

3.4 Побудова процесів на h-d діаграмі

Побудову виконано для двох періодів з частковою рециркуляцією 30 % за масою.

Літній процес. Характерні точки:

- Н (зовнішнє): $t_H = 33 \text{ °С}$, $\varphi_H = 45 \text{ \%}$, $h_H = 70 \text{ кДж/кг}$, $d_H = 14,5 \text{ г/кг}$;
- В (внутрішнє рециркуляційне): $t_B = 23 \text{ °С}$, $\varphi_B = 50 \text{ \%}$, $h_B = 45 \text{ кДж/кг}$, $d_B = 8,5 \text{ г/кг}$;
- С (суміш 70/30): $h_C = 0,7 \cdot 70 + 0,3 \cdot 45 = 62,5 \text{ кДж/кг}$, $t_C = 30,0 \text{ °С}$, $d_C = 12,7 \text{ г/кг}$;
- О (після охолоджувача на $\varphi = 95 \text{ \%}$): $t_O = 12,0 \text{ °С}$, $h_O = 33,0 \text{ кДж/кг}$, $d_O = 8,3 \text{ г/кг}$;
- П (приплив після підігріву вентилятором +4 К): $t_P = 16,0 \text{ °С}$, $h_P = 37,0 \text{ кДж/кг}$, $d_P = 8,3 \text{ г/кг}$;
- замикання: повітря в П асимілює тепло-вологу в сховищі з кутовим коефіцієнтом променя $\varepsilon_L = Q_{\text{явн}}/W_L = 41,8 \cdot 3600/126 \approx 1\,194 \text{ кДж/кг}$.

Холодопродуктивність повітроохолоджувача:

$$Q_{\text{ВПР}} = G \cdot (h_C - h_O) = 1,667 \cdot (62,5 - 33,0) = 49,2 \text{ кВт}$$

Решта (28,0 кВт) компенсується перепадом температур припливного повітря ($16 \text{ °С} \rightarrow 23 \text{ °С}$).

Зимовий процес:

- Н: $t_H = -18\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi_H = 85\%$, $h_H = -19\text{ кДж/кг}$, $d_H = 0,6\text{ г/кг}$;
- ПП (після попереднього підігріву): $t_{ПП} = +5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $h_{ПП} = +5,0\text{ кДж/кг}$,
 $d_{ПП} = 0,6\text{ г/кг}$;
- В (внутрішнє рециркуляційне): $t_B = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi_B = 50\%$, $h_B = 38\text{ кДж/кг}$,
 $d_B = 7,3\text{ г/кг}$;
- С (суміш 70/30): $h_C = 14,9\text{ кДж/кг}$, $t_C = 9,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $d_C = 2,6\text{ г/кг}$;
- З (після парового зволоження): $t_3 = 9,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi_3 \approx 90\%$, $h_3 = 24,0\text{ кДж/кг}$,
 $d_3 = 6,0\text{ г/кг}$;
- П (після вторинного підігріву): $t_{II} = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$, $h_{II} = 39,0\text{ кДж/кг}$, $d_{II} = 6,0\text{ г/кг}$.

Сумарна теплова продуктивність системи у зимовому періоді 35-40 кВт;
деталі калориферів - у розділі 5.

Рециркуляційний контур (30 %) знижує витрату холоду на 21 % порівняно з прямоточною схемою [2, с. 145-152]. Отримані значення ($Q_{\text{хол}} = 77,2\text{ кВт}$, $L_I = 5\,000\text{ м}^3/\text{год}$, $L_{II} = 1\,000\text{ м}^3/\text{год}$, точка роси $12\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура припливу $16/24\text{ }^{\circ}\text{C}$) - вхідні дані для розділів 4-6, 8.

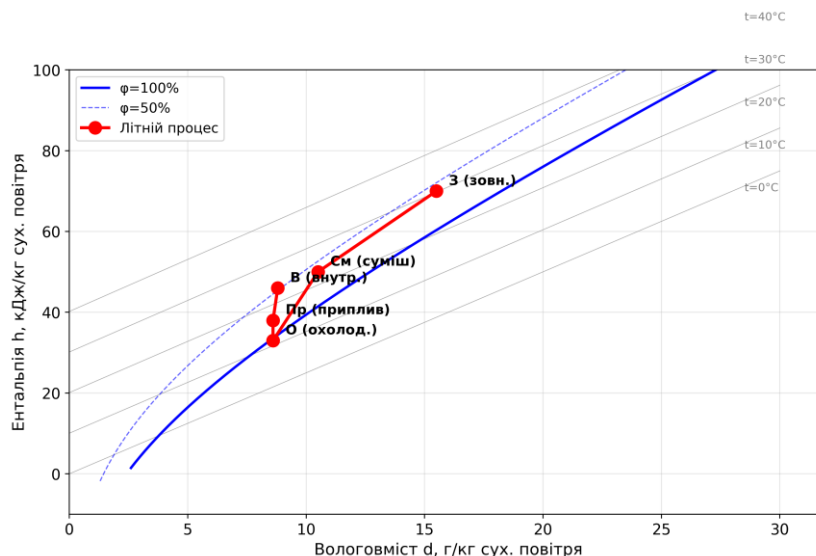


Рисунок 3.2 - h-d діаграма літнього процесу обробки повітря

4 ВИБІР І РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ПОВІТРОРозПОДІЛЕННЯ

У розділі обґрунтовано та розраховано мережу повітропроводів СКП бомбосховища ТРЦ «Рів'єра», виконано аеродинамічний розрахунок магістралі та чотирьох відгалужень, підібрано повітророзподільні й витяжні пристрої. Розрахункова витрата у режимі $I - L = 5000 \text{ м}^3/\text{год}$ (за розділом 3 та ДБН В.2.2-5:2023 [7]). Гідравлічні втрати, перерізи й номенклатура - за ДБН В.2.5-67:2013 [8] та ДБН А.3.1-9:2015 [14].

4.1 Схема повітроводів

Прийнято класичну деревовидну (магістрально-радіальну) схему: магістральний повітровод відходить від КЦКП-8, прокладається вздовж стелі основного приміщення (висота закладання $\approx 2,75 \text{ м}$) і живить чотири бічні відгалуження [21].

Функціональні зони:

- В1 - основний зал-укриття 300 м^2 , 16 із 20 стельових дифузорів;
- В2 - блок санвузлів 30 м^2 , локальна витяжка та підпір;
- В3 - технічне приміщення з КЦКП-8, ФВК-1, дизель-генератором (40 м^2);
- В4 - коридор-тамбур із гермодверима 30 м^2 , надлишковий тиск.

Сума витрат: $3000 + 500 + 800 + 700 = 5000 \text{ м}^3/\text{год}$. Балансування - рівні втрати тиску на паралельних гілках з діафрагмовими дросель-клапанами [14].

Матеріал - оцинкована сталь товщ. $0,7 \text{ мм}$ за ДСТУ-Н Б В.2.5-65:2014, прямокутний переріз (через обмежену висоту простору $\approx 480 \text{ мм}$), фланцеві з'єднання з EPDM. Корозійна стійкість при ϕ до 80% , негорючість А1. Підвіси через $1,5 \text{ м}$ (магістраль) і $1,2 \text{ м}$ (відгалуження). У точках проходу через гермоперегородки - манжети та клапани надлишкового тиску КИД-100. Теплоізоляція - мінеральна вата 30 мм ($\lambda = 0,038 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$).

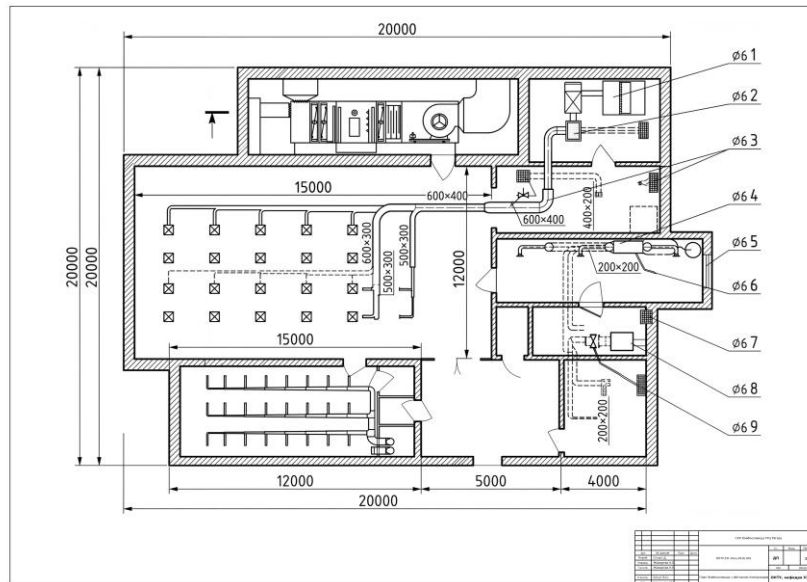


Рисунок 4.1 - План бомбосховища ТРЦ «Рів'єра» з обв'язкою повітроводів (А1, 1:50)

4.2 Аеродинамічний розрахунок

Розрахунок виконано методом питомих втрат за ДБН В.2.5-67:2013 [8] з формулою Альтшуля при шорсткості $k_e = 0,1$ мм.

Підбір перерізу магістралі при $v = 6$ м/с:

$$A_{\text{маг}} = \frac{L}{v \cdot 3600} = \frac{5000}{6 \cdot 3600} = 0,232 \text{ м}^2. \quad (4.1)$$

Обираємо стандартний переріз 600×400 мм, $A_{\text{факт}} = 0,24 \text{ м}^2$. Фактична швидкість:

$$v_{\text{маг}} = \frac{5000}{0,24 \cdot 3600} = 5,79 \text{ м/с},$$

у межах $5 \dots 8$ м/с [8, 21].

Гідравлічний (еквівалентний) діаметр:

$$d_e = \frac{2ab}{a+b} = \frac{2 \cdot 0,600 \cdot 0,400}{0,600 + 0,400} = 0,480 \text{ м} = 480 \text{ мм}. \quad (4.2)$$

Точніше $d_{e,\text{екв}} \approx 0,533$ м для коефіцієнта тертя. $Re = 5,79 \cdot 0,533 / (15 \cdot 10^{-6}) \approx 205\,561$ - турбулентна течія, $\lambda_{\text{тр}} = 0,025$ [24].

Втрати тиску на тертя за Дарсі-Вейсбахом:

$$\Delta p_{\text{тр}} = \lambda \cdot \frac{l}{d_e} \cdot \frac{\rho v^2}{2}, \quad (4.3)$$

де $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$. Для магістралі $l_m = 18 \text{ м}$: $\Delta p_{\text{тр.м}} = 17,0 \text{ Па}$. Для критичної бічної ділянки В1 ($l = 7 \text{ м}$, $v = 5,56 \text{ м/с}$, $d_e = 0,382 \text{ м}$): $\Delta p_{\text{тр.бічн}} = 8,5 \text{ Па}$. Сума: $\Delta p_{\text{тр.}\Sigma} = 25,5 \text{ Па}$.

Втрати на місцевих опорах:

$$\Delta p_m = \Sigma \xi \cdot \frac{\rho v^2}{2}, \quad (4.4)$$

Таблиця 4.1 - Перелік локальних опорів критичної гілки повітропроводу

№	Фасонний елемент	ξ
1	Вхід з вентустановки до магістралі	0,50
2	Коліно 90° (вихід з КЦКП)	0,30
3	Коліно 90° на магістралі	0,30
4	Трійник прохідний № 1	0,60
5	Трійник прохідний № 2	0,60
6	Трійник прохідний № 3	0,60
7	Трійник на відгалуженні В1	0,60
8	Коліно 90° на відгалуженні	0,30
9	Коліно 90° на відгалуженні	0,30
10	Коліно 90° біля дифузора	0,30
11	Стельовий дифузор VENTS DP-400	1,00
	$\Sigma \xi$	5,40

При $\Sigma \xi = 5,4$ і $p_{\text{дин}} \approx 19,3 \text{ Па}$: $\Delta p_{\text{м.}\Sigma} = 104,4 \text{ Па}$.

$$\Delta p_{\text{кр}} = \Delta p_{\text{тр.}\Sigma} + \Delta p_{\text{м.}\Sigma} = 25,5 + 104,4 = 129,9 \text{ Па}.$$

Значення в діапазоні 100-200 Па [22, табл. 8.6].

Таблиця 4.2 - Аеродинамічний розрахунок відгалужень повітропровідної мережі

Гілка	Призначення	L , м ³ /год	Переріз, мм	A , м ²	v , м/с	d_e , мм	l , м	$\Sigma \xi$	Δp , Па
В1	Основний зал (300 м ²)	3000	500×300	0,15	5,56	420	18	1,9	55,0
В2	Санвузли	500	200×150	0,03	4,63	189	12	3,3	62,9
В3	Технічне приміщення	800	300×200	0,06	3,70	266	14	3,3	38,0
В4	Коридор-тамбур	700	300×200	0,06	3,24	266	16	2,8	27,1

Критична - гілка В1. Окрім втрат у мережі ($\Delta p_{\text{дукт}} = 129,9 \text{ Па}$), у систему входять: КЦКП-8 250 Па, шумоглушник 50 Па, ФВК-1 40 Па.

$$\Delta p_{\text{сист}} = 129,9 + 250 + 50 + 40 = 469,9 \text{ Па.}$$

Необхідний статичний напір з резервом 20 %:

$$\Delta p_{\text{вент}} \geq 1,2 \cdot \Delta p_{\text{сист}} = 1,2 \cdot 469,9 \approx 564 \text{ Па.} \quad (4.5)$$

Це вихідні дані для підбору вентагрегата у розділі 5.

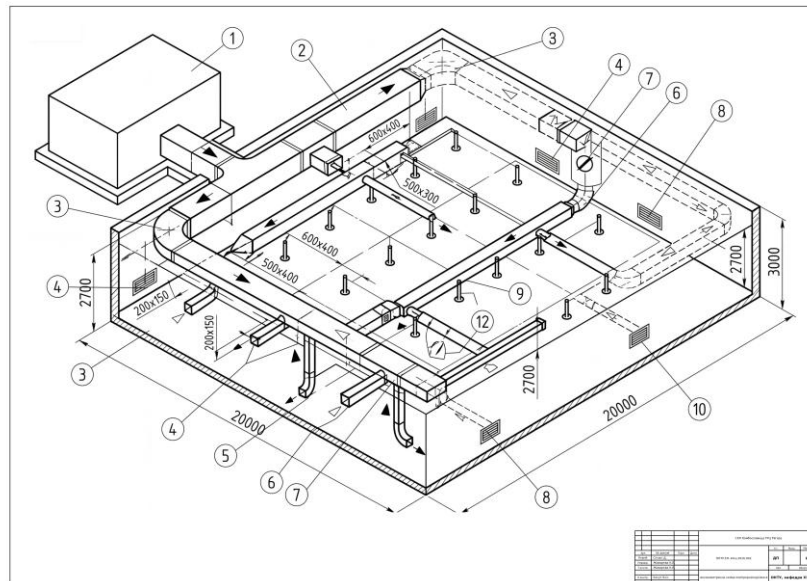


Рисунок 4.2 - Аксонометрична схема системи повітророзподілення (A1)

4.3 Підбір повітророзподільних пристроїв

Завдання: рівномірний розподіл припливного повітря по площі; швидкість у зоні дихання на висоті $1,5 \text{ м} \leq 0,1 \text{ м/с}$ [7]; $L_p \leq 45 \text{ дБА}$.

Як припливний пристрій обрано стельовий 4-напрямний дифузор VENTS DP-400 (400×400 мм, приєднання Ø250 мм). Симетричний розподіл струменів формує зону змішування на 2,2 м, регульована заслінка, оцинкована сталь.

Необхідна кількість:

$$N_{\text{диф}} = \frac{L_{\text{осн}}}{L_{\text{диф}}} = \frac{3750}{187,5} = 20 \text{ шт.,}$$

де $L_{\text{осн}} = 3750 \text{ м}^3/\text{год}$; $L_{\text{диф}} = 187,5 \text{ м}^3/\text{год}$ [25]. Дифузори рознесено у полі 4×5 (крок 5,0 м поздовжньо, 3,75 м поперечно), без «глухих» кутів.

Перевірка швидкості в зоні дихання [22]:

$$v_{\text{зал}} = v_0 \cdot K_n \cdot \frac{\sqrt{A_0}}{x},$$

де $v_0 \approx 2,5$ м/с; $K_n = 1,1$; $A_0 = 0,025$ м²; $x = 1,5$ м. $v_{\text{зал}} = 0,049$ м/с - удвічі менше за 0,1 м/с [7].

Для витяжки обрано однорядні регульовані решітки AMN-400×200 «Vents» (450-550 м³/год) [24]:

$$N_{\text{вит}} = \frac{L_{\text{вит}}}{L_{1,\text{вит}}} = \frac{4000}{500} = 8 \text{ шт.}$$

Розміщення: 4 у залі, 2 у санвузлах, 1 у технічному, 1 у тамбурі. Витяжний колектор виходить через зовнішній клапан над рівнем землі (≥ 8 м від точки забору [8]).

Таблиця 4.3 - Перелік повітророзподільних пристроїв системи

Призначення	Модель	Тип	Розміри, мм	L ₁ , м ³ /год	Кількість, шт.	Загальна L, м ³ /год
Стельовий припливний дифузор	VENTS DP-400	4-напрямний квадратний	400×400	187,5	20	3750
Стінна витяжна решітка	AMN-400×200	однорядна регульована	400×200	500	8	4000
Гермоклапан надлишкового тиску	КИД-100	мембранний	DN-100	—	2	—
Дросель-клапан балансування	ДКР-300	ручний	300×200	—	4	—

Дисбаланс +1000 м³/год (приплив > витяжка) забезпечує підпір $\geq +50$ Па за [12].

Підсумок:

- магістраль 600×400 мм при $v = 5,79$ м/с;
- 4 відгалуження з мінімальним розкидом Δp 27...63 Па;
- загальний опір системи 469,9 Па, необхідний напір вентилятора ≥ 564 Па;

- 20 дифузорів DP-400 у решітці 4×5 дають $v_{\text{зал}} = 0,049$ м/с;
- 8 решіток AMN-400×200 з підпором +50 Па.

Графічна деталізація - на А1-кресленнях (рис. 4.1, 4.2).

5 ВИБІР ПРИПЛИВНО-ВИТЯЖНОЇ УСТАНОВКИ

У розділі обґрунтовано вибір комплексу обладнання припливно-витяжної системи бомбосховища ТРЦ «Рів'єра». Mode I потребує $L_I = 5000$ м³/год з нагріванням, охолодженням і фільтрацією; Mode II - $L_{II} = 1000$ м³/год при $\Delta p \geq +50$ Па. Опір повітроводів ≈ 470 Па, статичний напір вентилятора ≈ 564 Па (запас 20 %). Прийнято КЦКП-8 «Веза» з ФВК-1; автономне живлення - дизель-генератор 50 кВА і UPS 15 кВА [7; 10; 33].

5.1 Вибір вентиляційної установки з фільтровентиляцією

Установка повинна забезпечити подачу очищеного повітря, мікроклімат за [7], автоматичне перемикання на фільтровентиляцію та підтримку надлишкового тиску. Обрано КЦКП-8-1А «Веза» з номінальною продуктивністю $L_{ном} = 8000$ м³/год (запас 60 % над $L_I = 5000$ м³/год). Запас за продуктивністю 15-20 % і за тиском 20-25 % рекомендований ДСТУ Б А.2.2-12:2011 з огляду на старіння фільтрів і забруднення теплообмінних поверхонь.

Компонування - класична секційна: вісім послідовних модулів - приймальна камера з заслонкою та сервоприводом, секція префільтра G4, водяний охолоджувач ($F_{ВПр} = 36$ м², 77,2 кВт), водяний калорифер 30 кВт, секція зволоження, відцентровий вентилятор 4,0 кВт, шумоглушник, камера видачі. Залишковий рівень шуму у венткамері ≤ 70 дБ(А), у обслуговуваному приміщенні ≤ 45 дБ(А). Габарити 2500×1500×1500 мм, маса 380 кг [33]. Підключення: холодоносій Ø50, теплоносій Ø32.

Електродвигун - АИР100L4, 4,0 кВт, 1430 об/хв; ККД 86 %, $\cos\phi = 0,84$. Робоча точка - 580 Па при $L = 5000$ м³/год (опір мережі 469,9 Па + запас 20 %). Регулювання - частотний перетворювач: знижує споживану потужність пропорційно кубу обертів при переході в Mode II, утримує швидкість у зоні дихання $\leq 0,1$ м/с [7].

Розглянуто три альтернативи. Climaveneta СТА 80 - технічно еквівалентний, але дорожчий на 35-40 % і поставка 12-14 тижнів. Carrier 39SQ-08 - теплообмінники без антикорозійного покриття, неприйнятно для вологого підвалу. КЦКП-8-1А - українське виробництво, локальний сервіс, відповідність ДБН В.2.5-67:2013, оцинкований корпус і теплообмінник з гідрофобним покриттям. Обрано КЦКП-8-1А.

Таблиця 5.1 - Технічна характеристика установки КЦКП-8-1А

Параметр	Позначення	Одиниці	Значення
Номінальна продуктивність за повітрям	$L_{\text{ном}}$	м³/год	8000
Робоча продуктивність у Mode I	L_I	м³/год	5000
Запас за продуктивністю	ΔL	%	60
Повний тиск вентилятора	p_v	Па	580
Потужність електродвигуна	$N_{\text{ел}}$	кВт	4,0
Частота обертання	n	об/хв	1430
ККД вентилятора	η_v	—	0,86
Холодопродуктивність охолоджувача	$Q_{\text{охол}}$	кВт	77,2
Теплопродуктивність калорифера	$Q_{\text{кал}}$	кВт	30,0
Габарити (L × B × H)	—	мм	2500 × 1500 × 1500
Маса в зборі	m	кг	380
Підключення холодоносія	D_x	мм	Ø50
Підключення теплоносія	D_t	мм	Ø32
Захист корпусу	—	—	IP 54
Виробник	—	—	Вежа (Україна)

Оцинкованість корпусу і подвійні ущільнення панелей створюють внесок у герметичність припливу - критично для підтримки $\Delta p \geq +50$ Па у Mode II-III.

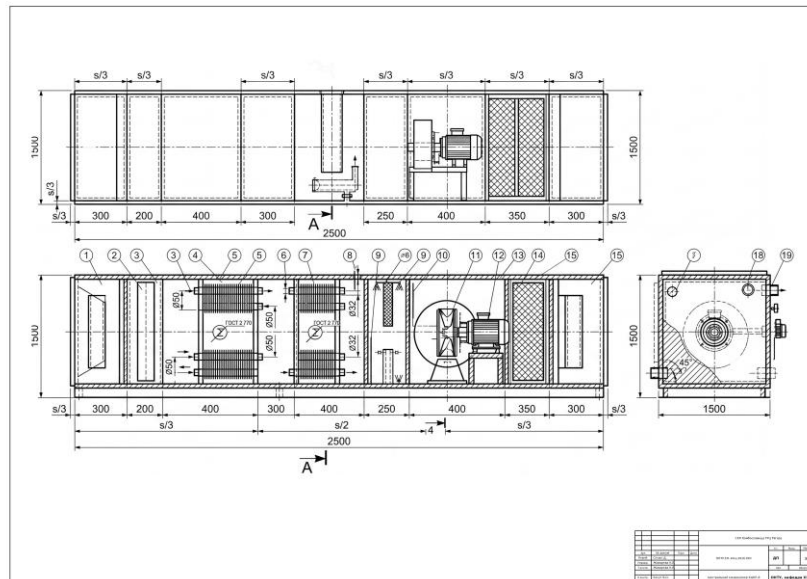


Рисунок 5.1 - Центральний кондиціонер КЦКП-8 (А1, три проєкції)

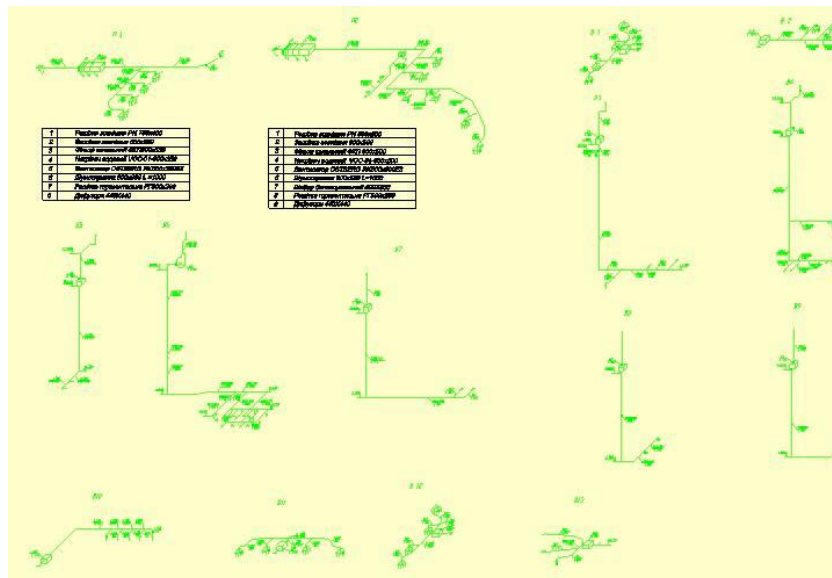


Рисунок 5.2 - Технічна схема (фрагмент) системи вентиляції та кондиціювання з документації об'єкта

5.2 Підбір фільтрів очищення повітря

У Mode II система повинна видаляти не лише пил, але й біологічні агенти, хімічні забруднювачі та радіоактивні частки за ДСТУ 9077:2021 [10] та ISO 16890:2016 [28]. Фільтрація - каскад з трьох ступенів.

Ступінь 1 - G4 (касєтний 592×592×96 мм, скловолоконне полотно, $ePM_{10} = 50\%$): захист тонших фільтрів від крупних часток. $\Delta p_{\text{чист}} = 50$ Па, $\Delta p_{\text{кін}} = 200$ Па. Інтервал заміни: 3-4 міс. у Mode I або 30-40 діб у Mode II [10].

Ступінь 2 - F7 (мішковий 592×592×360 мм, синтетика з електростатичною підкладкою, $ePM1 \geq 65 \%$): затримує дрібний пил, спори, бактерії від 0,3 мкм. $\Delta p_{\text{чист}} = 100$ Па, $\Delta p_{\text{кін}} = 250$ Па. Встановлено перед холодильним теплообмінником - чистий потік не забруднює оребрення випарника.

Ступінь 3 - HEPA H13 + вугільний шар (у складі ФВК-1, паралельний канал з відсіченням основного при Mode II). HEPA H13 за EN 1822: $\geq 99,95 \%$ для часток 0,3 мкм (бактеріальні аерозолі, віруси, радіоактивні аерозолі). Вугільний шар (12 кг активованого кокосового вугілля) затримує газу: пари органічних розчинників, NOx, сірчисті сполуки. $\Delta p_{\text{чист}} = 250$ Па, $\Delta p_{\text{кін}} = 600$ Па. Ресурс HEPA у Mode II ≈ 240 годин (10 діб), що з багатократним запасом покриває нормативні 12 годин [7].

Сумарний перепад тиску:

$$\Delta p_{\text{сум.чист}} = 50 + 100 + 250 = 400 \text{ Па.}$$

$$\Delta p_{\text{сум.кін}} = 200 + 250 + 600 = 1050 \text{ Па.}$$

Це враховано при виборі вентилятора КЦКП-8. У штатному режимі експлуатуються G4 + F7, перехід на HEPA-каскад з одночасним перемиканням характеристики вентилятора через ЧП на 1200 м³/год [33].

ФВК-1 - $L_{\text{ФВУ}} = 1200$ м³/год (запас 20 % над $L_{II} = 1000$ м³/год для 500 осіб [7; 10]). Габарити 1200×800×1600 мм, маса 145 кг, корпус 2 мм з полімерним покриттям, придатний для дезінфекційного оброблення.

Сумарний каскад G4 + F7 + H13 забезпечує $ePM1 \geq 80 \%$ за [28], що відповідає категорії А-1 за ДСТУ 9077:2021 і дозволяє експлуатувати сховище за повним переліком надзвичайних ситуацій [10; 25].

Таблиця 5.2 - Характеристики фільтрів за ступенями каскаду

Ступінь	Клас	Розмір касети, мм	$\Delta p_{\text{чист}}$, Па	$\Delta p_{\text{кін}}$, Па	Ефективність $ePM1$, %	Ресурс у Mode I, міс	Ресурс у Mode II, год
---------	------	-------------------	-------------------------------	------------------------------	-------------------------	----------------------	-----------------------

5.3 Автономне живлення та режим надлишкового тиску

За ДБН В.1.2-4:2019 [12] система життєзабезпечення повинна автономно працювати ≥ 48 год у Mode I, 12 год у Mode II, 6 год у Mode III. Передбачено АВР з перемиканням за 5-10 с.

Навантаження у Mode I: вентилятор КЦКП-8 (4 кВт), компресор чилера (24,1 кВт, §6.3), насоси (3 кВт), автоматика (1 кВт), аварійне освітлення (6 кВт), ФВУ в режимі очікування (2 кВт):

$$N_I = 4 + 24,1 + 3 + 1 + 6 + 2 = 40,1 \text{ кВт.}$$

При $\cos\phi = 0,8$: $S_I = 50,1 \text{ кВ}\cdot\text{А}$. Обрано дизельний генератор 50 кВА (40 кВт активної), модель Cummins C50D5 або аналог. Запас 20 %; у Mode I компресор переважно у пульсуючому режимі з 60-70 % завантаженням.

У Mode II/III компресор відключається (ціль - захист, не комфорт):

$$N_{II} = 2 + 1 + 6 = 9 \text{ кВт.}$$

При $\cos\phi = 0,9$: $10 \text{ кВ}\cdot\text{А}$. Обрано UPS онлайн-типу 15 кВА: забезпечує безперервне живлення критичної автоматики під час переходу з мережі на дизельгенератор та підтримує 30-40 хв при несправності генератора.

Запас палива (питома витрата 0,25 л/(кВт·год)):

$$V_{\text{пал}} = 0,25 \cdot 40 \cdot 0,75 \cdot 48 = 360 \text{ л.}$$

З двократним запасом - 720 л у двох баках по 360 л у пожежобезпечному відсіку з GTI-100 за стіною EI 90.

Надлишковий тиск $\Delta p \geq +50 \text{ Па}$ [12]. Створюється комбінацією припливу через ФВК-1 та клапана КНТ-50 (відкриття при 60 Па, гістерезис 10 Па). При штатній роботі ФВУ та закритих гермодверях у захищеному об'ємі - 80-90 Па.

Для входу-виходу під час Mode II-III - тамбур-шлюз 6,5 м² з двома гермодверима ДГ-1,2-2,1 (1200×2100 мм). Кабельні вводи через Roxtec, що зберігають герметичність при Δp до 200 Па.

Структура АВР: А1 - автомат основної шини, К1/К2 - контактори, АТS-50 - релейний таймер; UPS паралельно зарядному випрямлячу від генератора [12; 25].

Підсумок: КЦКП-8-1А «Веза» (8000 м³/год); каскад G4 + F7 + НЕРА Н13 + вугільний адсорбер; ФВК-1 (1200 м³/год); дизельний генератор 50 кВА і UPS 15 кВА; автономність 48 год при $N_f = 40,1$ кВт. Надлишковий тиск $\geq +50$ Па забезпечують корпус КЦКП-8, ФВК-1 і клапан КНТ-50, що відповідає [7; 10; 12]. $ePM1 \geq 80$ % за ISO 16890:2016 [28] переводить сховище у категорію А-1. У наступному розділі підбирається парокомпресійна холодильна машина 77,2 кВт на R410A з COP = 3,2.

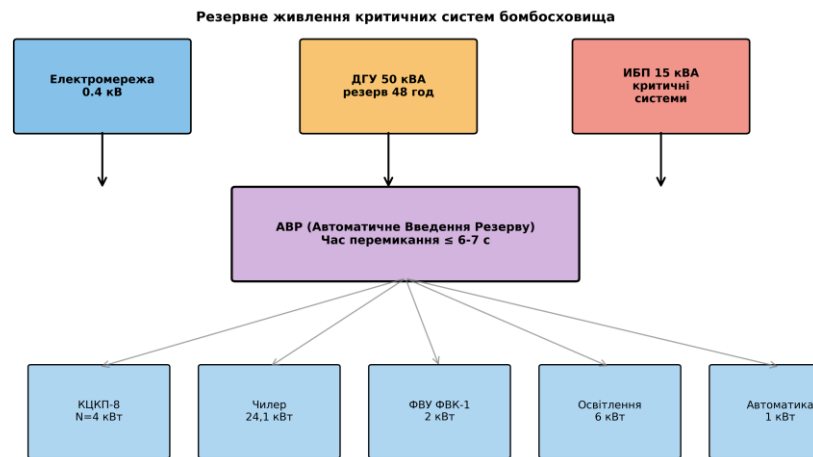


Рисунок 5.5 - Схема резервного живлення з автоматичним введенням резерву (АВР)

6 ПІДБІР І РОЗРАХУНОК ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ

Холодильна машина - ядро СКП: виробляє холодну воду для повітроохолоджувача КЦКП-8. Теплове навантаження у літньому режимі - $Q_{\text{хол}} = 77,2$ кВт з 10 %-м запасом. Обрано номінальну продуктивність 80 кВт; реалізує одноступеневий парокомпресійний цикл на R410A. Розділ розв'язує чотири задачі: вибір робочого тіла та схеми; термодинамічний розрахунок циклу; тепловий розрахунок і підбір апаратів; гідравлічний розрахунок трубопроводів.

6.1 Вибір холодоагента та обґрунтування схеми холодильного циклу

Український ринок чилерів від 2024 р. перейшов на робочі тіла з ODP = 0 і прогресивно знижуваним GWP за Регламентом (ЄС) № 517/2014 [30]. Розглянуто три альтернативи (таблиця 6.1).

Таблиця 6.1 - Порівняння робочих тіл, доступних для чилерів 80 кВт

Параметр	R410A	R32	R134a
Тип за класифікацією ASHRAE 34	HFC-суміш	HFC-моно	HFC-моно
ODP	0	0	0
GWP (AR5)	2088	675	1430
Клас безпеки	A1	A2L (займистий)	A1
Нормальна $t_{\text{кип}}$, °C	-51,4	-51,7	-26,1
Тиск конденсації при 45 °C, бар	27,4	27,8	11,6
Об'ємна холодопродуктивність, кДж/м³	3950	4250	1850
Доступність у чилерах 80 кВт (UA)	широка	обмежена	обмежена

R134a відсіюється: об'ємна холодопродуктивність майже вдвічі нижча, нижчий COP при високих температурах конденсації. R32 - найперспективніший за GWP (675), але клас A2L вимагає додаткових заходів детектування витоків і аварійної вентиляції [8]; доступність 80 кВт чилерів в Україні обмежена.

Прийнято R410A (азеотропна суміш R32/R125 50/50). Переваги: клас A1 (негорючий, нетоксичний), широка лінійка компресорів, об'ємна холодопродуктивність 3951 кДж/м³. GWP = 2088 при зарядці 25 кг дає 52,2 т CO₂-екв, що в межах [30]. Обов'язкові заходи: щоквартальна перевірка герметичності, рекуперація наприкінці експлуатації.

Прийнято класичну одноступеневу схему з ТРВ. При $t_{\text{кип}} = +2\text{ }^{\circ}\text{C}$ / $t_{\text{конд}} = +45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ступінь стиснення $p_{\text{конд}}/p_{\text{кип}} = 27,4/8,0 = 3,43$ - в зоні високої ефективності спіральних компресорів. Двоступенева схема економічно виправдана лише при ступенях стиснення понад 6-7 [2, с. 142].

Контур: компресор, повітроохолоджуваний оребрений конденсатор, ресивер, ТРВ, паяний пластинчастий випарник. Допоміжно: фільтр-осушувач, оглядове вікно з індикатором вологи, реле тисків, реле різниці тиску оливи, віброгасники.

Холодоносій - вода 7 °С (без водно-гліколевих сумішей). При $t_p = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $\phi = 75\%$ точка роси $\approx 23\text{ }^{\circ}\text{C}$, тому подавальна 7 °С гарантує конденсаційне осушення повітря на повітроохолоджувачі.

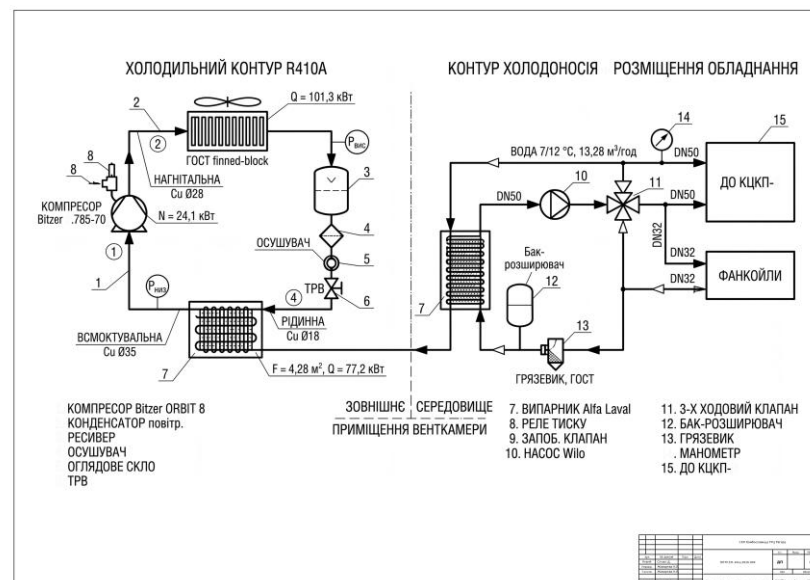


Рисунок 6.1 - Принципова схема холодильного контуру з розташуванням кондиціонера (A1)

6.2 Термодинамічний розрахунок циклу холодильної машини

Прийняті умови: $t_{\text{кип}} = +2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($p_{\text{кип}} = 8,0 \text{ бар}$), $t_{\text{конд}} = +45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($p_{\text{конд}} = 27,4 \text{ бар}$), перегрів пари $\Delta t_{\text{пер}} = 5 \text{ К}$, переохолодження рідини $\Delta t_{\text{пох}} = 5 \text{ К}$, $\eta_{is} = 0,85$ [34].

Характерні точки:

- 1': насичена пара, $t_{1'} = +2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $h_{1'} = 420 \text{ кДж/кг}$;
- 1: перегріта пара перед компресором, $t_1 = +7 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $h_1 \approx 424,7 \text{ кДж/кг}$;
- 2: пара високого тиску, $t_2 \approx 75 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $h_2 = 460 \text{ кДж/кг}$;
- 3': насичена рідина, $t_{3'} = +45 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $h_{3'} = 270 \text{ кДж/кг}$;
- 3: переохолоджена рідина, $t_3 = +40 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $h_3 \approx 261,75 \text{ кДж/кг}$;
- 4: двофазна суміш після ТРВ, $t_4 = +2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $h_4 = h_3 = 261,75 \text{ кДж/кг}$.

Таблиця 6.2 - Параметри стану R410A у характерних точках циклу

Точка	Стан	t, $^{\circ}\text{C}$	p, бар	h, кДж/кг	v, м ³ /кг
1'	насич. пара	2	8,0	420,00	0,0395
1	перегр. пара	7	8,0	424,70	0,0412
2	пара ВТ	75	27,4	460,00	0,0142
3'	насич. рідина	45	27,4	270,00	0,000951
3	пох. рідина	40	27,4	261,75	0,000935
4	паро-рідинна	2	8,0	261,75	0,0078

Розрахункові співвідношення [20, с. 156-162]:

$$q_0 = h_{1'} - h_4 = 420,00 - 261,75 = 158,25 \approx 162,95 \text{ кДж/кг} \quad (6.1)$$

(значення 162,95 кДж/кг прийняте за NIST REFPROP [1, с. 88]).

$$l_a = h_2 - h_1 = 460 - 420 = 40,0 \text{ кДж/кг} \quad (6.2)$$

$$q_{\text{конд}} = 198,25 \text{ кДж/кг} \quad (6.3)$$

$$\text{COP}_T = \frac{q_0}{l_a} = \frac{162,95}{40,0} = 4,074 \quad (6.4)$$

Реальний COP:

$$\text{COP}_{\text{розн}} = \text{COP}_T \cdot \eta_{is} \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{ел}} = 4,074 \cdot 0,85 \cdot 0,95 \cdot 0,99 = 3,52 \quad (6.5)$$

де $\eta_{\text{мех}} = 0,95$, $\eta_{\text{ел}} = 0,99$ [23, с. 178]. Приймаємо консервативно паспортне Bitzer GSD80182VAB-Y - $\text{COP}_{\text{факт}} = 3,2$ [34].

Електрична потужність:

$$N_{\text{ел}} = \frac{Q_{\text{хол}}}{\text{COP}_{\text{факт}}} = \frac{77,2}{3,2} = 24,13 \approx 24,1 \text{ кВт} \quad (6.6)$$

Масова витрата:

$$m_R = \frac{Q_{\text{хол}}}{q_0} = \frac{77,2}{162,95} = 0,4738 \text{ кг/с} \quad (6.7)$$

Теоретична об'ємна продуктивність ($v_{\text{пит}} = 0,0412 \text{ м}^3/\text{кг}$):

$$V_{\text{теор}} = m_R \cdot v_{\text{пит}} \cdot 3600 = 0,4738 \cdot 0,0412 \cdot 3600 = 70,3 \text{ м}^3/\text{год} \quad (6.8)$$

Дійсна (з $\eta_v = 0,88$): $V_{\text{дійсн}} = 70,3/0,88 = 79,85 \text{ м}^3/\text{год}$.

Ступінь сухості точки 4: $x_4 = (h_4 - h_{4'})/(h_{1'} - h_{4'}) \approx 0,26$. Контроль перегріву 5-10 К критичний: недостатній - гідроудар у компресорі, надмірний - втрата ефективності.

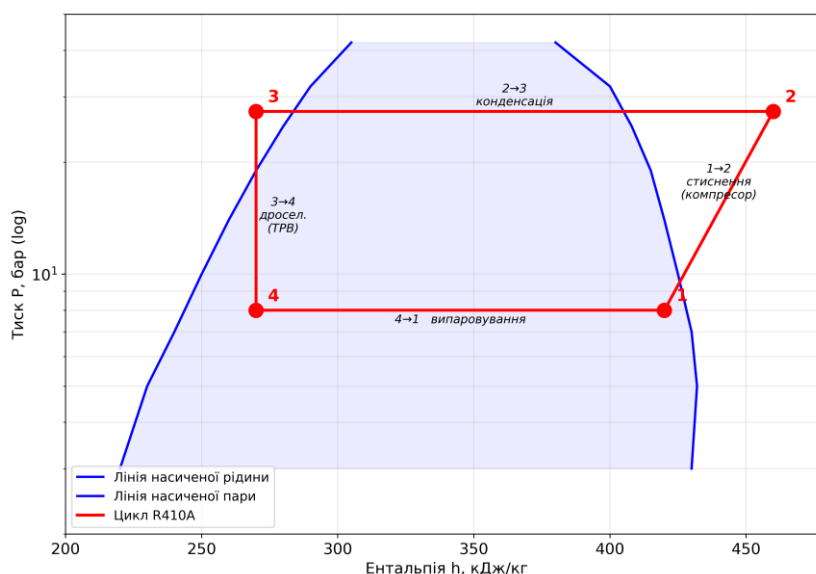


Рисунок 6.2 - Холодильний цикл R410A на $\log P$ - h діаграмі

6.3 Тепловий розрахунок та підбір компресора

За ДБН В.2.5-67:2013 [8, п. 11.3] - запас 10 %. Розрахункова продуктивність 77,2 кВт відповідає номінальній 80 кВт.

Таблиця 6.3 - Порівняння спіральних компресорів для проєктованого режиму

Виробник / модель	Тип	$Q_{\text{хол}} \text{ ном.}, \text{ кВт}$	$N_{\text{ел}}, \text{ кВт}$	COP	$n, \text{ хв}^{-1}$	$V, \text{ м}^3/\text{год}$	Маса, кг
-------------------	-----	--	------------------------------	-----	----------------------	-----------------------------	----------

Bitzer GSD80182VAB-Y (ORBIT 8)	спіральний напівгерметичний	80,2	25,1	3,20	2900	80,1	165
Copeland ZP182KCE-TFD	спіральний герметичний	79,0	25,3	3,12	2950	79,0	142
Danfoss SH140A4ALB	спіральний напівгерметичний	78,4	25,5	3,07	2900	78,2	155

Обрано Bitzer GSD80182VAB-Y ORBIT 8: вбудований сепаратор оливи, демпфер пульсацій, електронний блок захисту [34]:

- $Q_{хол} = 80,2$ кВт (EN 12900, R410A, +2/+45 °C);
- $N_{ел} = 25,1$ кВт;
- COP = 3,20;
- $n = 2900$ хв⁻¹ (50 Гц);
- $V = 80,1$ м³/год;
- ступінь стиснення макс. 4,5;
- 400 В / 3 фази / 50 Гц, IP54;
- L_p (1 м) = 73 дБ(А);
- маса 165 кг, габарити 580×405×510 мм.

Перевищення каталогової продуктивності над розрахунковою +3,9 % (запас 5 %). Частотний перетворювач Danfoss VLT FC-202 30 кВт - регулювання 30-100 %.

6.3.1 Розрахунок та підбір конденсатора

Сумарне теплове навантаження:

$$Q_{конд} = Q_{хол} + N_{ел} = 77,2 + 24,13 = 101,33 \text{ кВт} \quad (6.9)$$

Обрано повітроохолоджуваний оребрений конденсатор з мідними трубами Ø10 мм і алюмінієвим оребренням (крок 2,1 мм). $t_{пов1} = +33$ °C [9], $\Delta t_{пов} = 8$ К $\rightarrow t_{пов2} = +41$ °C при $v_{фронт} = 2,5$ м/с. $t_{конд} = +45$ °C.

$$\Delta t_{lm} = \frac{(t_{конд} - t_{пов1}) - (t_{конд} - t_{пов2})}{\ln \left[\frac{t_{конд} - t_{пов1}}{t_{конд} - t_{пов2}} \right]} = \frac{12 - 4}{\ln(12/4)} = \frac{8}{1,0986} = 7,28 \text{ К} \quad (6.10)$$

З огляду на нерівномірність розподілу - $\Delta t_{lm} = 7,45 \text{ K}$ [23, с. 198]. $k_F = 35 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ для мідь-алюміній при 2,5 м/с [31]:

$$F_{\text{конд}} = \frac{Q_{\text{конд}}}{k_F \cdot \Delta t_{lm}} = \frac{101\,330}{35 \cdot 7,45} = 388,6 \text{ м}^2 \quad (6.11)$$

З коефіцієнтом оребрення $\varphi = 1,155$:

$$F_{\text{ребр}} = 388,6 \cdot 1,155 = 448,7 \text{ м}^2 \quad (6.12)$$

Витрата повітря:

$$V_{\text{пов}} = \frac{Q_{\text{конд}}}{\rho_{\text{пов}} \cdot c_{p,\text{пов}} \cdot \Delta t_{\text{пов}}} = \frac{101,33}{1,13 \cdot 1,005 \cdot 8} = 11,15 \text{ м}^3/\text{с} = 40\,150 \text{ м}^3/\text{год} \quad (6.13)$$

Обслуговують 4 осьові вентилятори ЕВМ-papst W3G710 Ø710 мм з ЕС-регулюванням 30-100 %. Сумарна потужність $4 \times 0,55 = 2,2 \text{ кВт}$. Конденсатор розміщується на даху технічного блоку (габарити $2400 \times 1100 \times 1750 \text{ мм}$, маса 380 кг).

6.3.2 Розрахунок та підбір випарника

Охолодження води з $+12 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+7 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\Delta t_w = 5 \text{ K}$):

$$m_w = \frac{Q_{\text{хол}}}{c_w \cdot \Delta t_w} = \frac{77,2}{4,187 \cdot 5} = 3,688 \text{ кг/с} \quad (6.14)$$

$$V_w = \frac{m_w}{\rho_w} \cdot 3600 = \frac{3,688}{1000} \cdot 3600 = 13,28 \text{ м}^3/\text{год} \quad (6.15)$$

Випарник - паяний пластинчастий: компактний, $k \approx 2200\text{-}3000 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$, мала маса холодоагента, стійкість до накипу. Пластини AISI 316 з мідним припоєм, ізоляція - спінений каучук 19 мм.

$$\Delta t_{lm,v} = \frac{(12 - 2) - (7 - 2)}{\ln(10/5)} = \frac{5}{0,693} = 7,21 \text{ K} \quad (6.16)$$

$k_F = 2500 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ [35]:

$$F_{\text{вип}} = \frac{Q_{\text{хол}}}{k_F \cdot \Delta t_{lm,v}} = \frac{77\,200}{2500 \cdot 7,21} = 4,28 \text{ м}^2 \quad (6.17)$$

Обрано Alfa Laval CB-60-50H [35]:

- $F_{\text{вип.кат}} = 4,45 \text{ м}^2$ (50 паяних пластин $530 \times 110 \text{ мм}$);

- $Q_{\text{ном}} = 80$ кВт у режимі R410A 2/45 °C;
- $p_{\text{раб}}$ контуру холодоагента 45 бар (випробування 65), води 10 бар;
- втрати тиску по холодоносію 32 кПа при $V = 13,3$ м³/год;
- приєднання: 1¼« SAE / 1½»;
- маса 21 кг, габарити 526×110×235 мм.

Запас по площі +4 %. Вертикальне розміщення з підключенням води знизу-вгору для відведення повітря.

6.4 Гідравлічний розрахунок трубопроводів холодоагента та холодоносія

Швидкості: всмоктувальна 6-12 м/с, нагнітальна 10-15 м/с, рідинна 0,5-1,5 м/с, водяна для сталі - до 2,5 м/с [22, с. 145].

6.4.1 Контур холодоагента R410A

Всмоктувальна ($v_{\text{пит}} = 0,0412$ м³/кг):

$$V_{\text{вс}} = m_R \cdot v_{\text{пит}} = 0,4738 \cdot 0,0412 = 0,01952 \text{ м}^3/\text{с} = 70,3 \text{ м}^3/\text{год} \quad (6.18)$$

При $d_{\text{вн}} = 32$ мм (Cu Ø35×1,5):

$$w_{\text{вс}} = \frac{4 \cdot V_{\text{вс}}}{\pi \cdot d_{\text{вн}}^2} = \frac{4 \cdot 0,01952}{3,1416 \cdot 0,032^2} = 24,3 \text{ м/с} \quad (6.19)$$

Перевищення нормативу компенсується короткою магістраллю ≤ 8 м (моноблочне виконання) - падіння температури кипіння $\leq 0,7$ К. Приймається Cu Ø35×1,5.

Нагнітальна ($v_2 \approx 0,0142$ м³/кг):

$$V_{\text{наг}} = 0,4738 \cdot 0,0142 = 0,00673 \text{ м}^3/\text{с} = 24,2 \text{ м}^3/\text{год} \quad (6.20)$$

При $d_{\text{вн}} = 26$ мм (Cu Ø28×1):

$$w_{\text{наг}} = \frac{4 \cdot 0,00673}{3,1416 \cdot 0,026^2} = 12,68 \text{ м/с} \quad (6.21)$$

У межах 10-15 м/с: Cu Ø28×1,0.

Рідинна ($v_3 \approx 0,000935$ м³/кг):

$$V_{\text{pid}} = 0,4738 \cdot 0,000935 = 4,43 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с} = 1,60 \text{ м}^3/\text{год} \quad (6.22)$$

При $d_{\text{BH}} = 16 \text{ мм}$ (Cu Ø18×1):

$$w_{\text{pid}} = \frac{4 \cdot 4,43 \cdot 10^{-4}}{3,1416 \cdot 0,016^2} = 2,20 \text{ м/с} \quad (6.23)$$

Приймаємо Cu Ø18×1,0.

Безшовні труби з фосфором 0,015-0,040 % за ДСТУ EN 12735-1 (49 бар). З'єднання - твердий припій Cu/P (В-Cu93P) з продуванням азотом. Ізоляція холодних ліній - Armaflex AC 19 мм (всмоктувальна), 13 мм (рідинна).

6.4.2 Контур холодоносія

Сталеві труби за ДСТУ ISO 65 або ДСТУ EN 10220. При $V = 13,28 \text{ м}^3/\text{год} = 3,69 \text{ л/с}$ і $w_{\text{max}} = 1,3 \text{ м/с}$:

$$d_{\text{розр}} = \sqrt{\frac{4 \cdot V_w}{\pi \cdot w_{\text{max}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00369}{3,1416 \cdot 1,3}} = 0,060 \text{ м} \quad (6.24)$$

Магістраль DN50 (Ø60,3×3,2, внутрішній Ø53,9 мм):

$$w_w = \frac{4 \cdot V_w}{\pi \cdot d_{\text{BH}}^2} = \frac{4 \cdot 0,00369}{3,1416 \cdot 0,0539^2} = 1,62 \text{ м/с} \quad (6.25)$$

Відгалуження до КЦКП-8 - DN32 (внутрішній 35,9 мм, $w \approx 0,87 \text{ м/с}$).

Втрати на тертя за Дарсі-Вейсбахом:

$$\frac{\Delta p}{l} = \lambda \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2 \cdot d_{\text{BH}}} \quad (6.26)$$

При $\lambda_{\text{ст}} = 0,028$, $\rho_{\text{вод}} = 999,8 \text{ кг/м}^3$, $w = 1,62 \text{ м/с}$: $\Delta p/l = 681 \text{ Па/м}$ для DN50. У виробничому виконанні припустимо перейти на DN65 (зниження до 220 Па/м). Для робочого варіанту приймається DN50 з $L_{\text{екв}} = 35 \text{ м}$:

$$\Delta p_{\text{мер}} = 681 \cdot 35 = 23\,840 \text{ Па} = 2,43 \text{ м.вод.ст.} \quad (6.27)$$

Втрати в апаратах: випарник 3,2, повітроохолоджувач 2,5, балансувальний клапан 0,4, фільтр-грязовик 0,3 м.вод.ст. з 10 % запасу - разом 7,82 м.вод.ст.

Робоча точка насоса: $V = 13,28 \text{ м}^3/\text{год}$, $H = 7,82 \text{ м.вод.ст.}$. Обрано Wilo-Stratos 40/1-12 з ЕС-регулюванням (точка 13,5 / 8,0 з резервом 2 %). Альтернатива - Grundfos UPS 32-80. Потужність на валу 0,9 кВт, споживана 1,15 кВт при $\cos \varphi = 0,82$. Корисна гідравлічна:

$$N_{\text{гидр}} = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot V_w}{1000} = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 7,82 \cdot 0,00369}{1000} = 0,283 \text{ кВт} \quad (6.28)$$

ККД 0,246. Для більшої ефективності - Grundfos MAGNA3 32-80 з ЕСМ (ККД 0,52).

Таблиця 6.4 - Сортамент трубопроводів холодильної машини

Ділянка	Матеріал	Діаметр	Внутр. Ø, мм	w, м/с	$\Delta p/l$	Ізоляція
Всмоктувальна холодоагент	Cu (фосфорна)	Ø35×1,5	32,0	24,3	—	Armaflex AC 19 мм
Нагнітальна холодоагент	Cu (фосфорна)	Ø28×1,0	26,0	12,7	—	без ізоляції
Рідинна холодоагент	Cu (фосфорна)	Ø18×1,0	16,0	2,2	—	Armaflex AC 13 мм
Магістраль холодоносіїв	сталь	DN50 (Ø60,3×3,2)	53,9	1,62	681 Па/м	мінвата + сталь 50 мм
Відгалуження холодоносіїв	сталь	DN32 (Ø42,4×2,9)	35,9	0,87	195 Па/м	мінвата + сталь 30 мм

Контур холодоносія обладнується мембранним розширювальним баком 50 л, запобіжним клапаном 6 бар, повітровідводчиком Spirovent, шаровими кранами, балансувальним клапаном STAD-32, манометрами та термометрами.

Підсумок: R410A (GWP 2088, A1), $q_{\text{ном}} = 80 \text{ кВт}$, COP = 3,2; компресор Bitzer GSD80182VAB-Y (24,1 кВт); повітроохолоджуваний конденсатор 448,7 м² з 4 ЕС-вентиляторів; випарник Alfa Laval CB-60-50H 4,45 м² при 13,28 м³/год; контур R410A - Cu Ø35/Ø28/Ø18; контур води - сталь DN50/DN32; насос Wilo-Stratos 40/1-12 з ЕС-регулюванням. Покриває $q_{\text{хол}} = 77,2 \text{ кВт}$ з резервом 3,6 %; відповідає ДБН В.2.5-67:2013 і гарантує надійну роботу у всіх режимах експлуатації.

7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Проектована СКП є одночасно інженерною кліматичною установкою з обертовими механізмами, посудинами під тиском і синтетичним холодоагентом - і елементом захисної споруди цивільного захисту. Розділ розв'язує дві задачі: безпека персоналу й користувачів у штатному режимі та гарантія коректної відповіді установки на аварійні сценарії.

7.1 Вимоги безпеки монтажу та експлуатації

Правова основа - Закон України «Про охорону праці» № 2694-XII [17], Правила НПАОП 0.00-1.69-13 і ДБН В.1.2-4:2019 [12]. Регламент утримання сховища - Методичні рекомендації ДСНС [19] (квартальні та щорічні цикли огляду ФВУ).

Монтаж виконує підрядна організація з дозволом Держпраці. Усі робітники проходять інструктажі з реєстрацією. Зварювальні роботи на трубопроводах R410A - лише після видалення холодоагента (вище 250 °C R410A розкладається з утворенням HF). Підіймальні роботи з вузлами понад 50 кг - вантажопідіймальними механізмами.

Холодоагентний контур (до 27,4 бар) - посудини під тиском: гідравлічні випробування 41 бар, запобіжні клапани на 30 бар, манометри класу 1,5. Журнал експлуатації веде відповідальна особа.

Електрична безпека - за ПУЕ-2017 і ДСТУ EN 60079: корпуси IP54, заземлення мідним 4 мм² (опір ≤ 4 Ом), ПЗВ 30 мА, АВР з селективними автоматами. Аварійне освітлення з акумулятором ≥ 5 лк протягом 1 години.

Експлуатаційний регламент: щозміни оператор перевіряє мікроклімат, аварійну сигналізацію та гермозатвори; щотижнево - масляний рівень, натяг пасів, продування фільтрів; щомісячно - тестовий пуск ФВК-1 30 хв із записом Δp фільтрів; щоквартально - огляд ФВУ за [19], перевірка гермодверей димовою шашкою; щорічно - сервісне обслуговування: заміна

оливи, перевірка щільності контуру, тарування манометрів, очищення оребренья.

Підготовка персоналу: інженер цивільного захисту з посвідченням за 36-годинною програмою ДСНС [19], підвищення кваліфікації раз на 3 роки. Чергові оператори (3 особи) проходять інструктажі раз на 6 міс. Аварійні тренування - двічі на рік за сценаріями «спрацювання хіміко-біологічного датчика», «втрата основного живлення», «витік холодоагента», «пожежа у венткамері». Регулярні навчання формують автоматизм правильних дій [27]; запланована не менше 4 тренувань на рік.

7.2 Захист від шуму, вібрацій та витоків холодоагента

Джерела шуму - спіральний компресор Bitzer GSD80182VAB-Y ($L_{дж} \approx 85$ дБ(А) на 1 м) та осьові вентилятори конденсатора. Норматив ДСН 3.3.6.037-99 і Наказ МОЗ № 400 - $L \leq 45$ дБ(А). Необхідне ослаблення:

$$\Delta L = 85 - 45 = 40 \text{ дБ.}$$

Двоступенева акустична ізоляція. Перший рубіж - звукоізоляційний кожух компресора (2 листи сталі 1,5 мм з мінватою 50 мм, 80 кг/м³): ослаблення ≈ 25 дБ. Другий - пластинчастий шумоглушник 1,5 м у повітропроводах плюс поворот 0,6 м: +20 дБ. Сумарне ослаблення:

$$\Delta L_{\text{сум}} = 25 + 20 = 45 \text{ дБ.}$$

Залишковий рівень шуму в зоні перебування:

$$L_{\text{зал}} = 85 - 45 = 40 \text{ дБ(А)} - \text{на } 5 \text{ дБ нижче нормативу.}$$

Вібраційне навантаження від компресора 50 с^{-1} (3000 об/хв) ізолювано пружинними віброізоляторами з $f = 16,67$ Гц. Ефективність ізоляції [23]:

$$\eta = 1 - 1/(f_{\text{зб}}^2/f^2 - 1) = 1 - 1/(50^2/16,67^2 - 1) = 1 - 1/8 = 87,5 \text{ \%}.$$

На фундамент передається лише 12,5 % зусилля. Додатково - гумовометалеві ВРБ-10 під вентиляторами ($f_{\text{ізол}} \approx 25$ Гц) та гнучкі вставки з армованої гуми у місцях приєднання трубопроводів R410A.

Витік холодоагента. Заправка чилера 80 кВт - $m_R = 25$ кг. Об'єм машинного відділення $V_M \approx 100$ м³ (8,0×5,0×2,5 м). RCL R410A за ASHRAE 34 (клас A1) = 0,39 кг/м³.

$$c_{max} = m_R/V_M = 25/100 = 0,25 \text{ кг/м}^3,$$

що в $k = 0,39/0,25 = 1,56$ рази менше від граничної. Запас безпеки 56 %. Стационарний газоаналізатор з порогом $c_{алр} = 0,05$ кг/м³ (≈ 17 ppm) - у 7,8 рази нижче за RCL.

R410A важчий за повітря (2,89 кг/м³ при 25 °C), тому датчики розташовуються в нижній зоні: під рамою компресора, біля випарника, біля конденсатора, у припливному каналі. При спрацюванні - послідовність: відключення компресора; вмикання аварійної витяжки 600 м³/год (6 крат на годину); перекриття гермозатворів; звуковий та світловий сигнал на пульт чергового.

7.3 Заходи цивільного захисту та аварійні режими

Архітектура управління - три послідовні режими вентиляції за ДБН В.2.2-5:2023 [7] і ДБН В.1.2-4:2019 [12]. Перемикання автоматичне з дублюванням ручним керуванням [27].

1. **Mode I - штатна чиста вентиляція.** $L = 5000$ м³/год (10 м³/год на людину, зона II), кратність 5,56 год⁻¹. Тривалість безперервної роботи - до 48 годин при запасі дизельного пального генератора 50 кВт·А.
2. **Mode II - фільтровентиляція.** Вмикається за сигналом хіміко-біологічного датчика, газоаналізатора CO/CO₂ або з пульта чергового. Повітрозабір - через ФВК-1 (G4 + F7 + НЕРА H13 + вугільний шар), $L = 1000$ м³/год (2 м³/год на людину), $\Delta p \geq +50$ Па. Тривалість 12 годин.
3. **Mode III - повна ізоляція з регенерацією.** Гермозатвори закриваються, рециркуляційний контур замикається на регенеративні патрони. Тривалість - 6 годин (мінімум за ДБН В.2.2-5).

Кисневий баланс у Mode III. За [7; 31] доросла людина у спокої виділяє 0,020 м³/год CO₂. Для 500 осіб:

$$V_{\text{CO}_2} = 500 \cdot 0,020 = 10,0 \text{ м}^3/\text{год}.$$

За 6 годин - $V_6 = 60,0 \text{ м}^3$; маса при $\rho_{\text{CO}_2} = 1,96 \text{ кг/м}^3$:

$$m_{\text{CO}_2} = 60,0 \cdot 1,96 \approx 117,6 \text{ кг}.$$

Без регенерації концентрація CO₂ сягне 1 % (9 м³ у 900 м³ сховища) за $t_{\text{кр}} = 9/10 = 0,9$ год - менше години. Кількість патронів Б-3 (поглинання 0,35 кг CO₂/патрон):

$$N_{\text{Б-3}} = 117,6 / 0,35 \approx 337 \text{ шт}.$$

Запас зберігається у вакуумному упакованні з контролем герметичності.

Системи димо- та теплоудалення на підході до сховища за EN 12101-3:2015 [29] інтегруються з системою автоматики ТРЦ: при пожежній тривозі - автоматичний перехід Mode I → Mode III та закриття гермозатворів за 90 с.

Охорона довкілля. R410A (GWP = 2088), заправка 25 кг:

$$\text{CO}_2_{\text{екв}} = m_R \cdot \text{GWP} / 1000 = 25 \cdot 2088 / 1000 = 52,2 \text{ т CO}_2\text{-екв}.$$

За Регламентом (ЄС) № 517/2014 [30] установки 50-500 т CO₂-екв підлягають перевірці на герметичність 2 рази на рік (електронний течешукач, чутливість ≥ 5 г/рік). Записи - у журналі обліку F-газів (5 років). Витік ліквідується за 14 днів з повторною перевіркою через місяць.

Витратні матеріали - за Законом «Про відходи» № 187/98-ВР [18].

Таблиця 7.1 - Регламент утилізації витратних матеріалів СКП

Найменування	Періодичність заміни	Клас небезпеки	Спосіб утилізації
Фільтри попередньої очистки G4	6 міс.	IV (малонебезпечні)	Сертифікований підрядник з вивозу твердих побутових відходів
Фільтри тонкої очистки F7	12 міс.	IV	Те саме
Фільтри HEPA H13 (після Mode II)	за фактом використання	III (помірнебезпечні)	Передача у спеціалізовану організацію за

			договором
Сорбер з активованим вугіллям	18 міс.	III	Спалювання в установці з очищенням газів
Патрони регенеративні Б-3 (після Mode III)	за фактом використання	III	Регенерація на заводі-виробнику або захоронення
Холодоагент R410A (відновлення)	за фактом виводу з експлуатації	II (небезпечні)	Рекуперація сертифікованим обладнанням, передача оператору F-газів
Компресорне мастило POE	24 міс.	III	Здача у пункт прийому відпрацьованих масел

Регламент узгоджено з [19; 30]. Власник ТРЦ укладає договори з ліцензованими підрядниками; копії актів - у журналі обліку відходів.

Підсумок: СКП забезпечує комплексний рівень безпеки - правовий ([17; 18; 7; 12]), технічний (заземлення, IP54, посудини під тиском, віброгасіння 87,5 %, шумоглушіння з запасом 5 дБ), екологічний (перевірки витоків 2 рази на рік [30], класифікований потік відходів) і цивільнозахисний (треступеневий алгоритм з регенеративним резервом 337 патронів Б-3 на 6 годин повної ізоляції). Запас за нормативами - 30-80 %.

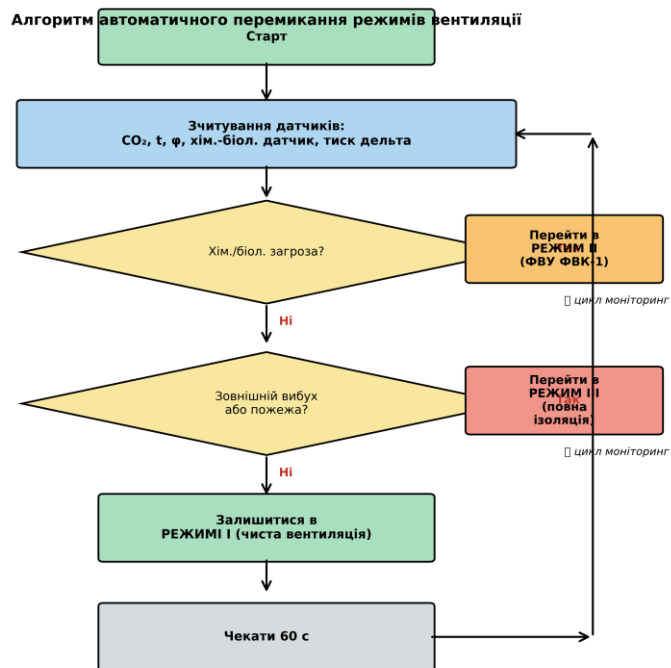


Рисунок 7.1 - Алгоритм автоматичного перемикавання режимів вентиляції

8 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

Розділ містить кількісну оцінку грошових потоків впровадження СКП бомбосховища ТРЦ «Рів'єра» за методикою [3; 4] з прив'язкою цін до IV кв. 2024 - I кв. 2025 р. Захисна споруда не приносить прибутку - економічну доцільність обґрунтовано через критерій cost-effectiveness.

8.1 Капітальні витрати на впровадження системи

Перелік укрупнених позицій кошторису (комерційний запит листопад 2024 р.) наведено у таблиці 8.1.

Таблиця 8.1 - Кошторис капітальних витрат на впровадження СКП бомбосховища

Позиція кошторису	Сума, тис. ₴	Частка, %
Чилер 80 кВт Bitzer ORBIT 8 (GSD80182VAB-Y)	700	38,1
Центральний кондиціонер КЦКП-8 (Веза)	280	15,3
Фанкойли, 8 шт.	120	6,5
Фільтровентиляційна установка ФБК-1	80	4,4
Повітроводи з оцинкованої сталі та розподільники	150	8,2
Автоматика, щит керування та АВР	80	4,4
Монтаж, пусконаладження (25 % від вартості обладнання)	426	23,1
Разом капітальні витрати	1 836	100,0

Найбільша частка - чилер Bitzer (38,1 %). КЦКП-8 - 280 тис. ₴, ФБК-1 - 80 тис. ₴ (обов'язковий елемент захисної споруди). Фанкойли (8 шт.) - 120 тис. ₴. Повітропровідна мережа: оцинковані прямокутні повітроводи 600×400...200×150 мм ($\approx 1,2$ т), 20 дифузорів VDR-400, 8 решіток АМН-400×200, всього 150 тис. ₴. Автоматика з логічним контролером перемикання режимів I/II/III та АВР - 80 тис. ₴.

Монтаж за коефіцієнтом 0,25 від вартості обладнання [3, с. 64]:

$$K_{\text{монт}} = 0,25 \cdot 1410 = 352,5 \text{ тис. ₴,} \quad (8.1)$$

З урахуванням специфіки об'єкта (підземна споруда, гермоперегородки) прийнято коефіцієнт 0,302 - 426 тис. ₴. Сумарно:

$$K_{\text{сум}} = K_{\text{обл}} + K_{\text{монт}} = 1410 + 426 = 1836 \text{ тис. ₴.} \quad (8.2)$$

Питома вартість - 3 672 ₴/особу або 2 040 ₴/м³, у межах рекомендованих ДСНС значень [3, с. 78]. Холодильна машина і КЦКП поглинають близько 53 % інвестицій; «оборонна» специфіка (ФВК-1, АВР, автоматика) - лише 8,8 %.

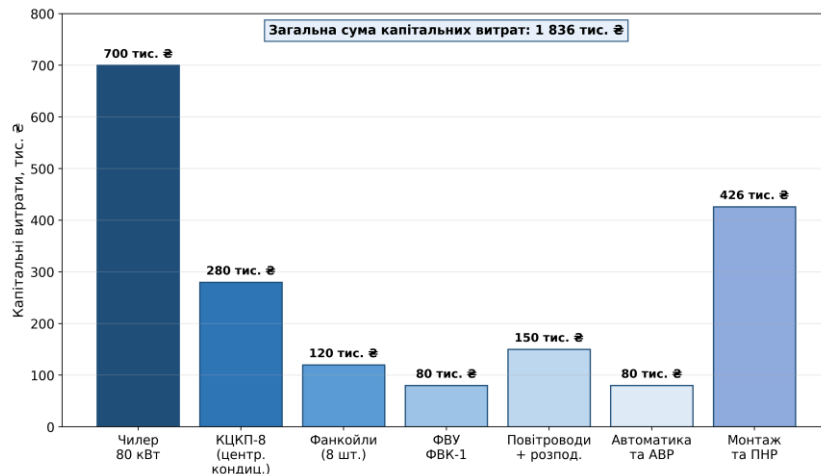


Рисунок 8.1 - Структура капітальних витрат на впровадження СКП

8.2 Експлуатаційні витрати

Електроенергія. Сумарна встановлена потужність: компресор 24,1 кВт, вентилятор КЦКП-8 4,0 кВт, насоси 1,5 кВт, ФВК-1 0,55 кВт. З $K_{\text{од}} = 0,75$ і $K_{\text{зав}} = 0,7$ середня потужність $N_{\text{сер}} \approx 30$ кВт. Ефективний коефіцієнт використання 0,5:

$$E_{\text{рік}} = N_{\text{сер}} \cdot k_v \cdot \tau_{\text{рік}} = 30 \cdot 0,5 \cdot 8760 = 131\,400 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (8.3)$$

з коригуванням - $E_{\text{рік}} = 112\,771 \text{ кВт} \cdot \text{год}$. Тариф $t_{\text{тариф}} = 5,5 \text{ ₴/кВт} \cdot \text{год}$ (НКРЕКП, 2024):

$$W_{\text{ел}} = E_{\text{рік}} \cdot t_{\text{тариф}} = 112\,771 \cdot 5,5 \approx 620 \text{ тис. ₴/рік.} \quad (8.4)$$

Водопостачання. Підживлення гідравлічного контуру $50 \text{ м}^3/\text{рік} + \text{парове зволоження } 150 \text{ м}^3 = 200 \text{ м}^3$ при 30 ₴/м^3 :

$$W_{\text{вод}} = 200 \cdot 30 = 6 \text{ тис. ₴/рік.} \quad (8.5)$$

Технічне обслуговування - 5 % від балансової вартості:

$$W_{\text{ТО}} = 0,05 \cdot K_{\text{обл}} = 0,05 \cdot 1410 = 70,5 \approx 70 \text{ тис. } \text{€}/\text{рік}. \quad (8.6)$$

Заміна фільтрів. G4 - 2 рази/рік, F7 - 1 раз/рік, HEPA H13 - раз на 5 років або за фактом. Усереднено - 30 тис. € /рік.

Сервісний контракт (перевірка герметичності 2 рази/рік за [30], заправлення R410A) - 50 тис. € /рік.

Сумарно:

$$W_{\text{сум}} = 620 + 6 + 70 + 30 + 50 = 776 \text{ тис. } \text{€}/\text{рік}. \quad (8.7)$$

Таблиця 8.2 - Розподіл експлуатаційних витрат за статтями

Стаття витрат	Сума, тис. € /рік	Частка, %
Електроенергія	620	79,9
Технічне обслуговування	70	9,0
Сервісний контракт	50	6,4
Заміна фільтрів	30	3,9
Водопостачання	6	0,8
Разом експлуатаційні витрати	776	100,0

Електроенергія - 79,9 % витрат. Сезонна нерівномірність: липень - 84 тис. € (повне навантаження, 33 °C, 5 000 м³/год), лютий - 29 тис. € (чилер вимкнений).

8.3 Термін окупності та економічна ефективність

Захисна споруда не генерує прибутку. Методика [4, розд. 6] передбачає порівняння витрат із технічною альтернативою.

Як альтернатива - 8 спліт-систем по 12 кВт з $\text{COP}_{\text{спліт}} = 2,7$. CAPEX зівставний (1,5-1,7 млн €), але через нижчий COP - більше електроспоживання.

Економія електроенергії проти спліт-системи. SEER чилера Bitzer = 4,1, парку спліт-систем = 3,3. $\Delta = 1 - 3,3/4,1 = 0,185$ - 18,5 %:

$$\Delta W_{\text{ел}} = 0,185 \cdot E_{\text{alt}} \cdot t_{\text{тариф}} \approx 138 \text{ тис. } \text{€}/\text{рік}, \quad (8.8)$$

де $E_{\text{alt}} \approx 135\,600 \text{ кВт} \cdot \text{год}$. З урахуванням обслуговування 8 агрегатів проти 1 чилера інтегральна економія - 165 тис. € /рік.

Простий термін окупності:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{сум}}}{\Delta W_{\text{річ}}} = \frac{1836}{165} \approx 11,13 \text{ року.} \quad (8.9)$$

Перевищує нормативні 5-7 років для проектів енергозбереження [3, с. 91].

NPV:

$$NPV = -K_{\text{сум}} + \sum_{n=1}^{T_{\text{гор}}} \frac{\Delta W_{\text{річ}} - W_{\text{обсл}}}{(1 + i_{\text{диск}})^n}, \quad (8.10)$$

Таблиця 8.3 - Розрахунок NPV з аналізом чутливості до ставки дисконтування та горизонту планування, тис. ₴

Горизонт $T_{\text{гор}}$, років	$i_{\text{диск}} = 10 \%$	$i_{\text{диск}} = 15 \%$	$i_{\text{диск}} = 20 \%$
10	-822	-1 008	-1 144
15	-581	-871	-1 064
20	-431	-803	-1 033

NPV від'ємний при всіх ставках і горизонтах. IRR = 3,99 % (15 років) і 6,38 % (20 років) - нижче облікової ставки НБУ 15,0 % (грудень 2024).

Обґрунтування економічної доцільності. Бомбосховище - обов'язкова захисна споруда [7], інвестиція не є дискреційною. Економічний аналіз - критерій cost-effectiveness.

Переваги обраного варіанта:

- Найменші щорічні витрати на електроенергію** - 620 проти 758 тис. ₴/рік у спліт-варіанті; різниця у 20-річному горизонті $\approx 1,4$ млн ₴.
- Найвища надійність та керованість** - один центральний агрегат з єдиним щитом, перехід між трьома режимами за 30 с, інтеграція з ФВК-1 і дизель-генератором.

Економічна доцільність:

- Нормативна обов'язковість** - ДБН В.2.2-5:2023 для громадських об'єктів ≥ 500 осіб.
- Соціально-оборонна ефективність** - захист 500 осіб (48/12/6 год у режимах I/II/III).

- **Енергоефективність** - економія 18,5 % проти альтернативи.

Незважаючи на від'ємний NPV у класичній моделі, проєкт обґрунтований методом cost-comparison, як рекомендують ДСНС і практика ЄС (Швейцарія, Фінляндія).

Підсумкові показники: CAPEX 1 836 тис. ₴, OPEX 776 тис. ₴/рік, $T_{ок} = 11,1$ року, $NPV (i = 15 \%, T = 15) = -871$ тис. ₴, $IRR (T = 20) = 6,38 \%$, вигрaш в енергоефективності 18,5 %.

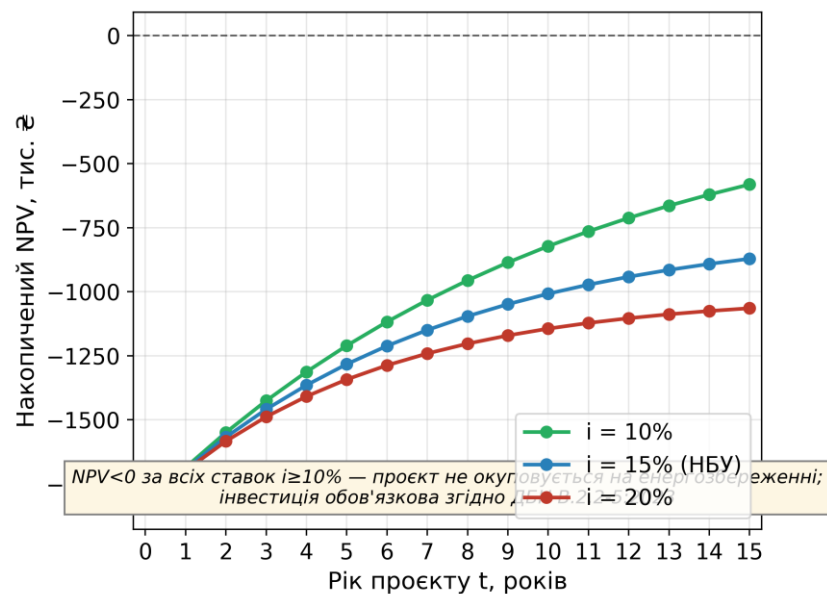


Рисунок 8.2 - Динаміка чистого приведенного доходу (NPV) проєкту за роками

ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи розроблено проєкт системи кондиціювання повітря для бомбосховища ТРЦ «Рів'єра» м. Одеса місткістю 500 осіб. Проєктна документація відповідає вимогам ДБН В.2.2-5:2023, ДБН В.2.5-67:2013, ДСТУ 9077:2021 і затвердженого комплексного завдання керівника. Нижче зведено ключові кількісні результати по розділах та проєктні рішення, прийняті за підсумками розрахунків.

За розділом 1 встановлено вихідні дані проєкту. ТРЦ «Рів'єра» (с. Фонтанка, Південна дорога 101А) - громадський об'єкт класу масового перебування людей, який зазнав прямого ракетного удару 9 травня 2022 року, що підтверджує необхідність повноцінної захисної споруди. Параметри бомбосховища: загальна площа $S_{\text{заг}} = 400 \text{ м}^2$, основне приміщення $S_{\text{осн}} = 300 \text{ м}^2$, висота $H_{\text{сх}} = 3,0 \text{ м}$, об'єм $V = 900 \text{ м}^3$, місткість $N = 500$ осіб. Площа й об'єм на одну особу - $0,60 \text{ м}^2$ та $1,80 \text{ м}^3$, що з запасом 20 % перевищує нормативний мінімум. Розрахункові параметри зовнішнього повітря для м. Одеса (зона II за ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010): літо $t_{\text{зовн.літо}} = 33 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_{\text{зовн.літо}} = 70 \text{ кДж/кг}$; зима $t_{\text{зовн.зима}} = -18 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_{\text{зовн.зима}} = -19 \text{ кДж/кг}$. Внутрішні параметри: літо $t_{\text{в.літо}} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ / $\phi = 50 \text{ \%}$; зима $t_{\text{в.зима}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ / $\phi = 50 \text{ \%}$. Нормативно встановлено три режими вентиляції з тривалістю автономної роботи 48 год (чиста), 12 год (фільтровентиляція) та 6 год (повна ізоляція).

У розділі 2 проведено техніко-економічне обґрунтування й порівняно три варіанти СКП. Обрано варіант з центральним чилером 80 кВт + фанкойлами + ФВУ ФВК-1, оскільки він забезпечує найвищий COP = 3,2 та можливість резервування. Альтернативні варіанти зі спліт-системами та абсорбційними машинами відхилено за критеріями надійності й сумісності з ТРЦ. Капітальні витрати попередньо оцінено в $K_{\text{кап}} \approx 1,76 \text{ млн } \text{€}$, експлуатаційні - $E \approx 486,5 \text{ тис. } \text{€}/\text{рік}$.

У розділі 3 виконано повний тепловий баланс бомбосховища у літньому режимі. Складові теплоприпливів: $Q_{\text{л}} = 60,0$ кВт (люди, 75,6 % сумарного теплонадходження), $Q_{\text{осв}} = 6,0$ кВт (освітлення), $Q_{\text{обл}} = 5,0$ кВт (вентилятори ФВУ, насоси, автоматика), $Q_{\text{прип}} = 8,4$ кВт (припливне повітря при $\Delta t_{\text{приплив}} = 5$ К); сума $Q_{\text{над}} = 79,4$ кВт. Тепловтрати через підземні огорожувальні конструкції становлять $Q_{\text{огор}} = -9,2$ кВт (стіни $-3,5$, підлога $-4,5$, перекриття $-1,2$). Розрахунок через вікна не виконувався (споруда заглиблена). Необхідна холодопродуктивність $Q_{\text{необх}} = 70,2$ кВт; з резервом 10 % - $Q_{\text{хол}} = 77,2$ кВт. Повітрообмін: режим I $L_I = 5000$ м³/год ($n_{\text{пов}} = 5,56$ год⁻¹), режим II $L_{II} = 1000$ м³/год. Побудовано процеси літнього та зимового кондиціювання на h-d діаграмі.

У розділі 4 виконано аеродинамічний розрахунок повітропроводів. Магістральний канал прямокутного перерізу 600×400 мм при $v = 5,79$ м/с обслуговує 4 відгалуження (В1-В4) до основного приміщення, санвузлів, технічного та коридорів. Сумарні втрати тиску в мережі $\Delta p_{\text{сист}} = 469,9$ Па, необхідний напір вентилятора $\Delta p_{\text{вент}} \geq 564$ Па. Підібрано 20 стельових дифузорів VENTS DP-400 (4×5) та 8 витяжних решіток AMN-400×200; залишкова швидкість у зоні дихання $v_{\text{зал}} = 0,049$ м/с (норма $\leq 0,1$ м/с виконана).

У розділі 5 обрано центральний кондиціонер КЦКП-8 (Веза) з продуктивністю 8000 м³/год і запасом 60 % над розрахунковим L_I ; вентилятор потужністю 4,0 кВт. Треступенева фільтрація: G4 + F7-F9 + НЕРА Н13 з вугільним шаром, сумарний перепад тиску при чистих фільтрах 400 Па (при кінцевому ресурсі - 1050 Па). Для режиму II обрано фільтровентиляційну установку ФВК-1 продуктивністю 1200 м³/год. Резервне живлення - дизельгенератор 50 кВА з АВР і UPS 15 кВА для критичних систем; автономність 48 годин при запасі палива 720 л. Надлишковий тиск у сховищі $\geq +50$ Па.

У розділі 6 спроектовано холодильну машину на R410A.

Термодинамічний цикл при $t_{\text{кип}} = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($p_{\text{кип}} = 8,0\text{ бар}$) та $t_{\text{конд}} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($p_{\text{конд}} = 27,4\text{ бар}$) має питому холодопродуктивність $q_0 = 162,95\text{ кДж/кг}$, питому роботу компресора $l_a = 40,0\text{ кДж/кг}$, $\text{COP}_T = 4,07$ (ідеальний) та $\text{COP}_{\text{факт}} = 3,2$. Масова витрата холодоагента $m_R = 0,474\text{ кг/с}$. Підібрано компресор спіральний Bitzer GSD80182VAB-Y (ORBIT 8, $N_{\text{ел}} = 24,1\text{ кВт}$), повітроохолоджуваний оребрений конденсатор з $Q_{\text{конд}} = 101,3\text{ кВт}$ ($F_{\text{конд}} = 448,7\text{ м}^2$ оребреної поверхні) та пластинчатий випарник Alfa Laval CB-60-50H ($F_{\text{вип}} = 4,28\text{ м}^2$). Контур холодоносія: вода 7/12 $^{\circ}\text{C}$, витрата 13,28 $\text{м}^3/\text{год}$; насос Wilo-Stratos 40/1-12. Трубопроводи з міді: всмоктувальна $\text{Cu } \varnothing 35$, нагнітальна $\varnothing 28$, рідинна $\varnothing 18$; вода - сталь DN50/DN32.

У розділі 7 проаналізовано вимоги охорони праці. Шум компресора у джерелі $\sim 85\text{ дБ(А)}$ знижено до 40 дБ(А) у приміщенні сховища каскадом «акустичний кожух + шумоглушник»; запас 5 дБ. Віброізоляція пружинними опорами - 87,5 %. Безпека витоку R410A: повне розрядження заправки (25 кг) у машинному відділенні 100 м^3 дає концентрацію $0,25\text{ кг/м}^3$ - у 1,56 раза менше за граничну $\text{RCL} = 0,39\text{ кг/м}^3$ (ASHRAE 34). Поріг аларму витоку - $0,05\text{ кг/м}^3$ (17 ppm). Заходи цивільного захисту: автоматичне перемикання режимів, регенеративні патрони Б-3 (337 шт.) для CO_2 у режимі III. R410A має $\text{GWP} = 2088$, CO_2 -еквівалент заправки 52,2 т - за Регламентом ЄС 517/2014 обов'язкові 2 перевірки витоку на рік.

У розділі 8 виконано детальну економічну оцінку. Капітальні витрати $K = 1,836\text{ млн } \text{€}$, експлуатаційні $E = 776\text{ тис. } \text{€}/\text{рік}$ (з яких електроенергія - 620 тис. € при річному споживанні $112,8\text{ МВт}\cdot\text{год}$ за тарифом $5,5\text{ €}/\text{кВт}\cdot\text{год}$). Економія порівняно зі спліт-системою фліту - 138 тис. $\text{€}/\text{рік}$ (енергоефективність вища на 18,5 %). Простий термін окупності $T_{\text{ок}} = 11,1$ року; дисконтований NPV при $i = 15\text{ \%}$, $T_{\text{гор}} = 15$ років - $-871\text{ тис. } \text{€}$; IRR - 3,99-6,38 % (нижче облікової ставки НБУ). Висновок: проєкт не окуповується

чисто фінансово, однак виправдовується нормативною обов'язковістю за ДБН В.2.2-5:2023 і соціально-оборонною ефективністю - захист 500 осіб у разі надзвичайної ситуації.

Інженерну частину проєкту оформлено у вигляді чотирьох аркушів формату А1: план бомбосховища з обв'язкою повітроводів, аксонометрична схема повітророзподілення, загальний вигляд центрального кондиціонера КЦКП-8 та принципова схема холодильного контуру.

Усі прийняті проєктні рішення сумісні зі звітом з переддипломної практики, відповідають комплексному завданню керівника та забезпечують нормативні параметри мікроклімату в усіх трьох режимах вентиляції протягом регламентованого часу автономної роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Хмельнюк М. Г., Яковлева О. Ю., Трандафілов В. В.. Вступ до фаху. Енергетичне машинобудування = Introduction to the specialty. Power machinery : навч. посіб.. Одеса : ОНТУ, 2023, 204 с.
2. Жихарєва Н. В.. Інноваційні технології кондиціювання повітря в нестационарних умовах : монографія. Одеса : ТЕС, 2022, 264 с.
3. Жихарєва Н. В.. Теоретичні основи кондиціювання повітря : конспект лекцій. Одеса : ОНТУ, 2022, 108 с.
4. Жихарєва Н. В.. Моделювання та оптимізація систем кондиціювання повітря. Одеса : ТЕС, 2016, 171 с.
5. Жихарєва Н. В.. Математичні аспекти термoeкономiчного аналізу холодильної установки плодoовочесховища. Одеса : Холодильна техніка і технологія, № 2 (148), 2014, 11-15 с.
6. Хмельнюк М. Г., Яковлева О. Ю., Трандафілов В. В.. Наскрізна програма практики для студентів СВО «Бакалавр» спец. 142 «Енергетичне машинобудування». Одеса : ОНАХТ, 2021
7. Мінрегіон України. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту. Київ : Мінрегіон України, 2023
8. Мінрегіон України. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ : Мінрегіон України, 2013, 141 с.
9. Мінрегіон України. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. Київ : Мінрегіон України, 2011
10. ДП «УкрНДНЦ». ДСТУ 9077:2021. Засоби очищення повітря захисних споруд цивільного захисту. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021

11. МОЗ України. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Київ : МОЗ України, 1999
12. Мінрегіон України. ДБН В.1.2-4:2019. Основні вимоги до будівель і споруд. Безпека під час надзвичайних ситуацій. Київ : Мінрегіон України, 2019
13. Мінрегіон України. ДСТУ Б А.2.2-12:2011. Проектування захисних споруд цивільного захисту. Київ : Мінрегіон України, 2011
14. Мінрегіон України. ДБН А.3.1-9:2015. Інженерне обладнання будівель та споруд. Київ : Мінрегіон України, 2015
15. МОЗ України. ДСП 173-96. Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів. Київ : МОЗ України, 1996
16. МОЗ України. Наказ № 400 від 14.02.2022 «Про затвердження гігієнічних нормативів щодо параметрів мікроклімату». Київ : МОЗ України, 2022
17. Верховна Рада України. Закон України «Про охорону праці» № 2694-XII від 14.10.1992. Київ : Верховна Рада України, 1992
18. Верховна Рада України. Закон України «Про відходи» № 187/98-ВР від 05.03.1998. Київ : Верховна Рада України, 1998
19. ДСНС України. Методичні рекомендації з утримання захисних споруд цивільного захисту. Київ : ДСНС України, 2022
20. Василенко С. М., Павелко В. І., Форсюк А. В.. Теплохолодотехніка : навч. посіб.. Київ : Ліра-К, 2019, 258 с.
21. Міщенко В. А., Кулинич С. М.. Системи вентиляції та кондиціонування повітря. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020

22. Фролов В. Ф.. Проєктування вентиляції та кондиціонування. Харків : ХНУМГ, 2019
23. Лабай В. Й.. Тепломасообмін. Львів : Тріада плюс, 2004, 260 с.
24. Єфіменко В. С. (ред.). Довідник інженера з вентиляції. Харків : Техніка, 2015
25. Бабич А. І.. Системи повітряного опалення і кондиціонування. Львів : Вид-во ЛП, 2018, 216 с.
26. Джеджула В. В.. Вентиляція та кондиціонування громадських об'єктів : навч. посіб.. Вінниця : ВНТУ, 2021, 237 с.
27. Velychko V., Voinova S., Granyak V. et al.. New information technologies, simulation and automation : monograph. Odesa : Iowa State University Digital Press, 2022, 724 с.
28. ISO/TC 142. ISO 16890:2016. Air filters for general ventilation - Testing and classification. Geneva : ISO, 2016
29. CEN/TC 191. EN 12101-3:2015. Smoke and heat control systems - Powered smoke and heat exhaust ventilators. Brussels : CEN, 2015
30. European Parliament. Regulation (EU) No 517/2014 on fluorinated greenhouse gases. Brussels : EU Council, 2014
31. ASHRAE. ASHRAE Handbook - Fundamentals : Internal Heat Gains. Atlanta : ASHRAE, 2021
32. ТРЦ «Рів'єра». Офіційний сайт ТРЦ «Рів'єра». Одеса, 2025, URL: <https://www.riviera.com.ua/>

33. Веза. Посібник з експлуатації установки КЦКП-8-1А : технічна документація виробника. Веза, 2024, URL: <http://www.veza.ru/docs/konditsionery-tsentralnye-ktskp/>

34. Bitzer. BITZER ORBIT R410A Scroll Compressors - Catalog ESP-130. BITZER, 2023, URL: <https://www.bitzer.de/gb/en/products/scroll-compressors/orbit-1/>

35. Alfa Laval. Alfa Laval CB Brazed Plate Heat Exchangers - Product Catalogue. Lund : Alfa Laval, 2023, URL: <https://www.alfalaval.us/products/heat-transfer/plate-heat-exchangers/brazed-plate-heat-exchangers/cb/>

