

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет будівництва і архітектури

**ОЦІНКА КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН
ТА ВУГЛЕЦЕВОГО СЛІДУ
В БУДІВЕЛЬНІЙ ГАЛУЗІ**

Методичні вказівки
до виконання практичних робіт
з дисципліни «Основи екології»
для здобувачів першого (бакалаврського)
рівня вищої освіти всіх спеціальностей

Київ 2025

УДК 504:69

О-93

Укладачі: М. В. Кравченко, д-р техн. наук, доцентка;
Т. М. Ткаченко, д-р техн. наук, професорка;
Л. О. Василенко, канд. техн. наук, доцентка

Рецензент С. В. Федоренко, канд. техн. наук, доцент

Відповідальна за випуск Т.М. Ткаченко, д-р техн. наук, професорка

Затверджено на засіданні кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, протокол № 8 від 21 січня 2025 року.

В авторській редакції.

Оцінка кліматичних змін та вуглецевого сліду в будівельній О-93 галузі [Електронний ресурс]: методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни «Основи екології» / уклад.: М.В. Кравченко, Т.М. Ткаченко, Л.О. Василенко. – Київ : КНУБА, 2025. – 36 с.

Містять теоретичні положення і методику розрахунку змін температурного режиму в Україні за даними СМІР6 та оцінки вуглецевого сліду будівель протягом їх життєвого циклу. Структура методичних вказівок містить теоретичну та практичну частину, практичне розрахункове завдання з варіантами, методику виконання розрахунків, порядок та вимоги до оформлення результатів у вигляді Протоколу заняття.

Призначено для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх спеціальностей та форм навчання.

©КНУБА, 2025

ЗМІСТ

Загальні положення	4
Практична робота №1. Історичні та прогнозні зміни середньої температури та екстремальних температурних значень в Україні за даними <i>СМІР6</i>	6
Практична робота №2. Використання оцінки життєвого циклу для розрахунку викидів вуглецю протягом життєвого циклу в будівлях....	10
Практична робота №3. Аналіз і модернізація будівлі в контексті енергоефективності та інтеграції відновлюваних джерел енергії.....	23
Вимоги до форматування текстової частини звіту	33
Список літератури	34

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Зміна клімату була визнана глобальною політичною проблемою майже півстоліття тому, що стало поштовхом до поступового посилення зусиль щодо її пом'якшення. Ключовими етапами цих зусиль є прийняття Рамкової конвенції ООН про зміну клімату (РКЗК ООН) під час Конференції ООН з навколишнього середовища та розвитку у 1992 році, відомої як Саміт Землі, підписання Кіотського протоколу у 1997 році та укладення Паризької угоди у 2015 році.

Паризька угода встановила амбітну мету обмежити глобальне підвищення середньої температури значно нижче 2 °С від доіндустріального рівня, прагнучи досягти межі 1,5 °С. В рамках цих зусиль Європейський Союз, керуючись Європейським зеленим курсом, взяв на себе провідну роль у боротьбі зі зміною клімату, визначивши мету досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року.

Глобальні супутникові спостереження за викидами CO₂ у поєднанні з оберненим моделюванням надають змогу краще зрозуміти джерела та поглиначі цього парникового газу. Для цього необхідно використовувати супутникові спостереження, чутливі до змін концентрації CO₂ поблизу поверхні Землі. Такі спостереження здійснюються через вимірювання яскравості у короткохвильовому інфрачервоному спектральному діапазоні (*SWIR*), які забезпечують дані про середні по стовпчику мольні частки CO₂ в сухому повітрі.

Програма Європейського Союзу «Коперник» є прикладом інтеграції супутникових спостережень, даних моделювання та місцевих вимірювань для вирішення екологічних завдань. Програма спрямована на забезпечення відкритого доступу до даних та сервісів, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення у сфері кліматичних дій. Служби зі зміни клімату (*C3S*) та моніторингу атмосфери (*CAMS*), реалізовані в межах цієї програми, сприяють розробці адаптаційних і пом'якшувальних заходів у різних секторах, зокрема в будівництві.

Будівництво відіграє ключову роль у глобальному споживанні енергії. Будівельний сектор має значний вплив на використання природних ресурсів і формування викидів протягом усього життєвого циклу будівлі – від будівництва до знесення. Енергоспоживання будівель поділяється на пряму та непряму енергію. Пряма енергія використовується під час будівництва,

експлуатації, ремонту та знесення, тоді як непряма енергія витрачається на виробництво матеріалів і технічних систем, що застосовуються в будівництві.

У зв'язку зі значною урбанізацією, масштабна будівельна діяльність триває по всьому світу. Очікується, що до 2030 року частка міського населення досягне 60%. Такий темп у будівництві підкреслює необхідність ефективного використання ресурсів, щоб запобігти їх виснаженню.

Визначення стратегій пом'якшення наслідків змін клімату вимагає оцінки поточних показників будівель щодо споживання енергії та викидів CO₂. Оцінка життєвого циклу (*LCA*) є інструментом для кількісної оцінки використання матеріалів, енергетичних потоків та екологічного впливу будівель. *LCA* дозволяє систематично аналізувати вплив кожного матеріалу та процесу на довкілля. Ця методика охоплює всі етапи життєвого циклу продукту – від добування сировини і виробництва до експлуатації та утилізації (від «колиски до могили»).

Методичні вказівки включають дві практичні роботи «Історичні та прогнозні зміни середньої температури та екстремальних температурних значень в Україні за даними *СМІР6*» та «Використання оцінки життєвого циклу для розрахунку викидів вуглецю протягом життєвого циклу в будівлях», текст яких викладено за логічною структурною схемою – тема, мета роботи, подання теоретичних відомостей за темою, практичне завдання. В кінці роботи наводиться перелік контрольних питань для самоперевірки.

Засвоєння матеріалів методичних вказівок допоможе студентам застосовувати отримані знання на практиці для аналізу кліматичних змін і екологічного впливу будівельної діяльності. Практичні роботи сприятимуть формуванню вміння працювати з кліматичними даними, проводити розрахунки за методикою оцінки життєвого циклу та розробляти рекомендації щодо зменшення викидів вуглецю. Крім того, вони допоможуть розвинути критичне мислення та навички екологічного моделювання, необхідні для вирішення актуальних проблем сталого розвитку.

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1

Тема: Історичні та прогнозні зміни середньої температури та екстремальних температурних значень в Україні за даними СМІР6

Мета роботи: проведення детального дослідження майбутніх змін середньої температури та її екстремальних значень для України в контексті зміни клімату, з використанням останніх глобальних кліматичних прогнозів на основі даних СМІР6, із застосуванням Інтерактивного атласу клімату Коперника (*C3S Atlas*) для аналізу кліматичних змін та інтеграції різних джерел даних.

Теоретичні відомості

Сховище кліматичних даних (Copernicus Climate Data Store, *CDS*; <https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home>) забезпечує доступ до широкого спектра кліматичних даних через зручний каталог із функцією пошуку. Набори даних *CDS* охоплюють: історичні записи кліматичних спостережень, оцінки основних кліматичних змінних (*ECV*), отриманих із супутникових та наземних спостережень, глобальний і регіональний аналіз клімату, сезонні прогнози, реконструкції минулого клімату, прогнозовані зміни клімату.

Доступ до цих даних є відкритим, безкоштовним і необмеженим. Для користувачів також надається онлайн-набір інструментів, що дозволяють створювати робочі процеси та додатки відповідно до індивідуальних потреб.

Інтерактивний атлас клімату Коперника (C3S Atlas) – це веб-додаток Служби зміни клімату Copernicus (*C3S*), який дозволяє досліджувати та аналізувати дані про минулий і майбутній клімат. Атлас базується на численних джерелах доказів, зокрема наборах даних спостережень, повторного аналізу та прогнозування кліматичних змін, доступних у сховищі кліматичних даних *C3S (CDS)*. Цей інструмент сприяє проведенню глобальної та регіональної оцінки тенденцій у минулому та прогнозів майбутніх змін ключових змінних і екстремальних індексів для різних часових періодів за сценаріями викидів або рівнями глобального потепління (наприклад, 1,5°; 2°; 3° та 4°).

Приповерхнева температура є основним показником потепління клімату. Міжурядова група експертів зі зміни клімату констатує, що

глобальна температура поверхні значно зросла порівняно з доіндустріальним періодом 1850–1900 років. Підвищення температури прискорилося з 1970 року, і кожне з останніх кількох десятиліть було послідовно теплішим, ніж попереднє.

Кліматичні прогнози, отримані за допомогою глобальних кліматичних моделей (*GCM*), є ключовим інструментом для оцінки майбутніх змін клімату, розробки стратегій адаптації та пом'якшення їхніх наслідків. Їх основною перевагою є здатність моделювати реакцію кліматичної системи на різні сценарії концентрації парникових газів в атмосфері. Одним із ключових проєктів у цій сфері є Coupled Model Intercomparison Project (*CMIP*), який координується Всесвітньою програмою дослідження клімату (*WCRP*).

Проєкт пройшов значну еволюцію від першої фази (*CMIP1*) до сучасної версії *CMIP6*, яка спрямована на зменшення невизначеностей у моделях. Моделі *CMIP6* демонструють значну варіативність у значеннях рівноважної кліматичної чутливості (*ECS*) – показника, що відображає підвищення температури у відповідь на подвоєння концентрації CO₂ в атмосфері з 280 до 560 ppm. Значення *ECS* варіюються від 1,83 °C до 5,67 °C. Відповідно до прогнозів, глобальна середня температура поверхні може зрости на 1,0–3,3 °C порівняно з доіндустріальним рівнем (1850–1900 роки), навіть у разі негайного припинення антропогенних викидів.

CMIP6 використовує інтегровану модель, яка поєднує фізичні процеси клімату (Representative Concentration Pathways, *RCP*) із соціально-економічними впливами (спільні соціально-економічні шляхи, *SSP*). В результаті формується вісім ключових сценаріїв: *SSP1-1.9*, *SSP1-2.6*, *SSP2-4.5*, *SSP3-7.0*, *SSP4-3.4*, *SSP4-6.0*, *SSP5-3.4-OS* і *SSP5-8.5*. Ці сценарії забезпечують важливу інформацію для аналізу й адаптації до наслідків зміни клімату та описують можливу майбутню еволюцію антропогенних викидів парникових газів залежно від вибору соціально-економічного розвитку.

Високі та дуже високі викиди: *SSP3-7.0* і *SSP5-8.5* передбачають подвоєння викидів CO₂ у 2100 та 2050 роках відповідно. *Проміжні викиди:* *SSP2-4.5* і *SSP4-6.0* передбачають стабілізацію викидів на нинішньому рівні до середини століття. *Низькі та дуже низькі викиди:* *SSP1-1.9* і *SSP1-2.6* передбачають значне скорочення викидів до 2050 року.

Тобто, найбільш оптимістичним серед них є сценарій SSP1-1.9, який передбачає досягнення нульових викидів CO₂ приблизно до 2050 року. Очікується, що він призведе до радіаційного впливу 1,9 Вт/м² та підвищення глобальної температури на 1–1,8 °С у період 2081–2100 років. Помірний сценарій SSP2-4.5 передбачає стабілізацію викидів на поточному рівні до 2050 року з подальшим їх зниженням, але без досягнення нульового рівня до кінця століття. Такий сценарій прогнозує радіаційний вплив 4,5 Вт/м² і підвищення температури на 2,7 °С. Найбільш песимістичним є сценарій SSP5-8.5, що передбачає зростання викидів CO₂ до 2075 року та їхнє незначне скорочення до 2100 року. Він призведе до радіаційного впливу 8,5 Вт/м² і глобального потепління на 4,4 °С у тому ж періоді.

В Україні, як і в інших країнах Європи, спостерігається посилення цієї тенденції. Очікується, що в майбутньому температура в Україні буде зростати швидше за глобальний середній рівень, що призведе до більш частих та інтенсивних екстремальних температурних явищ. Унаслідок цього зростає ймовірність виникнення гідрологічних та екологічних посух, а також збільшення частоти та інтенсивності хвиль спеки, що сприятиме посиленню негативних наслідків для водних ресурсів, сільського господарства та екосистем. Це підкреслює важливість використання просторово розподілених даних про температуру повітря для оцінки та прогнозування змін клімату, зокрема для потреб адаптації на національному та регіональному рівнях.

Індивідуальне завдання

1. Аналіз кліматичних даних для України.

1.1. Використовуючи дані з глобальних кліматичних моделей *CMIP6* із горизонтальною роздільною здатністю більше 1,25° за широтою та довготою, провести аналіз середньої температури та екстремальних значень для території України за наступні періоди: історичний період (1995–2014), майбутні сценарії SSP2-4.5 і SSP5-8.5 для періодів 2046–2065 (середньострокове майбутнє) та 2081–2100 (довгострокове майбутнє). Для аналізу кліматичних змін застосувати Інтерактивний атлас клімату Коперника (C3S Atlas): <https://atlas.climate.copernicus.eu/atlas>

2. Розрахунок середніх значень та екстремальних показників:

2.1. Визначити середні значення температури.

2.2. Оцінити екстремальні показники (максимальні та мінімальні значення) для кожного з розглянутих періодів.

3. Аналіз змін температури:

3.1. Розрахувати різницю середніх температур між історичним періодом і майбутніми сценаріями SSP2-4.5 та SSP5-8.5.

4. Візуалізація результатів:

4.1. Створити графіки та карти для території України, що ілюструють:

- просторовий розподіл середньої температури для кожного періоду;
- зміни середньої температури між базовим періодом і майбутніми сценаріями;

- розподіл екстремальних значень температури.

5. Порівняння кліматичних сценаріїв:

5.1. Порівняти сценарії SSP2-4.5 та SSP5-8.5 за середньою температурою та екстремальними показниками для України.

6. Тенденції у часових перспективах:

6.1. Визначити, як змінюється температура на території України в середньостроковій (2046–2065) і довгостроковій (2081–2100) перспективах.

7. Узагальнення та висновки:

7.1. Узагальнити результати аналізу, акцентуючи увагу на впливі кліматичних змін на середню температуру та екстремальні значення для України.

8. Рекомендації:

8.1. Надати рекомендації щодо застосування отриманих результатів для прогнозування кліматичних ризиків та розробки адаптаційних заходів в Україні.

9. Дати відповіді на контрольні запитання.

Контрольні запитання

1. Що таке Coupled Model Intercomparison Project (*CMIP*), і яку роль відіграє його шоста фаза (*CMIP6*) у дослідженні кліматичних змін?

2. Які основні сценарії викидів парникових газів використовуються в моделюванні *CMIP6*, і чим вони відрізняються один від одного?

3. Що таке інтерактивний атлас клімату Коперника (*C3S Atlas*), і які його основні функції у дослідженні кліматичних змін?

4. Які очікувані наслідки сценаріїв SSP2-4.5 і SSP5-8.5 для середньої температури та екстремальних значень в Україні?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 2

Тема: Використання оцінки життєвого циклу для розрахунку викидів вуглецю протягом життєвого циклу в будівлях.

Мета роботи: розрахунок викидів вуглецю за допомогою оцінки життєвого циклу (*LCA*) для визначення впливу різних етапів життєвого циклу будівель на викиди CO₂ та оцінка їхнього впливу на навколишнє середовище.

Теоретичні відомості

Оцінка життєвого циклу (*LCA*) – це методологія аналізу ресурсного використання та екологічного впливу продукту на всіх етапах його життєвого циклу: від видобутку сировини, її переробки, виробництва, пакування, транспортування, споживання, до переробки та утилізації (тобто «від колиски до могили»). Від моменту впровадження у 1990 році, *LCA* визнано важливим інструментом для оцінки екологічного впливу продукції.

Застосування *LCA* у будівництві дозволяє не лише кількісно оцінювати вплив будівель на довкілля, а й обґрунтовано підходити до вибору конструктивних рішень, матеріалів, методів будівництва та експлуатаційних стратегій на етапі проектування.

Вуглецевий слід будівлі протягом її життєвого циклу поділяється на три ключові етапи:

- *втілений етап (етап 1)*: охоплює виробництво будівельних матеріалів, їх транспортування та процеси будівництва;

- *експлуатаційний етап (етап 2)*: включає енергоспоживання, викиди вуглецю під час експлуатації, технічного обслуговування та оновлення будівлі;

- *етап знесення (етап 3)*: охоплює енергоспоживання демонтажного обладнання та транспортування будівельних відходів.

У практичній роботі використовується комбінація методу аналізу інвентаризації та методу коефіцієнта викидів для оцінки викидів вуглецю. Як метод розрахунку викидів вуглецю, рекомендований МГЕЗК, основний принцип методу коефіцієнта викидів формулюється як: «викиди вуглецю = дані про активність × коефіцієнт викиду». Цей метод широко використовується, оскільки дозволяє комплексно оцінити викиди парникових газів будівель. Метод аналізу інвентаризації було розроблено на основі цього підходу.

Метод аналізу інвентаризації бере за основу аналіз процесу, детально розраховує викиди вуглецю на кожному етапі життєвого циклу будівлі та накопичує загальні викиди за весь життєвий цикл. Це спрощує аналіз конкретних етапів і робить метод ефективним інструментом для оцінки впливу будівель на зміну клімату.

Загальні викиди вуглецю. Викиди вуглецю, що утворюються протягом усього життєвого циклу будівлі, складаються з втілених викидів вуглецю, експлуатаційних викидів вуглецю та викидів вуглецю внаслідок знесення будівлі, як показано в рівнянні (2.1):

$$C_{LCA} = C_1 + C_2 + C_3, \quad (2.1)$$

де C_{LCA} – загальні викиди вуглецю протягом життєвого циклу будівлі (кг CO_2);

C_1 – втілені викиди вуглецю, що виникають під час виробництва, транспортування та будівництва матеріалів (кг CO_2);

C_2 – експлуатаційні викиди вуглецю, що утворюються під час використання будівлі (кг CO_2);

C_3 – викиди вуглецю, пов'язані зі знесенням та утилізацією матеріалів (кг CO_2).

Етап 1. *Втілені викиди вуглецю* складаються з наступних трьох компонентів: виробництво будівельних матеріалів, транспорт і будівництво. У практичній роботі використовується метод розрахунку аналізу запасів, який описано у рівнянні:

$$C_1 = C_P + C_T + C_C, \quad (2.2)$$

де C_P – викиди вуглецю, що виникають під час виробництва будівельних матеріалів (кг CO_2);

C_T – викиди вуглецю, що утворюються під час транспортування будівельних матеріалів до будівельного майданчика (кг CO_2);

C_C – викиди вуглецю, пов'язані з будівельними роботами (кг CO_2).

Викиди вуглецю від виробництва будівельних матеріалів охоплюють процеси виробництва та обробки основних конструкційних матеріалів, матеріалів огорожувальних конструкцій і додаткових компонентів будівлі. Цей процес описано у рівнянні:

$$C_P = \sum_{i=1}^n (M_i \times EF_i), \quad (2.3)$$

де M_i – це витрата i -го будівельного матеріалу, що використовується в проєкті (одиниця);

EF_i – це коефіцієнт викидів вуглецю для виробництва i -го будівельного матеріалу (кг CO_2 /одиниця).

Відповідні дослідження показали, що за принципом Парето (правило 80/20) для оцінки викидів вуглецю усіх будівельних матеріалів можна зосередитися лише на найбільших категоріях матеріалів. У практичній роботі зібрано дані про споживання шести основних будівельних матеріалів, зокрема бетону, цементу, сталі, цегли, дерева та інших, на основі будівельного списку. Коефіцієнти викидів вуглецю для цих матеріалів наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Витрата основних будівельних матеріалів та коефіцієнти викидів вуглецю

№	Тип матеріалу	Одиниця	Кількість	EF_i (кг CO_2 /одиниця)
1	Бетон С15	м ³	481,33	177,8
2	Бетон С20	м ³	647,37	237,32
3	Бетон С25	м ³	619,74	266,18
4	Бетон С30	м ³	6642,35	295
5	Бетон С35	м ³	23,88	362,6
6	Бетон С50	м ³	854,46	511
7	Цемент 32.5	кг	124597,12	0,621
8	Цемент 42.5	кг	70595,28	0,795
9	Цементний розчин	м ³	714,18	315
10	Сталь (секційна)	кг	5593,69	2365
11	Сталь HRB 300	кг	29638,14	2,34
12	Сталь HRB 400	кг	1103654,28	2,34
13	Сталь HRB 500	кг	67488,3	2,34
14	Холоднокатана ребриста арматура	кг	5243,82	3368
15	Підпори для труб	кг	28593,13	2,43
16	Сталева трубна опалубка	кг	35442,28	2,43
17	Цегла (190 × 90 × 40)	м ³	51,76	336

18	Стандартна цегла (240 × 115 × 53)	100 шт.	377,17	49,15
19	Цегла КМ1 (190 × 190 × 90)	шт.	3934,75	109,17
20	Твердий бетон (190 × 90 × 43)	шт.	149,42	24,71
21	Бетонна блок (600 × 250 × 200)	м ³	928,7	212
22	Дерево	м ³	1079,51	178
23	Інші матеріали: пісок	т	332,12	2,51
24	Інші матеріали: гравій	т	297,75	2,18
25	Болт для герметизації	кг	6048,19	1,54
26	Зварювальний дрiт	кг	4773,85	3027

Викиди вуглецю, які виникають під час транспортування будівельних матеріалів до будівельного майданчика, розраховуються згідно з рівнянням:

$$C_T = \sum_{i=1}^n (M_i \times T_i \times EF_t), \quad (2.4)$$

де T_i – це відстань i -го будівельного матеріалу від виробничого майданчика до будівельного майданчика (км);

EF_t – це коефіцієнт викиду вуглецю для різних видів транспорту.

Транспортні засоби, як правило, включають вантажівки, потяги та кораблі. В межах практичної роботи в якості єдиного виду транспорту були обрані дизельні вантажівки великої вантажопідйомності, а коефіцієнт викидів вуглецю для транспорту приймаємо рівним 0,162 кгСО₂/(т·км).

Викиди вуглецю в будівництві здебільшого виникають внаслідок споживання енергії, як от дизельне паливо, бензин і електрика, під час використання будівельної техніки, як показано в рівнянні:

$$C_C = \sum_{k=1}^n (M_{m,k} \times B_{m,k} \times EF_{e,j}), \quad (2.5)$$

де $M_{m,k}$ – клас споживання k -го механічного обладнання (одиниця);

$B_{m,k}$ – це норма споживання енергії для k -го механічного обладнання;

$EF_{e,j}$ – це коефіцієнт викиду вуглецю для j -го виду енергії (кгСО₂/одиниця), наведені в табл. 2.2.

Коефіцієнти викидів CO₂ для основних джерел енергії

Тип	Коефіцієнт викидів CO ₂
Бензин	2,93 кг CO ₂ /кг
Дизельне пальне	3,1 кг CO ₂ /кг
Природний газ	2,16 кг CO ₂ /м ³
Водопровідна вода	0,168 кг CO ₂ /т
Електрика	0,7 кг CO ₂ /кВт·год

Етап 2. Експлуатаційні викиди вуглецю охоплюють як викиди, пов'язані з експлуатаційним споживанням енергії, так і з обслуговуванням будівлі, що описано рівнянням (2.6):

$$C_2 = C_E + C_M, \quad (2.6)$$

де C_E – викиди вуглецю, спричинені експлуатаційним споживанням енергії (кгCO₂);

C_E – викиди вуглецю, пов'язані з технічним обслуговуванням (кгCO₂).

Основними джерелами енергії, споживаної під час експлуатації житлової будівлі, є електроенергія, газ і побутова вода. Викиди вуглецю, спричинені споживанням електроенергії та газу, розраховуються за рівнянням (2.7):

$$C_E = \left[\left(\frac{Q_C}{COP_C} + \frac{Q_{H\phi}}{\eta_1 q_1 q_2} \right) + S(E_l + E_e) \right] EF_e A + C_W. \quad (2.7)$$

Оцінку викидів вуглецю, пов'язаних із споживанням побутової води, виконують за допомогою рівняння (2.8). Коефіцієнти викидів вуглецю для відповідних видів енергії, необхідні для розрахунків, наведені в таблиці 2.2.

$$C_W = D \times S \times A \times EF_w, \quad (2.8)$$

де Q_C – сумарне річне споживання енергії для охолодження (кВт·год);

COP_C – коефіцієнт ефективності систем охолодження в громадських будівлях, прийнятий як 3,5;

$Q_{H\phi}$ – сумарне річне споживання теплової енергії (кВт·год);

η_1 – загальний коефіцієнт ефективності системи опалення, де джерелом тепла є газовий котел, прийнятий як 0,85;

q_1 – стандартна теплотворна здатність природного газу, прийнята як 9,87 кВт·год/м³;

q_2 – сумарне споживання вугілля для генерації електроенергії, прийняте як 0,33 кг умовного палива/кВт·год;

φ – коефіцієнт перетворення між природним газом і умовним паливом, прийнятий як 1,21 кг умовного палива/м³;

S – площа будівлі (м²);

E_l – річне енергоспоживання для освітлення (кВт·год/м²);

E_e – річне енергоспоживання для обладнання (кВт·год/м²);

$EF_{e,j}$ – коефіцієнт викидів вуглецю від електроенергії (кгСО₂ /кВт·год);

A – розрахунковий термін експлуатації будівлі, прийнятий як 50 років;

C_W – викиди вуглецю, спричинені споживанням побутової води (кгСО₂);

D – добове споживання води, прийняте як 2 т/м²;

EF_ω – коефіцієнт викидів вуглецю для води (кгСО₂ /т).

Викиди вуглецю від технічного обслуговування включають викиди, пов'язані з оновленням і ремонтом обладнання та компонентів. Вони можуть бути швидко оцінені шляхом множення втілених викидів вуглецю на коефіцієнт обслуговування, використовуючи рівняння (2.9) та (2.10):

$$C_M = M \times C_1, \quad (2.9)$$

$$M = 1\% \times n_1 + 20\% \times n_2 + 25\% \times n_3, \quad (2.10)$$

де M – коефіцієнт обслуговування, прийнятий рівним 0,65;

n_1 , n_2 та n_3 – кількість дрібних, середніх і капітальних ремонтів, відповідно.

Етап 3. *Викиди вуглецю від знесення* охоплюють викиди, пов'язані зі знесенням будівлі та утилізацією будівельних відходів, і розраховуються за рівнянням (2.11):

$$C_3 = S \cdot (2,88X + 19,37), \quad (2.11)$$

де X – кількість поверхів над рівнем землі.

Індекси оцінки викидів вуглецю. Викиди вуглецю на кожному етапі життєвого циклу будівлі на одиницю площі, C_A , розраховуються за рівнянням (2.12):

$$C_A = \frac{C_l}{S}, \quad (2.12)$$

де C_A – викиди вуглецю на одиницю площі (кг СО₂ /м²);

C_l – викиди вуглецю на стадії l (кг СО₂);

S – площа будівлі (м²).

2. Практична частина

Розрахувати загальні викиди вуглецю для офісної будівлі протягом її життєвого циклу, якщо відомо:

- площа будівлі (S): 1000 м²;
- кількість поверхів (X): 5 поверхів;
- термін експлуатації будівлі (A): 50 років;
- відстань будівельного матеріалу від виробничого майданчика до будівельного майданчика (T_i): 50 км;
- споживання енергії для опалення (Q_H): 400 000 кВт·год/рік;
- споживання енергії для охолодження (Q_C): 100 000 кВт·год/рік;
- споживання побутової води (D): 2 т/м² на добу;
- електроспоживання для освітлення (E_l): 10 кВт·год/м²/рік;
- електроспоживання для обладнання (E_e): 15 кВт·год/м²/рік;
- матеріали будівлі: бетон (C30).

Розрахунок необхідно виконати за етапами життєвого циклу будівлі:

- визначити втілені викиди вуглецю, пов'язані з виробництвом матеріалів, їх транспортуванням та будівництвом;
- розрахувати експлуатаційні викиди вуглецю від споживання енергії для опалення, охолодження, освітлення та обладнання;
- оцінити викиди вуглецю від споживання побутової води;
- оцінити викиди вуглецю при знесенні будівлі;
- зробити висновок та запропонувати шляхи вирішення проблеми викидів вуглецю від офісної будівлі у контексті змін клімату.

Для кожного етапу використовувати відповідні коефіцієнти викидів вуглецю, зазначені в методиці.

Розрахунок:

Етап 1: втілені викиди вуглецю (C_1)

Викиди вуглецю на етапі виробництва, транспортування та будівництва будівельних матеріалів складаються з трьох основних компонентів та розраховуються згідно рівняння (2.2).

1. *Викиди вуглецю від виробництва матеріалів (C_p):* для кожного будівельного матеріалу використовуємо рівняння (2.3) і таблицю 2.2 для визначення коефіцієнтів викидів ($EF_{e,j}$).

Відомі параметри:

- витрата бетону C30: 6 642,35 м³;
- коефіцієнт викидів для бетону C30 (EF_i): 295 кг CO₂ /м³;

Викиди від бетону:

$$C_{\text{Рбетон}} = 6\,642,35 \times 295 = 1\,959\,490,25 \text{ кг CO}_2 .$$

Подібним чином обчислюємо викиди для сталі та цегли, використовуючи їх відповідні коефіцієнти.

2. *Викиди вуглецю від транспортування матеріалів (C_T):* використовуємо рівняння (2.4). Приймаємо, що транспорт для всіх матеріалів – дизельні вантажівки.

Відомі параметри:

- відстань до будівельного майданчика (T_i): 50 км;
- коефіцієнт викидів для транспорту: 0,162 кг CO₂ /(т·км).

Викиди від транспортування матеріалів:

$$C_T = 6\,642,35 \times 50 \times 0,162 = 53\,803,0 \text{ кг CO}_2 .$$

3. *Викиди вуглецю від будівельних робіт (C_C):* використовуємо рівняння (2.5). Для спрощення припускаємо, що основні роботи виконуються за допомогою дизельного обладнання, і для кожної одиниці техніки маємо коефіцієнти енергоспоживання.

Відомі параметри:

- коефіцієнт викидів CO₂ для дизельного палива: 3,1 кг CO₂ /кг;
- споживання палива для одного виду техніки (наприклад, екскаватор): 1000 дм³ дизельного пального (1 дм³ \approx 0,84 кг).

Викиди вуглецю в будівництві від будівельних робіт:

$$C_C = 1\,000 \times 0,84 \times 3,1 = 2\,604 \text{ кг CO}_2 .$$

Подібним чином оцінюються викиди для іншої техніки.

Загальні викиди на етапі виробництва, транспортування та будівництва (C_1) розраховуються згідно рівняння (2.2):

$$C_1 = 1\,959\,490,25 + 53\,803,0 + 2\,604 = 2\,015\,897,25 \text{ кг CO}_2 .$$

Етап 2: експлуатаційні викиди вуглецю (C_2)

1. *Викиди від споживання енергії (C_E):* для спрощення припускаємо, що споживання енергії для опалення та охолодження є сталим протягом всього періоду експлуатації. Розрахунок проводиться згідно рівняння (2.7).

Відомі параметри:

- споживання теплової енергії для опалення (Q_H): 400 000 кВт·год/рік;
- споживання енергії для охолодження (Q_C): 100 000 кВт·год/рік;
- коефіцієнт викидів для електроенергії: 0,7 кг CO₂ /кВт·год.

Обчислюємо викиди:

$$C_E = \left[\left(\frac{100\,000}{3,5} + \frac{400\,000 \cdot 1,21}{0,85 \cdot 9,87 \cdot 0,33} \right) + 1\,000(10 + 15) \right] \cdot 0,7 \cdot 50 + 16\,800 = 8\,010\,559,6 \text{ кг CO}_2 .$$

2. *Викиди від споживання води (C_W):* викиди від споживання води обчислюємо за рівнянням (2.8):

Відомі параметри:

- добове споживання води: 2 т/м²;
- площа: 1000 м²;
- коефіцієнт викидів для води: 0,168 кг CO₂ /т.

Обчислюємо викиди:

$$C_W = 2 \times 1\,000 \times 50 \times 0,168 = 16\,800 \text{ кг CO}_2 .$$

3. *Викиди вуглецю від технічного обслуговування:* розраховуються згідно рівняння (2.9).

Відомі параметри:

- коефіцієнт обслуговування: 0,65.

Обчислюємо викиди:

$$C_M = 0,65 \times 2\,015\,897,25 = 1310335,19 \text{ кг CO}_2 .$$

4. *Загальні експлуатаційні викиди (C_2)* розраховуються згідно рівняння (2.6):

$$C_2 = 8\,010\,559,6 + 1310335,19 = 9\,320\,894,75 \text{ кг CO}_2 .$$

Етап 3: викиди вуглецю від знесення будівлі (C_3)

Відомі параметри:

- площа: 1000 м².
- кількість поверхів: 5.

Використовуючи рівняння (2.11) обчислюємо викиди:

$$C_3 = 1000 \cdot (2,88 \cdot 5 + 19,37) = 33\,770 \text{ кг CO}_2 .$$

Етап 4: загальні викиди вуглецю (C_{LCA})

Використовуючи рівняння (2.1) обчислюємо викиди:

$$C_{LCA} = 2\,015\,897,25 + 9\,320\,894,75 + 33\,770 = 11\,370\,565 \text{ кг CO}_2 .$$

Етап 5: викиди вуглецю на одиницю площі (C_A)

Викиди на одиницю площі обчислюємо за рівнянням (12):

$$C_A = \frac{11\,370\,565}{1000} = 11\,370,56 \text{ кг CO}_2 /\text{м}^2 .$$

Висновок: загальні викиди вуглецю для цієї будівлі протягом її життєвого циклу становлять 11 370 565 кг CO₂ , або 11 370,56 кг CO₂ /м². Ці викиди складаються з кількох основних етапів: виробництва, транспортування та будівництва матеріалів, експлуатаційного періоду, а

також знесення будівлі. Пік викидів спостерігається на етапі експлуатації, який значною мірою зумовлений споживанням енергії для опалення та охолодження, а також споживанням води.

Рекомендації щодо пом'якшення наслідків змін клімату у будівельній галузі

Покращення енергоефективності будівлі: впровадження більш ефективних систем опалення та охолодження; застосування пасивних енергетичних технологій, які знижують потребу в енергії для обігріву та охолодження.

Перехід на відновлювальні джерела енергії: використання сонячних панелей, вітрових турбін або інших відновлювальних джерел енергії для зменшення викидів CO₂ на етапі експлуатації будівлі.

Зниження викидів на етапі будівництва: використання екологічно чистих матеріалів з меншим впливом на довкілля, таких як перероблені матеріали або матеріали з низьким вуглецевим слідом; використання більш ефективних транспортних засобів для доставки матеріалів.

Інтеграція зеленої інфраструктури: встановлення зелених дахів, систем збору дощової води та інших елементів зелених будівель, які можуть знизити потребу в зовнішній енергії та зменшити викиди CO₂.

Підвищення ефективності використання води: встановлення систем для збереження води, таких як системи повторного використання води для сантехнічних потреб та поливу.

3. Індивідуальне завдання

Розрахувати загальні викиди вуглецю для офісної будівлі протягом її життєвого циклу. Розрахунок необхідно виконати за етапами життєвого циклу будівлі:

- визначити втілені викиди вуглецю, пов'язані з виробництвом матеріалів, їх транспортуванням та будівництвом;
- розрахувати експлуатаційні викиди вуглецю від споживання енергії для опалення, охолодження, освітлення та обладнання;
- оцінити викиди вуглецю від споживання побутової води;
- оцінити викиди вуглецю при знесенні будівлі;
- зробити висновок та запропонувати шляхи вирішення проблеми викидів вуглецю від офісної будівлі у контексті змін клімату.

Варіант необхідно обрати відповідно до списку академічної групи. Початкові дані слід обирати з таблиці 2.3.

Початкові дані для виконання практичної роботи №2

Варіант	Площа будівлі, S , м ²	Кількість поверхів, X	Термін експлуатації будівлі, A	Споживання енергії для опалення, Q_H , кВт·год/рік	Споживання енергії для охолодження, Q_C , кВт·год/рік	Споживання побутової води, D , т/м ² на добу	Електроспоживання для освітлення, E_I , кВт·год/м ² /рік	Електроспоживання для обладнання, E_e , кВт·год/м ² /рік	Тип палива	Тип матеріалу
1	1060	7	40	403000	107000	2	11	14	Бензин	Цегла КМ1
2	950	4	45	380000	95000	2,1	9,8	14,8	Дизельне паливо	Твердий бетон
3	1050	6	55	420000	105000	2,2	10,1	15,2	Бензин	Бетон С35
4	1100	5	60	440000	110000	2	9,9	14,5	Дизельне паливо	Бетонна блок
5	1000	4	50	395000	98000	2,05	10,3	15,1	Бензин	Сталева трубна опалубка
6	1150	6	55	460000	115000	2,1	9,7	14,9	Дизельне паливо	Зварювальний дріт
7	1200	5	50	430000	105000	2,15	10,2	15	Бензин	Цегла КМ1
8	1000	4	45	390000	95000	2,05	10,1	14,7	Дизельне паливо	Сталь HRB 400
9	950	5	50	375000	94000	2	10	14,6	Бензин	Інші матеріали: гравій
10	1050	6	60	425000	102000	2,2	9,9	15,3	Дизельне паливо	Бетон С30
11	1150	5	50	445000	108000	2,1	10	15	Бензин	Болт для герметизації
12	1000	4	45	380000	92000	2	10,2	14,8	Дизельне паливо	Бетон С20
13	950	5	55	370000	93000	2,1	10,1	14,9	Бензин	Холоднокатана ребриста арматура
14	1100	6	60	460000	112000	2,15	10	15,1	Дизельне паливо	Бетон С35

Закінчення табл. 2.3

15	1000	5	50	400000	100000	2	10	15	Бензин	Бетон С20
16	950	4	45	380000	95000	2	9,8	14,7	Дизельне паливо	Зварювальний дрiт
17	1050	6	55	425000	105000	2,2	10,1	15,2	Бензин	iншi матерiали: гравiй
18	1100	5	60	440000	110000	2,1	9,9	14,8	Дизельне паливо	Холоднокатана ребриста арматура
19	1200	6	50	450000	115000	2,2	10,3	15,4	Бензин	Сталь (секцiйна)
20	1000	4	55	385000	93000	2,05	10,2	14,9	Дизельне паливо	Бетон С50
21	1050	5	50	400000	100000	2,1	10,1	15	Бензин	iншi матерiали: гравiй
22	1100	6	60	430000	108000	2,15	10,3	15,2	Дизельне паливо	iншi матерiали: пiсок
23	1150	5	55	445000	110000	2,2	10,2	15,1	Бензин	Твердий бетон
24	1200	6	50	460000	115000	2,1	10,1	15,4	Дизельне паливо	Бетон С50
25	1000	5	45	390000	95000	2,05	10	14,7	Бензин	Пiдпори для труб
26	950	4	55	375000	94000	2	9,8	14,6	Дизельне паливо	Пiдпори для труб
27	1050	6	50	420000	105000	2,1	10,1	15,2	Бензин	Цемент 32.5
28	1100	5	60	435000	110000	2,15	10	15	Дизельне паливо	Дерево
29	1000	4	50	400000	100000	2	10	15	Бензин	Цемент 32.5
30	950	5	55	370000	93000	2,1	9,9	14,8	Дизельне паливо	Цегла

Контрольні питання

1. Що таке оцінка життєвого циклу (*LCA*), і як вона застосовується у будівельній галузі?
2. Які основні цілі та завдання має *LCA* як інструмент управління навколишнім середовищем?
3. Які чотири основні кроки включає процес *LCA* згідно зі стандартами ISO 14040 та ISO 14044?
4. Які матеріали або методи можуть зменшити енергоспоживання та вуглецевий слід будівлі протягом її життєвого циклу?
5. Які три ключові етапи життєвого циклу будівлі враховуються при розрахунку загальних викидів вуглецю?
6. Як обчислюються втілені викиди вуглецю (C_1) на етапі виробництва будівельних матеріалів?
7. Що таке експлуатаційні викиди вуглецю (C_2), і як вони обчислюються?
8. Як розраховуються викиди вуглецю на етапі знесення будівлі (C_3)?

ПРАКТИЧНА РОБОТА №3

Тема: Аналіз і модернізація будівлі в контексті енергоефективності та інтеграції відновлюваних джерел енергії

Мета: розробити концепцію термомодернізації будівлі з використанням відновлюваних джерел енергії для досягнення енергоефективності, зменшення вуглецевого сліду та відповідності сучасним технічним вимогам.

1. Теоретичні відомості

Енергоефективність у будівельній галузі – це здатність забезпечувати виконання функцій будівель та споруд з використанням меншої кількості енергії через мінімізацію втрат. Вона сприяє скороченню викидів парникових газів, зменшенню залежності від викопного палива та попиту на імпорт енергоносіїв, що позитивно впливає як на витрати домогосподарств, так і на загальноекономічні витрати. Вищий рівень енергоефективності, досягнутий завдяки екологічним інноваціям, технічним, організаційним та інституційним змінам у будівництві, сприяє значній економії енергії, зниженню рівня забруднення навколишнього середовища та покращенню сталого управління ресурсами, що є важливим чинником у пом'якшенні наслідків змін клімату.

У науковій літературі можна зустріти ряд споріднених, часто синонімічних термінів та словосполучень, які належать до цієї понятійної категорії. Зокрема, це такі вирази, як: «Політика енергоефективності», «Енергозбереження/економія», «Зменшення споживання енергії», «Ресурси енергоефективності», «Ефективне/стале використання ресурсів», «Раціональне використання енергії/енергоресурсів», «Зворотне споживання енергії», «Ефективний термін корисного використання», «Управління енергією», «Співвідношення корисних виходів до фізичних енергетичних входів», «Вибір меншого енергоспоживання», «Зниження енергоємності виробничих процесів» тощо.

Заходи, спрямовані на зменшення втрат енергії та підвищення енергоефективності, приносять значні переваги не лише з точки зору економії енергії та боротьби зі змінами клімату, а й у контексті поліпшення здоров'я людей і створення нових робочих місць. Тому важливо впроваджувати різноманітні рішення в цій сфері, зокрема термомодернізацію будівель та використання відновлюваних джерел енергії, що є предметом розгляду цієї статті.

Термомодернізація є одним із ключових заходів, спрямованих на зниження споживання первинної енергії (енергії, що міститься в паливі та носіях), необхідної для задоволення потреб у кінцевій енергії. Вона може охоплювати як реновацію

окремих частин будівлі, так і її повне оновлення, при цьому обсяг робіт значною мірою залежить від потреб та фінансових можливостей власника проєкту. Варто зазначити, що більшість існуючих будівель була побудована до впровадження сучасних вимог до енергетичної ефективності, тому ці споруди потребують модернізації своїх технічних характеристик, спрямованих на зниження енергоспоживання.

Нині термін «термомодернізація» здебільшого асоціюється з комплексною енергетичною модернізацією. Це пов'язано з необхідністю виконання широкого спектру заходів, які значно перевищують прості будівельні роботи, пов'язані з утепленням стін, дахів та поліпшенням теплотехнічних характеристик вікон і дверей. До таких заходів належать також установка систем управління енергією, модернізація або заміна систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, які забезпечують ефективний обмін повітря в приміщенні, а також модернізація або заміна застарілих джерел опалення та охолодження на високоефективні системи, що використовують відновлювані джерела енергії. Крім того, доцільно застосовувати «природоорієнтовані рішення», наприклад, зелені стіни.

Заходи з термомодернізації призводять до зменшення втрат тепла та витрат на енергоспоживання, а також покращують умови експлуатації будівлі. Оскільки опалення та охолодження будівель становлять близько 40 % загального споживання енергії, з яких близько 75 % є неефективним використанням енергії, ці сфери є основними напрямками модернізації.

Ще одним важливим фактором, що сприяє підвищенню енергоефективності, є використання *відновлюваних джерел енергії*. Відновлювальна енергетика охоплює сонячну, геотермальну, гідроенергію, енергію океану, вітру та біомасу для забезпечення електричною енергією та теплом кінцевих споживачів. Вона також включає використання біомаси для забезпечення паливом різних видів діяльності, таких як транспорт, телекомунікації, приготування їжі тощо.

Аналізуючи можливості заміщення традиційних джерел енергії відновлюваними, важливо враховувати їх ключові переваги: можливість отримання «безкоштовної» енергії в довгостроковій перспективі та значне скорочення викидів парникових газів за рахунок зменшення споживання викопного палива. Зростаюча обізнаність громадськості про позитивний вплив відновлювальної енергетики на навколишнє середовище та фінансова підтримка для впровадження нових систем на основі відновлюваних джерел енергії сприяють збільшенню популярності виробництва відновлюваної енергії у різних частинах світу.

Збільшення частки відновлювальної енергетики в енергетичних системах сприяє зменшенню споживання первинної енергії, що, в свою чергу, призводить до скорочення використання ресурсів викопного палива. Існує сильна кореляція між споживанням викопного палива та забрудненням навколишнього середовища, що є важливим питанням управління для енергоємних підприємств. Дослідження показують, що відновлювані джерела енергії можуть знижувати витрати на енергію на 10–26 % та викиди діоксиду вуглецю на 5–13 % порівняно з викопними джерелами енергії.

У цьому контексті важливо зазначити, що багато урядів та міжнародних організацій (особливо у США та ЄС) розробили низку нормативних актів, спрямованих на підвищення енергоефективності будівель та зменшення негативного впливу надмірного енергоспоживання на навколишнє середовище. Це дозволяє сприяти впровадженню рішень, що передбачають широке використання відновлювальних джерел енергії. Зокрема, програма Zero-Energy Building стала важливим орієнтиром для планування заходів у цій сфері. Директива ЄС щодо відновлювальних джерел енергії нещодавно була посилена, і ціль ЄС щодо частки відновлювальної енергетики на 2030 рік була підвищена до мінімуму 42,5 %, що є значним кроком вперед порівняно з попередньою метою у 32 %.

Енергоефективність – це показник здатності будівлі забезпечувати тепловий комфорт з мінімальними витратами енергії на опалення чи охолодження. Вона визначається співвідношенням корисного ефекту від використання об'єкта або пристрою до кількості спожитої енергії за типових умов експлуатації.

Європейська політика у сфері енергоефективності базується на комплексі нормативних актів і стратегій, спрямованих на зменшення енергоспоживання та скорочення викидів парникових газів. Відповідні директиви встановлюють мінімальні стандарти енергоефективності, запроваджують енергетичні сертифікати для будівель, сприяють реноваціям та інтегрують відновлювані джерела енергії. Зокрема, до 2050 року планується досягти нульових викидів парникових газів у будівельному секторі шляхом переходу на енергозберігаючі технології та відновлювані джерела енергії.

Відновлювані джерела енергії, такі як вітрогенератори, сонячні панелі, біомаса та теплові насоси, є ефективною альтернативою викопному паливу. Вони сприяють зниженню викидів парникових газів, зменшенню залежності від нестабільних енергетичних ринків та забезпечують стабільні ціни на енергоресурси. Відновлювальна енергетика стала ключовою складовою боротьби з енергетичною кризою та впровадженням Європейського зеленого курсу.

Війна в Україні загострила питання енергетичної незалежності та потребу в модернізації енергетичної інфраструктури. Програма *REPowerEU* прискорює перехід до відновлюваних джерел енергії, зменшує залежність від російського викопного палива та сприяє диверсифікації джерел постачання енергії. Це ініціатива не лише реагує на сучасні виклики, а й стимулює сталий розвиток енергетичної системи, орієнтованої на кліматичну нейтральність.

Такі заходи, як реновація будівель, впровадження сонячних технологій та підвищення енергетичних стандартів, формують основу для створення енергетично ефективного та стійкого будівельного фонду.

2. Практична частина

Розробимо концепцію підвищення енергоефективності будівлі школи шляхом термомодернізації та впровадження відновлюваних джерел енергії. Досліджувана будівля є двоповерховою з частковим підвалом, зведеною в 1960-х роках за типовим проєктом. Архітектурно вона складається з трьох двоповерхових павільйонів (конструктивно незалежних), сполучного блоку та кухонної частини, які утворюють єдиний комплекс. У 2015 році до західної частини школи був добудований спортивний зал, оснащений окремим масляним котлом потужністю 400 кВт, розташованим у котельні.

Будівля школи виконана за традиційною цегляною технологією. Зовнішні стіни мають товщину 45 см та складені з керамічної і силікатної облицювальної цегли. Основна система опалення забезпечується мазутною котельнею, яка складається з двох котлів потужністю 230 і 260 кВт. Радіатори в приміщеннях частково замінені на алюмінієві з термостатичними вентилями; решта – ребристі чавунні радіатори без термостатів. Система гарячого водопостачання (*ГВП*) представлена локальними електричними накопичувальними нагрівачами.

Будівля має загальний опалювальний об'єм 10 482,3 м³ і опалювальну площу 3716,7 м². Кліматичні умови характеризуються середньорічною температурою зовнішнього повітря 6,9 °С за період 1971–2000 років, а розрахункова температура для зимового періоду становить – 22 °С. Умови проєктування даної ділянки наведено в таблиці 1.

У зв'язку з високими експлуатаційними витратами будівлі школи директором було прийнято рішення про підготовку технічної та проєктної документації для проведення комплексної термомодернізації. Першим етапом став енергоаудит, виконаний у межах проєктів модернізації окремих інженерних систем. У результаті енергоаудиту були виявлені основні зони втрати тепла та елементи будівлі, які потребують невідкладного вдосконалення.

Розрахунковий тепловий режим для розглянутого місця розташування

Параметр	Значення	Одиниці
Розрахункова температура зовнішнього повітря	-22,0	°С
Температура повітря в приміщенні (використовувані приміщення)	20,0	°С
Температура повітря в приміщенні (сходові клітки)	16,0	°С
Температура повітря в приміщенні (підвал)	12,0	°С
Градус днів нагріву – зовнішні перегородки (20,0 °С)	4538,3	К·д
Градус днів нагріву – зовнішні перегородки (16,0 °С)	3078,3	К·д

Основними заходами, запропонованими в документації, стали:

- модернізація та утеплення зовнішніх огорожувальних конструкцій будівлі;
- заміна застарілих вікон та зовнішніх дверей на енергоефективні аналоги;
- модернізація системи центрального опалення;
- впровадження енергоефективних рішень для системи гарячого водопостачання із застосуванням відновлюваних джерел енергії.

Енергетичний аудит. Зовнішні перегородки будівлі, включаючи стіни нижче та вище рівня землі, а також вентиляційні покрівлі, не утеплені й не відповідають чинним технічним умовам ДСТУ 9190:2022. Вікна та зовнішні двері також не відповідають вимогам ДСТУ 9190:2022 і потребують заміни на нові з покращеними коефіцієнтами теплопередачі.

Основні елементи, які потребують вдосконалення:

Зовнішні стіни (підземні та надземні): для зменшення теплових втрат через зовнішні огорожувальні конструкції рекомендовано додаткове утеплення.

Вентильована покрівля: з метою обмеження теплових втрат рекомендовано її додаткове утеплення.

Вікна та зовнішні двері: доцільно замінити на герметичні з коефіцієнтом теплопередачі U , що відповідає вимогам ДСТУ 9190:2022.

Модернізація джерела тепла: гібридна система опалення, що включає існуючу конденсаційну масляну котельню потужністю 230 кВт; додаткове встановлення компресорних реверсивних повітряно-водяних теплових насосів; модернізація системи центрального опалення із заміною радіаторів (температурний режим 55/45 °С) та встановленням термостатичних вентилів (210 шт.); встановлення лічильника тепла.

Фотоелектрична установка: запланована потужність близько 41,40 кВт (92 панелі по 450 Вт) для забезпечення живлення компресорних теплових насосів системи центрального опалення та електронагрівачів у системі гарячого водопостачання.

Освітлювальна система: заміна внутрішніх, зовнішніх та аварійних джерел світла на енергозберігаючі (наприклад, світлодіодні лампи, 243 одиниці); модернізація внутрішньої електроустановки; реконструкція системи блискавкозахисту.

Модернізація зовнішніх огорожувальних конструкцій

На наступному етапі виконано оцінку економічної ефективності заходів, спрямованих на зниження тепловтрат через зовнішні огорожувальні конструкції та підвищення енергоефективності будівлі.

Заплановані заходи термомодернізації включають:

1. Ізоляція стін:

- підземні стіни утеплюються теплоізоляційним матеріалом із коефіцієнтом теплопровідності $\lambda = 0,032 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ і товщиною не менше 10 см;

- наземні стіни утеплюються тим самим матеріалом товщиною не менше 15 см.

2. Ізоляція основи: основу вентиляованої конструкції ізолюють теплоізоляційним матеріалом із $\lambda = 0,038 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ і товщиною не менше 25 см.

3. Заміна конструктивних елементів:

- 235 склопакетів із коефіцієнтом теплопередачі $U \leq 0,9 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$;

- 16 зовнішніх дверей із коефіцієнтом теплопередачі $U \leq 1,3 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$.

- Модернізація системи тепlopостачання: встановлення гібридної системи центрального опалення, що включає:

- конденсаційну масляну котельню потужністю 230 кВт;

- реверсивний тепловий насос «повітря-вода» потужністю 160 кВт;

- буферну ємність об'ємом 1000 дм³;

- бак гарячої води об'ємом 600 дм³»;

- автоматизація та контроль системи»;

- заміну 210 радіаторів із параметрами 55/45 °С, встановлення термостатичних вентилів і лічильника тепла.

4. Встановлення фотоелектричної установки: монтаж системи потужністю близько 41,4 кВт (92 модулі по 450 Вт) для забезпечення живлення компресорних теплових насосів і електричних нагрівачів у системі гарячого водопостачання.

5. Модернізація освітлення та електроустановки:

- заміна 243 внутрішніх, зовнішніх та аварійних джерел світла на енергозберігаючі, зокрема світлодіодні;

- реконструкція системи блискавкозахисту та модернізація внутрішньої електроустановки.

Енерговитрати на опалення

Для оцінки енергетичних показників будівлі проведено розрахунки теплового споживання. Річне споживання тепла становить 3814,27 ГДж. У неопалювальний період (червень-серпень) тепло не споживається, тоді як у липні тепловитрати мінімальні – 125,87 ГДж, а в січні досягають максимуму – 514,58 ГДж. Найбільші щорічні теплові втрати зафіксовано через:

- зовнішні стіни – 1429,53 ГДж;
- вентильовану плоску покрівлю – 1390,25 ГДж.

Зазначені дані та енергетичний баланс будівлі дають змогу визначити елементи, що потребують модернізації, та оптимізувати конструктивні рішення. Аналіз дозволяє:

- виявити теплові мости та місця втрат енергії;
- розробити способи термомодернізації для підвищення ефективності систем опалення та гарячого водопостачання.

Оптимальні рішення щодо термомодернізації повинні відповідати технічним вимогам до будівель, зокрема встановленим нормативам коефіцієнтів теплопередачі для зовнішніх огорожувальних конструкцій. Крім того, необхідно враховувати можливість впровадження відновлюваних джерел енергії для підвищення енергоефективності будівлі.

Після реалізації теплоізоляційних заходів для зовнішніх огорожувальних конструкцій річна потреба в теплі знизилася до 1018,51 ГДж. Споживання тепла варіювалося протягом опалювального періоду (з вересня по травень) від мінімального значення 34,04 ГДж у липні до максимального – 137,10 ГДж у січні.

Ці результати свідчать про суттєве підвищення енергоефективності будівлі після впровадження теплоізоляції.

Підвищення енергоефективності

Визначення енергетичної ефективності будівлі ґрунтується на аналізі трьох ключових показників: первинного енергоспоживання (EP), корисного енергоспоживання (EU) та кінцевого енергоспоживання (EK). Ці показники дозволяють точно оцінити енергоефективність будівлі шляхом розрахунку відповідних коефіцієнтів енергетичної потреби.

Під час обчислення річної кінцевої потреби в енергії необхідно враховувати, що цей показник визначається як співвідношення корисної енергетичної потреби, яка базується на тепловому балансі будівлі, до середньої сезонної ефективності системи опалення. Розрахунки спрямовані на визначення потреби в енергії для опалення, і вони представлені у формулі (3.1):

$$Q_{K,H} = \frac{Q_{H,nd}}{\eta_{H,tot}}, \text{ кВт/рік} \quad (3.1)$$

де $Q_{H,nd}$ – потрібна кількість корисної енергії для опалення будівлі;

$\eta_{H,tot}$ – середній сезонний коефіцієнт ефективності системи опалення.

Важливим елементом, який враховується, окрім енергії, необхідної для обігріву будівлі, є енергія, що використовується для приготування гарячої води для побутових потреб. Потребу в цій енергії визначають за формулою (3.2):

$$Q_{K,W} = \frac{Q_{W,nd}}{\eta_{W,tot}}, \text{ кВт/рік} \quad (3.2)$$

де $Q_{W,nd}$ – потреба в енергії для приготування гарячої води;

$\eta_{W,tot}$ – середній річний коефіцієнт ефективності пристроїв для підготовки гарячої води.

Наведені вище рівняння дають змогу визначити кінцевий коефіцієнт енергії (EK), до складу якого вони входять. Для аудитора та користувача важливо, щоб коефіцієнти EK , EU і EP були подані як кількість кіловат, необхідних для обігріву одного квадратного метра площі будівлі за рік. Методика розрахунку необхідної кінцевої енергії (EK) для забезпечення потреб будівлі наведена у наступному рівнянні:

$$EK = \frac{Q_{K,H} + Q_{K,W}}{A_f}, \text{ кВт/рік} \cdot \text{м}^2 \quad (3.3)$$

де A_f – площа опалюваного або охолоджуваного приміщення з заданою температурою [м^2].

Коефіцієнт потреби в первинній енергії розраховується на основі річних потреб в енергії для опалення, приготування гарячої води для побутових потреб, а також, за потреби, для охолодження, вентиляції приміщень та освітлення в окремих випадках. Зазначений коефіцієнт EP обчислюється за такою залежністю:

$$EP = \frac{Q_P}{A_f}, \text{ кВт/рік} \cdot \text{м}^2 \quad (3.4)$$

де Q_P – річна потреба в первинній енергії [кВт·год/рік].

Річна потреба в первинній енергії розраховується за формулою (3.5):

$$Q_P = Q_{P,H} + Q_{P,W} + Q_{P,C} + Q_{P,L}, \text{ кВт/рік} \quad (3.5)$$

де $Q_{P,H}$ – річна потреба в первинній енергії для опалення;

$Q_{P,W}$ – річна потреба в первинній енергії для підготовки гарячої води;

$Q_{P,C}$ – річна потреба в первинній енергії для охолодження;

$Q_{P,L}$ – річна потреба в первинній енергії для освітлення.

Висновок: якісно виконана термомодернізація об'єкта включає низку важливих елементів. Основою є утеплення будівлі, що охоплює зовнішні стіни, покрівлю (плоскі дахи), перекриття, а в разі можливості – також фундамент будівлі, зокрема фундаментні плити. Для цього застосовуються як традиційні матеріали, такі як мінеральна вата та пінополістирол, так і більш сучасні варіанти, зокрема

напилювані пінополіуретани або плити екструдованого пінополістиролу. Щоб термомодернізація будівлі була ефективною, також необхідно замінити фасадні та мансардні вікна, зовнішні двері та гаражні ворота на варіанти з низьким коефіцієнтом теплопровідності, якщо це обґрунтовано. Вікна повинні бути трисклепленими та оснащеними покриттям, що перешкоджає проникненню інфрачервоного випромінювання. Це дозволить знизити втрати тепла в зимовий період і обмежить обігрів будинку через вікна в літній період.

Енергоефективність є критично важливою для досягнення кліматичних цілей ЄС. Зниження енергоспоживання допомагає не тільки зменшити викиди парникових газів, але й є реальним джерелом економії. Понад 70% енергії, що споживається в будівлях, йде на опалення, тому важливо звернути увагу на герметичність дверей та вікон, а також товщину стін. Однак важливо пам'ятати, що ці заходи не повинні здійснюватися за рахунок комфорту чи вентиляції. Економія енергії повинна базуватися на її раціональному використанні, а не на відмові від базових зручностей, таких як тепло, освітлення чи приготування їжі.

Потреба в підвищенні енергоефективності спричинена зростаючим споживанням енергії, зміною клімату та зростанням попиту на енергозберігаючі технології. Соціальні та екологічні зміни знаходять відображення у нормативних актах та національних стандартах.

Відмінності в рівнях до і після термомодернізації, а також відсоткова економія, наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Зведений перелік показників енергетичної ефективності для стану після модернізації будівлі

Оцінка енергетичних характеристик будівлі		
Індекс енергетичної ефективності	Відмінності в групі до і після термомодернізації	Відсоткове збереження окремих показників
Річний показник потреби в корисній енергії	$EU = 174,2$ [кВт/м ² ·рік]	66,90 [%]
Річний кінцевий показник потреби в енергії	$EK = 362,4$ [кВт/м ² ·рік]	79,91 [%]
Щорічна потреба в невідновлюваній первинній енергії	$EP = 490,4$ [кВт/м ² ·рік]	85,32 [%]
Питома кількість CO ₂ викидів	$E_{CO_2} = 0,116$ [MgCO ₂ /м ² ·рік]	73,89 [%]
Індикатор потреби в теплі для опалення	$Q_{H,nd} = 2795,76$ [ГДж]	72,30 [%]

З наведеної таблиці можна зробити висновок, що завдяки термомодернізації зовнішніх перегородок – найбільш чутливих та негерметичних частин будівлі,

зокрема зовнішніх стін, що виходять на землю, а також вентиляованого даху, разом з використанням відновлюваних джерел енергії, таких як теплові насоси та фотоелектричні установки, вдалося заощадити 72,30% теплової енергії в будівлі. Це безпосередньо призводить до зниження експлуатаційних витрат будівлі. Покращення показників енергоефективності варіюється від 66% для корисної енергії до майже 85% для невідновлюваної первинної енергії. Крім того, зменшення енергоспоживання в будівлі на 74% також призводить до значного зменшення викидів CO₂ .

Індивідуальне завдання

1. Проаналізувати початковий стан будівлі школи на основі наведених даних: втрати тепла, стан зовнішніх конструкцій, систем опалення та освітлення.
2. Визначити основні джерела тепловтрат.
3. Запропонувати способи утеплення стін, покрівлі та підвалу.
4. Розробити рекомендації щодо заміни вікон і дверей для зменшення тепловтрат.
5. Запропонувати гібридну систему опалення, яка включає: існуючі котли; повітряно-водяні теплові насоси.
6. Розрахувати необхідну потужність фотоелектричної установки для забезпечення енергоспоживання школи.
7. Визначити показники енергоспоживання до та після модернізації: корисну енергію; кінцеву енергію; первинну енергію.
8. Розрахувати економію енергії та зменшення викидів CO₂ .
9. Проаналізувати економічну доцільність заходів модернізації.
10. Провести дискусію щодо вибору найбільш ефективних заходів термомодернізації для будівлі школи на основі енергетичного аудиту та аналізу результатів, наведених у прикладі (заміна вікон, утеплення стін, модернізація опалення).
11. Обговорити потенціал використання відновлюваних джерел енергії для цієї школи, зокрема:
 - використання фотоелектричних панелей для живлення теплових насосів та системи гарячого водопостачання.
 - можливості використання теплових насосів і їх ефективність при низьких температурах.

Контрольні запитання

1. Що таке енергоефективність і які її основні переваги у контексті зменшення впливу зміни клімату?
2. Які основні заходи включає термомодернізація будівель, і як вони сприяють підвищенню енергоефективності?
3. Як використання відновлюваних джерел енергії сприяє скороченню викидів парникових газів і зменшенню залежності від викопного палива?
4. Чому більшість будівель, побудованих до введення сучасних стандартів енергоефективності, потребують термомодернізації, і які основні недоліки цих будівель?

ВИМОГИ ДО ФОРМАТУВАННЯ ТЕКСТОВОЇ ЧАСТИНИ ЗВІТУ

Підготовка практичних робіт здійснюється в текстовому редакторі MS WORD з урахуванням наступних вимог:

- поля документа: ліве 3 см, праве, верхнє та нижнє - 1,5 см;
- шрифт: TNR, 14 пт.; міжрядковий інтервал - 1,5;
- вирівнювання: по центру без відступу (для заголовків), по ширині з відступом 1,25 см (для основного тексту);
- розстановка переносів відсутня;
- нумерація сторінок починаючи з другої сторінки документа (не встановлюється на титульній сторінці файлу).

Структура звіту до практичної роботи повинна включати:

1. Титульна сторінка.
2. Представлений розв'язок задач згідно свого варіанту.
3. Відповіді на контрольні запитання.

При змішаній/дистанційній формі навчання звіт надається в електронному вигляді на платформі дистанційного навчання, обраній університетом, з можливістю верифікації здобувача та викладача.

Назва файлу, який надається на перевірку повинна містити прізвище студента з ініціалами, назву академічної групи, скорочену назву дисципліни, вид та номер завдання, наприклад: *Іваненко М.Д. _ІТП-21_ОЕ_ПЗ1.*

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Яковшина Т.Ф.* Адаптація ЄС до змін клімату та стійкі урбоєкосистеми: навчальний посібник. – Дніпро: ПДАБА. 2023. – 109 с.
2. *Іванюта С.П.* Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації / С.П. Іванюта, О.О. Коломієць, Л.М. Якушенко. – К.: НІСД, 2020. – 110 с.
3. *Казанцев Т.* Адаптація до змін клімату: Зелені зони міст на варті прохолоди / Т. Казанцев, О. Халаїм, О. Василюк, В. Філіпович. – К., 2016. – 40 с.
4. *Кліматичні ризики функціонування галузей економіки України в умовах зміни клімату: колект. монографія / С.М. Степаненко та ін.* – Одеса: ТЕС, 2018. – 546 с.
5. *Шевченко О.* Оцінка вразливості до зміни клімату: Україна: наук.-метод. дослідження / О. Шевченко, О. Власюк, І. Ставчук, М. Ваколюк, М. Ілляш, А. Рожкова. – К.: НЕЦУ, 2014. – 72 с.
6. *Чала В.С.* Європейські практики інвестування зеленого будівництва: підручник / В.С. Чала, Ю.В. Орловська, А.В. Глущенко. – Д.: ПДАБА. 2023. – 148 с.
7. *Причини та наслідки зміни клімату. Міжнародна кліматична політика / Р.В. Бойченко // Науковий простір: актуальні питання, досягнення та інновації.* – Випуск 1. – 2022. – С. 595 – 597.
8. *Оцінка екологічного життєвого циклу будівельної продукції / О.Г. Лялюк О.Г. Ратушняк // Сучасні технології будівництва.* – 2014. – Вип. 16. – С. 136–140.
9. *CMIP6 Climate Models Imply High Committed Warming / С. Huntingford, M.S. Williamson, F.J.M.M. Nijssse // Climatic Change.* – 2020. – V. 62. – P. 1515–1520.
10. *Using BIM and LCA to Calculate the Life Cycle Carbon Emissions of Inpatient Building: A Case Study in China / L. Zhao, C. Guo, L. Chen, L. Qiu, W. Wu, Q. Wang // Sustainability.* – 2024. – V.16. P. 5341.
11. *Building a Life Cycle Carbon Emission Estimation Model Based on an Early Design: 68 Case Studies from China / C. Guo, X. Zhang, L. Zhao, W. Wu, H. Zhou, Q. Wang // Sustainability.* – 2024. V. 16. P. 744.
12. *Embodied, Operation, and Commuting Emissions: A Case Study Comparing the Carbon Hotspots of an Educational Building / A.E. Fenner, C.J. Kibert, J. Li, M.A. Razkenari, H. Hakim, X. Lu, M. Kouhirostami, M. Sam // Journal of Cleaner Production.* – 2020. – V. 268. P. 122081.
13. *Видання. Екологічне управління. Оцінювання життєвого циклу. Принципи та структура: ДСТУ ISO 14040:2013 (ISO 14040:2006, IDT).* – [Чинний від 2014-07-01]. – Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. – 22 с. (Національний стандарт України).
14. *Видання. ДСТУ 9190:2022 Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання.* – [Чинний від 2023-03-01]. – Київ: Технічний комітет стандартизації ТК 302 «Енергоефективність будівель і споруд», 2022. (Національний стандарт України).

ІНТЕРНЕТ

РЕСУРСИ

1. *Національна бібліотека імені В.І. Вернадського* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.nbuv.gov.ua/node/512> (дата звернення: 08.01.2025). – Назва з екрана.

2. *Репозитарій КНУБА* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://repository.knuba.edu.ua/> (дата звернення: 08.01.2025). – Назва з екрана.

3. *Аналіз життєвого циклу каркасів будівель комерційного призначення* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uscc.ua/analiz-zhittvogo-tsiklu-karkasiv-budivel-komertsijnogo-priznachennya> (дата звернення: 08.01.2025). – Назва з екрана.

4. *Інтерактивний атлас клімату Коперника* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://atlas.climate.copernicus.eu/atlas> (дата звернення: 08.01.2025). – Назва з екрана.

Навчально-методичне видання

ОЦІНКА КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН ТА ВУГЛЕЦЕВОГО СЛІДУ В БУДІВЕЛЬНІЙ ГАЛУЗІ

Методичні вказівки
до виконання практичних робіт
з дисципліни «Основи екології»
для здобувачів першого (бакалаврського)
рівня вищої освіти всіх спеціальностей

Укладачі: **Кравченко** Марина Василівна,
Ткаченко Тетяна Миколаївна,
Василенко Леся Олексіївна

Комп'ютерне верстання *А. П. Селівестрової*

Ум. друк. арк. 2,09. Обл.-вид. арк. 2,25
Електронний документ. Вид № 19/V-25.

Виконавець і виготовлювач
Київський національний університет будівництва і архітектури
Проспект Повітряних Сил, 31, Київ, Україна, 03680

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи ДК № 808 від 13.02.2002 р