

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БУЯК НАДІЯ АНДРІЙВНА

УДК 620.98: 658.24

(індекс)

ДИСЕРТАЦІЯ

**ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ БУДІВЛІ В
УМОВАХ ТЕПЛОВОГО КОМФОРТУ**

05.14.01 – Енергетичні системи та комплекси
технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник : Дешко Валерій Іванович д. т. н., проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Київ – 2017

АНОТАЦІЯ

Буяк Н. А. Енергоефективність системи «джерело теплоти – людина – огорожувальні конструкції будівлі». – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.01 – Енергетичні системи та комплекси. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти та науки, молоді та спорту України, 2017.

Дисертація присвячена розвитку методичних аспектів, методів та моделей урахування впливу параметрів, що залежать від будівлі під час проектування, експлуатації та модернізації складної системи «джерело теплоти – людина – огорожувальні конструкції будівлі»; розвитку досліджень щодо вибору джерела теплоти в комплексі з тепловим захистом огорожень. Проведений аналіз нормативної бази щодо енергоефективності будівель та мікроклімату, обумовив необхідність врахування моделі людини при визначенні потреби на опалення та проектуванні будівель.

Розроблено методику вибору джерела теплоти в комплексі з огорожувальними конструкціями будівлі на базі функції інтегральної вартості, що дозволяє враховувати зміну вартості енергоносіїв та грошей у часі. Розроблені енергетичні, ексергетичні та ексергоекономічні показники, що дозволяють оцінювати енергоефективність системи джерело теплоти – огорожувальні конструкції.

Аналіз моделей теплового комфорту людини обумовив необхідність створення комп'ютерної моделі, що ґрунтується на ексергетичній концепції та дозволяє оцінювати енергетичні показники теплового комфорту, а саме *PMV* та *PPD*. На базі якої розроблено регресійну модель для визначення комфортної температури повітря у кімнаті, що дозволить забезпечувати мікроклімат у приміщенні відповідно до ексергетичної концепції.

Створено модель для аналізу показників енергоефективності системи «джерело теплоти – людина – огорожувальні конструкції» та визначена потреба на опалення в залежності від параметрів будівлі та людини.

Результати передано до використання в ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» для розробки норм, щодо ефективного використання енергії в будівлях, в центр ресурсоефективного та чистого виробництва для техніко-економічного обґрунтування вибору джерела теплоти, а також у навчальному процесі Національного технічного університету України КПІ імені Ігоря Сікорського на кафедрі теплотехніки та енергозбереження. Отримано акти впровадження результатів роботи та свідоцтва авторського права на методики.

Ключові слова: джерело теплоти, потреба на опалення, комфортна температура повітря, радіаційна температура, ексергія, чиста приведена вартість.

ABSTRACT

Buyak N. A. Energy efficiency of the system "heat source – human – building envelope". – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.14.01 – Power systems and complexes. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ministry of Education and Science, Youth and Sports of Ukraine, 2017.

The dissertation is devoted to the development of methodical aspects, methods and models of taking into account the influence of parameters dependent on the building during the design, operation and modernization of a complex "heat source – human – building envelope", development of research on the choice of a source of heat in a complex with building envelope. The analysis of the regulatory framework for energy efficiency of buildings and microclimate has led to the need to take into account the model of a person in determining the needs for heating and designing buildings.

The method of choosing a heat source in a complex with building envelope based on the integrated value function is developed, which allows taking into account the change in the cost of energy and money in time. Energy, exergy and exergo-economic

indicators have been developed, which allow to estimate energy efficiency of the system “heat source – building envelope”.

The analysis of models of human thermal comfort has caused the necessity of creating a computer model based on the exergy concept and allowing to estimate energy indicators of thermal comfort, namely *PMV* and *PPD*. On the basis of which developed a regression model for determining the comfortable temperature of air in the room, which will allow to provide the microclimate in the room in accordance with the exergy concept.

A model was developed for the analysis of the energy efficiency indicators of the "heat source – human – building envelope" system and the building heating need was determined depending on the parameters of the building and the person.

The results were submitted for use in the State Enterprise "State Research Institute of Building Structures" for the development of norms regarding the efficient use of energy in buildings, in the center of resource-efficient and clean production for the feasibility study of the choice of a source of heat, as well as in the educational process of National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” at the Department of Heating Engineering and Energy Saving. Acquisition of the results of work and certificates of copyright in the methodology are received.

Key words: heat source, need for heating, comfortable air temperature, radiation temperature, exergy, net present value.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Праховник А.В., Дешко В.І., Закладний О.М., Шовкалюк М.М., Буяк Н.А. та ін. Практичний посібник з енергозбереження для об’єктів промисловості, будівництва та житлово-комунального господарства. Луганськ: «Місячне сяйво», 2010. 696 с. **(колективна монографія)**. Автор розробила методику вибору джерела теплоти та огорожувальних конструкцій із врахуванням зміни вартості енергоносіїв та грошей у часі.

2. Deshko V.I., Buyak N.A. A model of human thermal comfort for analyzing the energy performance of buildings. *Eastern European journal of enterprise technologies*, 2016. V. 4/8 (82). P. 42–47. ISSN 1813-5420. **(фахове видання, включене до бази**

даних **Scopus**, **Index Copernicus** та ін). Автор розробила комп'ютерну модель теплового комфорту людини та порівняла існуючі моделі.

3. Buyak N.A., Deshko V.I., Sukhodub I.O. Buildings energy use and human thermal comfort according to energy and exergy approach. *Energy and buildings*, 2017. Vol.146. P. 172–181. **(іноземне видання)**. Автору належать розробка алгоритму визначення комфортної температури в приміщенні та оцінка чутливості потреби на опалення до параметрів, що залежать від людини та будівлі.

4. Deshko V.I., Buyak N.A. Building heat source choice using exergoeconomic approach. *Energy, energy saving and rational nature use*, 2017. P. 50–60. **(іноземне видання)**. Автору належить розробка методики вибору джерела теплоти в комплексі з огороженнями на базі ексергоекономічного підходу.

5. Дешко В.І., Буяк Н.А. Вплив теплового захисту будівлі на показники теплового комфорту. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2015. №153. С.121–128. ISSN 1994-7852. **(фахове видання, включене до бази даних Index Copernicus)**. Автор провела оцінку впливу термічного опору огорожувальних конструкцій на показники теплового комфорту.

6. Дешко В.І., Буяк Н.А., Білоус І.Ю. Вибір теплового захисту та джерела тепла із врахуванням комфортних умов у будівлі. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. Серія: Технічні науки, 2015. № 5. С. 71–80. **(фахове видання, включене до бази даних Ulrich's Periodical Directory)**. Автор розробила комп'ютерну модель для вибору джерела теплоти в комплексі з огорожувальними конструкціями, що враховує комфортні умови.

7. Дешко В.І., Буяк Н.А. Комфортні умови у приміщенні з урахуванням впливу сонячної радіації. *Збірник наукових праць: галузеве машинобудування, будівництво*, 2016. №1. С. 197–204. ISSN 2409-9074. **(фахове видання, включене до бази даних Index Copernicus та Ulrich's Periodical Directory)**. Автор розробила моделі розрахунку середньої радіаційної температури.

8. Дешко В.І., Буяк Н.А. Показники опалення будівель і температурні умови комфортності. *Промислова теплотехніка*, 2010. №1(32). С. 66–70. ISSN 0204-

3602. **(фахове видання)**. Автором розроблена модель розрахунку середньої радіаційної температури та визначена комфортна температура повітря.

9. Дешко В.І., Буяк Н.А., Долгополов І.С, Тучин В.Т. Енерго- і ексергоефективність систем теплопостачання будівлі. *Енергетика, економіка, технології, екологія*, 2009. №2. С.32–41. ISSN 1813-5420. **(фахове видання)**. Автору належать розробка та аналіз енергетичних та ексергетичних показників енергоефективності ДК.

10. Дешко В.І., Буяк Н.А. Вплив глибини розрахунку на сукупні інтегровані витрати теплової ізоляції будівлі та джерела теплоти. „Вісник СумДУ”. Серія: Технічні науки, 2009. №4. С. 211–217. **(фахове видання)**. Автором оцінено вплив глибини розрахунку на функцію інтегральної вартості.

11. Дешко В.І., Буяк Н.А. Економічно доцільний тепловий захист будівлі з різними джерелами теплоти. *Наукові вісті Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”*, 2009. №3. С. 74–81. – ISSN 1810-0546. **(фахове видання)**. Автором запропоновано функцію інтегральної вартості для визначення оптимального термічного опору огорожувальних конструкцій.

12. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір «Економічно доцільний тепловий захист будівлі з різними джерелами теплоти» / В.І. Дешко, Н.А. Буяк, М.М. Шовкалюк. – № 69784; заявл. 11.11.2016; зареєстр. 16.01.2017. Автору належить розробка методики вибору джерела теплоти в комплексі з огорожувальними конструкціями.

13. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір «Моделі теплового комфорту та енергоспоживання будівлі» / В.І. Дешко, Н.А. Буяк, І.О. Суходуб. – № 69785; заявл. 11.11.2016; зареєстр. 16.01.2017. Автор розробила модель для аналізу показників енергоефективності системи ДЛК.

14. Дешко В.І., Буяк Н.А. Вплив приладів опалення на енергоефективність будинків. *Вісник Харківського національного університету сільського господарства імені Петра Василенка: праці міжнар. наук.-практ. конф., (8-9 жовтня 2009 р.)*, 2009. №87. С. 10–12. ISSN 5-7987-0176X. Здобувачеві належить оцінка впливу опалювальних приладів на потребу на опалення будівлі.

15. Дешко В.И., Буяк Н.А. Влияние комфортных условий на интегрированную стоимость отопления. *Промышленная теплотехника*, 2009. №7(31). С. 63–64. ISSN 0204-3602. *Автор оцінила вплив опалювальних приладів на інтегральну вартість системи ДК.*

16. Дешко В.І., Буяк Н.А. Вплив життєвого циклу проекту на економічно доцільний тепловий захист будівлі з різними джерелами: матеріали V Міжнародної ювілейної науково-практичної конференції «Екологія. Економіка. Енергозбереження». Суми: Вид-во «СумДУ», 2009. С. 76–78. *Автор оцінила вплив життєвого циклу проекту на інтегровану вартість системи ДК.*

17. Дешко В.І., Буяк Н.А. Моделирование влияния солнечной та теплової радіації на комфортну температуру у приміщенні. Проблеми і перспективи розвитку академічної та університетської науки: збірник наукових праць за матеріалами VII Всеукраїнської науково-практичної конференції (8 – 11 груд. 2015 р., м. Полтава). Полтава: ПолтНТУ, 2015. С. 3–6. *Автор оцінила вплив надходження сонячного випромінювання на середню радіаційну температуру.*

18. Дешко В.І., Буяк Н.А. Аналіз споживання енергії в комплексі джерело тепла-людина-огороджуючі конструкції. IX МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ПРОБЛЕМИ ПРОМИСЛОВОЇ ТЕПЛОТЕХНІКИ» (20 – 23 жовтня 2015 р., м. Київ). Київ: Національна академія наук України, Інститут технічної теплофізики, 2015. С. 109–110. *Автором проаналізовано зміну енергоспоживання будівлі із врахуванням комфортних умов.*

19. Дешко В.І., Буяк Н.А., Іщенко К.В. Економічно доцільний вибір джерела теплоти для гуртожитка. Матеріали науково-технічної конференції Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський Політехнічний Інститут» ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА. Київ: НТУУ «КПІ», ІЕЕ, 2012. С. 433–442. *Автор розробила модель та проаналізувала результати щодо економічного доцільного джерела теплоти.*

20. Дешко В.І., Буяк Н.А. Ексергетична модель теплового комфорту людини в зимовий період. Матеріали науково-технічної конференції Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України

«Київський Політехнічний Інститут» ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА. Київ: НТУУ «КПІ», ІЕЕ, 2016. С. 89–96. *Автору належить аналіз та порівняння складових ексергетичного балансу людини для зимового та літнього періоду.*

21. Буяк Н.А, Іщенко К. Оцінка енергоефективності гуртожитку на основі ексергетичних показників. Матеріали XII Всеукраїнської студентської науково-технічної конференції „Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання“ (19-20 квітня 2011 року). Тернопіль: ТНТУ, 2011. Том 1. С. 237. *Автор розробила ексергетичні показники та застосувала їх для оцінки енергоефективності гуртожитку.*

22. Буяк Н. Вплив характеристик теплового захисту та джерела тепла на функцію інтегрованих витрат. Матеріали X Всеукраїнської студентської науково-технічної конференції „Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання“ (23-24 квітня 2009 року). Тернопіль : ТДТУ, 2009. Том 1. С. 220. *Автором проаналізовано чутливість функції інтегральної вартості до характеристик теплового захисту та джерела теплоти.*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	12
ВСТУП.....	13
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТА ШЛЯХИ ПОДАЛЬШОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ «ДЖЕРЕЛО ТЕПЛОТИ – ЛЮДИНА – ОГОРОДЖУВАЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ»	19
1.1. Споживання енергії та енергоефективність будівель	19
1.2. Основні напрямки розвитку комплексного підходу до розгляду будівлі як складної енергетичної системи.....	24
1.3. Розвиток ексергетичного підходу як методу для комплексного аналізу будівлі.....	27
1.4. Ексергоекономічний аналіз та його застосування для підвищення енергоефективності будівлі як складної системи	37
1.5. Підвищення вимог до енергоефективності в рамках забезпечення комфортних умов у приміщенні.....	39
1.6. Розвиток моделей теплового комфорту людини	42
Висновки до розділу	50
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОГО, ЕНЕРГЕТИЧНОГО ТА ЕКСЕРГЕТИЧНОГО АНАЛІЗУ СИСТЕМИ «ДЖЕРЕЛО ТЕПЛОТИ – ЛЮДИНА – ОГОРОДЖУВАЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ»	52
2.1. Аргументація використання функції інтегральної вартості для сумісного вибору джерела теплоти та огорожувальних конструкцій будівлі.....	52
2.2. Особливості застосування теорії нечітких множин для врахування невизначеності щодо вартості енергоносіїв	60
2.3. Методика аналізу потоків енергії та ексергії для системи «джерело теплоти – огорожувальні конструкції будівлі»	62
2.4. Енергетична та ексергетична модель теплового комфорту людини для аналізу енергетичних характеристик будівлі	70

2.5. Алгоритм розрахунку комфортної температури відповідно до ексергетичного підходу	81
2.6. Методика розрахунку середньої радіаційної температури	82
2.7. Ексергоекономічний аналіз та ексергоекономічні показники	87
Висновки до розділу	90
РОЗДІЛ 3. ІНТЕГРАЛЬНА ВАРТІСТЬ СИСТЕМИ «ДЖЕРЕЛО ТЕПЛОТИ – ОГОРОДЖУВАЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ»	92
3.1. Характеристики моделі дослідження	92
3.2. Ретроспективний аналіз зміни цін на енергоносії	94
3.3. Обґрунтування вибору ставки дисконтування	99
3.4. Вибір економічно доцільного теплового захисту будівлі з різними джерелами теплоти	99
3.5. Аналіз впливу глибини розрахунку на сукупні інтегральні витрати теплової ізоляції будівлі та джерела теплоти	107
3.6. Вплив приладів опалення на енергоефективність будинків	111
3.7. Вибір теплового захисту та джерела теплоти із врахуванням комфортних умов у будівлі	115
Висновки до розділу	124
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ СКЛАДНОЇ СИСТЕМИ «ДЖЕРЕЛО ТЕПЛОТИ – ЛЮДИНА – ОГОРОДЖУВАЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ»	126
4.1. Опис віртуальної моделі людини та параметрів довкілля	126
4.2. Вплив теплового захисту будівлі на показники теплового комфорту	127
4.3. Комфортні умови у приміщенні з урахуванням впливу надходження сонячної радіації	131
4.4. Аналіз потоків енергії / ексергії у ланцюгу джерело теплоти – огорожувальні конструкції будівлі	135
4.5. Порівняння енергетичної та ексергетичної моделей теплового комфорту людини та апробація ексергетичної моделі теплового комфорту	142

4.6. Чисельний експеримент та створення регресійної моделі для визначення комфортної температури відповідно до енергетичного та ексергетичного підходів	149
4.7. Аналізування впливу термомодернізації будівлі на зміну умов комфортності, параметрів мікроклімату та потреби на опалення будівлі	154
4.8. Алгоритм інтегрування розрахунків моделі людини у складну модель «джерело теплоти – огорожувальні конструкції»	157
4.9. Моделювання факторів впливу на потребу на опалення при застосуванні енергетичної та ексергетичної концепції щодо забезпечення комфортних умов	158
4.10. Оцінка впливу параметрів теплового комфорту на споживання первинного палива	162
4.10. Ексергоекономічні критерії для комплексного вибору джерела теплоти та огорожувальних конструкцій будівлі.....	164
Висновки до розділу	167
ВИСНОВКИ	170
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	172
Додаток А	189
Додаток Б.....	190
Додаток В	197
Додаток Д	203
Додаток Е.....	204
Додаток Ж.....	210

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

EN – Європейські норми;

PMV – прогнозована середня оцінка тепловідчуттів людини;

PPD – прогнозований процент незадоволених тепловим середовищем;

ДБН – Державні будівельні норми;

ДК – джерело тепла – огорожувальні конструкції;

ДЛК – джерело тепла – людина – огорожувальні конструкції;

ДСТУ – Державний стандарт України;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

КПІ – Київський політехнічний інститут;

НМ – нечітка множина;

ОП – опалювальний прилад;

Пд – південь;

ПЕР – паливно-енергетичні ресурси;

СНіП – будівельні норми і правила;

США – Сполучені Штати Америки;

ТНУ – теплова насосна установка;

ФН – функція належності;

ЧДП – чистий дисконтований прибуток.

ВСТУП

Актуальність теми. Близько 40 % світового енергоспоживання та 1/3 викидів парникових газів припадає на будівлі [1]. Саме тому в межах адаптації українських стандартів до міжнародних зростають вимоги щодо ефективного використання енергії будівлями [2–4]. Підвищення енергоефективності будівель можливе за рахунок сукупності заходів, направлених на теплозахисну оболонку будівлі, систему опалення та джерело теплоти. Тож це питання потребує комплексного вирішення, враховуючи і обмеження, обумовлені вимогами до якості мікроклімату у приміщенні. Висока якість мікроклімату у приміщеннях регламентована сучасними стандартами та показниками [5–8]. У цій ситуації актуальним є досягнення компромісу між зниженням енергоспоживання будівель та забезпеченням належного рівня теплового комфорту.

Ефективність використання теплової енергії в будівлях оцінюють за енергетичними показниками, які більшою мірою залежать від конструктивних параметрів огорожувальних конструкцій. Водночас варто вводити в енергетичний паспорт будівлі параметри, які характеризують споживання первинного палива. Це дасть змогу порівняти споруди із різними системами опалення. Енергія – це величина, яку не потрібно зберігати, її не можливо зруйнувати, і вона не залежить від довколишнього середовища. Натомість ексергія та ексергетичний аналіз ґрунтуються на першому та другому законах термодинаміки і характеризують якість потоків енергії. Ексергетичний аналіз дозволяє оцінити споживання первинного палива не тільки кількісно, але й якісно, а також порівняти якісно не рівноцінні енергоресурси, які використовуються для опалення будівель, такі як: електрична енергія, газ, вугілля, деревина, солома. Застосування коефіцієнтів, що лежать в основі цього методу, поряд з іншими техніко-економічними показниками, дозволить розумно проектувати будинки, ефективно поєднуючи вибрану систему опалення із теплозахисними властивостями огорожувальних конструкцій. Із погляду ексергетичного аналізу,

потреба на опалення будівель є потребою низької якості, для задоволення якої використовують енергоресурси високої якості та електричну енергію. Саме тому проведено низку досліджень у напрямку ексергетичного аналізу будівель та енергетичних систем будівлі у працях іноземних дослідників A. Hepbsali, M. T. Balta, M. Shukuya, D. Schmidt, I. Dincer, G. Tsatsaronis, A. Bejan, C. Yucer. Ексергетичний аналіз людського тіла детально описано у дослідженнях M. Prek, M. Schweiker, M. Shukuya, K. Tokunaga, A. Simone. Значний внесок у розвиток ексергетичного аналізу зробили українські науковці В. Мартиновський, Т. Морозюк, В. Мазур, В. Нікульчин, Ю. Мацевитий, Е. Братута, Д. Харлампіді, В. Дешко, П. Куделя, А. Долінський, Б. Драганов, В. Лабай.

Методи оцінки та підвищення енергоефективності будівель стали об'єктом дослідження Ю. Табунщикова, М. Бродача, Н. Мхитаряна, Б. Драганова, В. Дешка, Г. Фаренюка, Н. Фіалко, В. Малярєнко, В. Гершковича та ін. Незважаючи на науковий досвід і досягнення в зазначеному напрямку, залишається не вирішеною проблема підвищення енерго- та ексерго-ефективності будівель у контексті покращення якості мікроклімату у приміщеннях. Це увиразнює актуальність нашого дослідження.

Таким чином, **наукова задача** дисертаційної роботи полягає у розробці та розвитку методів оцінки ефективності енергосистеми будівлі в умовах теплового комфорту.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконані в роботі дослідження відповідають напрямку «Енергетика та енергоефективність» Законам України «Про енергозбереження», «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки», «Про енергетичну ефективність будівель», направленості тематики науково-дослідної роботи (НДР) кафедри теплотехніки та енергозбереження Національного технічного університету України «Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського». Матеріали дисертаційної роботи використано під час виконання держбюджетних НДР: «Розробка комплексу науково-технічних рішень для створення системи енергоменеджменту закладів освіти МОН України» (№ держреєстрації 0115U000313); «Управління

енергоспоживанням об'єктів комунальної енергетики» (№ держреєстрації 0117U000469).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є підвищення ефективності енергетичної системи будівлі шляхом урахування взаємозв'язку джерел енергії, теплового захисту, показників теплового комфорту і параметрів мікроклімату приміщень. Реалізацію окресленої мети можна вирішити так:

- провести аналіз розроблених підходів до підвищення ефективності енергетичної системи будівлі в умовах теплового комфорту;

- визначити особливості та можливості енергетичного, ексергетичного та ексергоекономічного аналізу під час розгляду будівлі в комплексі з джерелом теплоти та із врахуванням обмежень щодо теплового комфорту людини;

- розробити комп'ютерну модель визначення умов теплового комфорту людини для комплексного аналізу складної системи «джерело теплоти – людина – огорожувальні конструкції» (ДЛК);

- обґрунтувати вибір функції для комплексного аналізу та вибору джерела теплоти та огорожувальних конструкцій;

- створити модель для аналізу показників енергоефективності системи та представити блок-схему інтегрування показників та параметрів теплового комфорту людини у складну систему «джерело теплоти – огорожувальні конструкції будівлі» (ДК).

Об'єкт дослідження – процеси перетворення енергії та ексергії у складній системі ДЛК.

Предмет дослідження – методи і показники оцінювання енергетичної та ексергетичної ефективності системи ДЛК.

Методи дослідження. Науково-методичну основу дослідження склали такі загальнонаукові та спеціальні методи: аналізу та синтезу, метод математичного моделювання, прогнозування, методи математичної статистики, прикладної термодинаміки.

Наукова новизна одержаних результатів Наукова новизна одержаних результатів – розвинуто підходи щодо аналізу енергетичної системи ДЛК для зменшення споживання енергії та ексергії будівлею за умови урахування показників комфортності:

- вперше запропоновано та обґрунтовано врахування зміни умов комфортності при термомодернізації будівель шляхом застосування моделі теплового комфорту та розрахунку середньої радіаційної температури приміщення, що дає змогу знизити температуру повітря у приміщенні, а відповідно і знизити енергоспоживання;

- створено математичну модель для аналізу показників енергоефективності системи ДЛК, яка у порівнянні з відомими дає змогу враховувати вплив стандартних параметрів теплового комфорту на споживання енергії по ланцюгу до первинного палива;

- створено регресійну модель для розрахунку температури повітря у кімнаті і на її основі визначено впливовість внутрішніх та зовнішніх факторів, що в кінцевому підсумку зробить можливим регулювання роботи систем тепlopостачання відповідно до умов комфортності;

- розвинуто метод визначення інтегральної експлуатаційної вартості та показників енергоефективності системи ДЛК, побудований на базі енергетичної та ексергоекономічної моделей, які на відміну від існуючих є динамічними (тобто дають змогу враховувати зміну вартості грошей та енергоносіїв в часі), що дозволяє враховувати вартісні та теплотехнічні характеристики джерела теплоти та огорожень будівлі.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що запропоновані підходи дозволять визначити потребу на опалення при різних умовах комфортності, знизити енергоспоживання будівлі без шкоди здоров'ю людини за рахунок використання моделі теплового комфорту. Описані методи вибору теплового захисту огорожувальних конструкцій будівлі у комплексі із джерелом теплоти дозволяють системно підходити до економічного обґрунтування проектних рішень. Запропонований ексергетичний підхід до

будівлі в цілому дозволяє аналізувати використання якості енергії під час проектування та експлуатації. Результати передано до використання в ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» для розробки норм, щодо ефективного використання енергії в будівлях, в центр ресурсоефективного та чистого виробництва для техніко-економічного обґрунтування вибору джерела теплоти, а також у навчальному процесі Національного технічного університету України КПІ імені Ігоря Сікорського на кафедрі теплотехніки та енергозбереження. Отримано акти впровадження результатів роботи та свідоцтва авторського права на методики.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є завершеною науковою працею. Всі наукові положення і результати, наведені в дисертаційній роботі, отримані автором особисто. У друкованих працях, які були опубліковані у співавторстві, здобувачеві належать такі результати: проведено аналіз підходів щодо комплексного вибору джерела теплоти та огорожувальних конструкцій [9]; проаналізовано різні моделі теплового комфорту людини [10]; розроблено методичні підходи до комплексного вибору джерела теплоти огорожувальних конструкцій на основі функції інтегральної вартості системи [11–18]; запропоновано враховувати комфортні умови у розрахунку інтегральної вартості системи ДК [19–22]; запропоновано використання енергетичних, ексергетичних показників для оцінки енергоефективності системи ДК, проаналізовано потоки енергії від джерела теплоти до огорожувальних конструкцій у будівлі [23–25]; розроблено ексергетичну модель терморегуляції людини для зимового періоду [26]; проведено експериментальне дослідження та створено регресійну модель для визначення комфортної температури відповідно до енергетичного та ексергетичного підходів [27, 28]; змодельовано вплив різних факторів на потребу на опалення за умов застосування енергетичної та ексергетичної концепції щодо забезпечення комфортних умов [28]; запропоновано методику застосування ексергоекономічних показників для вибору джерела теплоти, що враховує зміну вартості енергоносіїв в часі [29].

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, представлені в дисертації, було висвітлено на міжнародних науково-технічних конференціях: «Проблеми енергозабезпечення в АПК України» (Харків, 2009), «Екологія. Економіка. Енергозбереження» (Суми, 2009), «Проблеми промислової теплотехніки» (Київ, 2009, 2015); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми і перспективи розвитку академічної та університетської науки» (Полтава, 2015); науково-технічній конференції інституту енергозбереження та енергоменеджменту «Енергетика. Екологія. Людина» (Київ, 2009, 2016); VIII та IX Всеукраїнському конкурсі «Молодь – енергетиці України – 2009 Відкритий конкурс молодих енергетиків»; на аспірантських читаннях пам'яті А. В. Праховника (Київ, 2017).

Публікації. За результатами дослідження опубліковано 22 наукові праці, у тому числі одна колективна монографія, 10 статей у наукових фахових виданнях (з них дві статті у виданнях іноземних держав, чотири у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), два свідоцтва про реєстрацію авторського права на науковий твір, дев'ять тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 169 найменувань та шести додатків. Загальний обсяг дисертації складає 214 сторінок, 69 рисунків, 31 таблиця.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТА ШЛЯХИ ПОДАЛЬШОГО РОЗВ’ЯЗАННЯ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ «ДЖЕРЕЛО ТЕПЛОТИ – ЛЮДИНА – ОГОРОДЖУВАЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ»

1.1. Споживання енергії та енергоефективність будівель

Енергозбереження – один із найпріоритетніших напрямків розвитку державної політики, що покликаний забезпечити вирішення низки економічних, екологічних проблем, а також умови сталого розвитку. Житлово-комунальний сектор споживає значну частку енергоресурсів у світових масштабах загалом і в межах України зокрема. Частка споживання житлового сектору від загального енергоспоживання різних країн світу представлена на рис. 1.1. В Україні вона є однією із найвищих у світі і становить 33 % [30], що обумовлює першочергову необхідність підвищення енергоефективності будівель. Енергоефективність житлових будівель в Україні є низькою, адже близько 61 % житлових будівель побудовані до 1970 р., а середнє питоме енергоспоживання в багатоквартирних житлових будинках у 2-3 рази вище, ніж відповідний показник у розвинутих державах-членах ЄС [30].

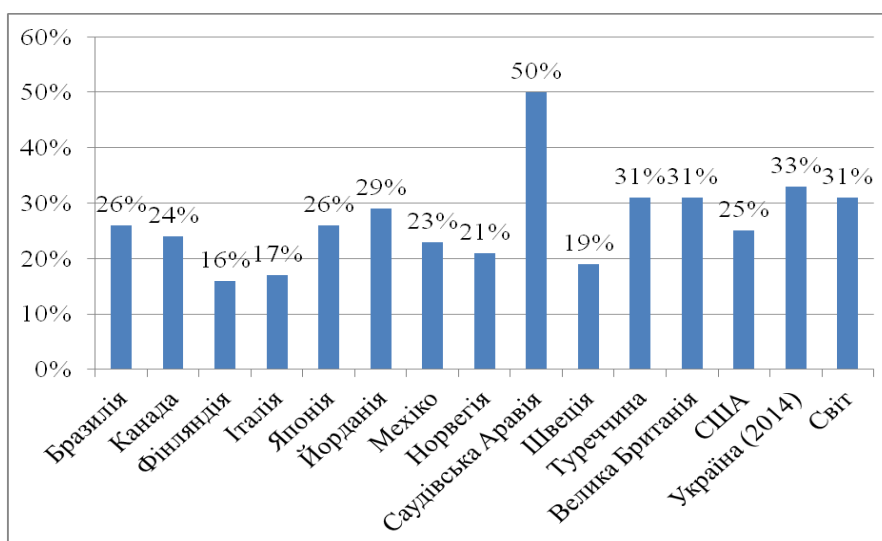
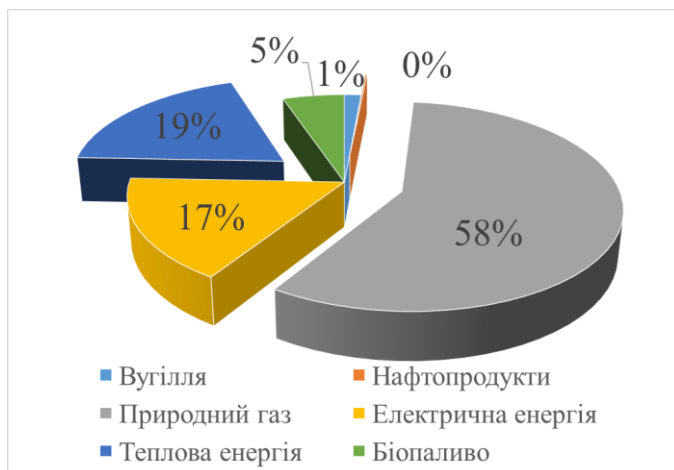


Рис. 1.1 – Світове енергоспоживання житловим сектором [30, 31]

Структуру споживання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) житлово-комунальним господарством України 2014 р. [32] представлено у табл.1, та на

рис. 1.2. Як бачимо, відповідно до структури споживання ПЕР у житловому фонді України основна частка припадає на природний газ (57,61 %) і теплову енергію (19,12 %). Оскільки Україна – імпортер природного газу, то підвищення енергоефективності становить пріоритетний напрямок розвитку житлово-комунального господарства.



Вид ресурсу	тис.т. н. е
Вугілля	290
Нафтопродукти	32
Природний газ	11743
Електрична енергія	3352
Теплова енергія	3897
Біопаливо	1070
Всього	20384

Рис. 1.2 – Структура споживання первинних паливно-енергетичних ресурсів у ЖКГ у 2014 р., % [32]

У світовій практиці особливу увагу приділяють питанню енергоефективності будівель, про що свідчать чинні нормативні документи. У Європейському Союзі розроблено низку стандартів. Їх перекладено та впроваджено в Україні, а саме: EN ISO 13790: 2008 [2] – представлено методику для розрахунку річної потреби та енергоспоживання для опалення та охолодження, запропоновано три варіанти розрахунку енергопотреб, а саме: простий погодинний, помісячний та динамічне моделювання; EN 15217: 2007 [3] – описано методи для визначення енергоефективності та для енергетичної сертифікації, введено поняття проектного, стандартного та розрахованого енергетичного рейтингу; EN 15603:2008 [4] – окреслено перелік статей загального енергоспоживання, наведено енергетичні оцінки, які ґрунтуються на первинній енергії, викидах двоокису

вуглецю, встановлено загальні принципи розрахунку коефіцієнтів первинної енергії та показників викидів вуглецю.

В Україні відбувається адаптація вітчизняних стандартів до європейських, підвищено вимоги до термічного опору огорожувальних конструкцій [33], а підвищення цін на теплову енергію та газ обумовило самостійне вирішення мешканцями питання термомодернізації будівлі. На жаль, зазначені заходи не призводять до очікуваних результатів у напрямку економії. Тільки комплексний підхід щодо покращення теплової ізоляції та до будівлі в цілому дозволить вирішити проблему підвищення енергоефективності будівель та житлово-комунального сектору.

Будівлі споживають енергію не тільки на стадії експлуатації, тому для підвищення їх енергоефективності закордонна практика враховує метод аналізу життєвого циклу будівлі. Виділяють три напрямки розвитку тематики життєвого циклу. Перший – це оцінка життєвого циклу LCA, енергетична оцінка життєвого циклу LCEA та оцінка викидів CO₂ за життєвий цикл LC CO₂A. Застосування кожного з цих напрямків визначається ціллю дослідження, відповідно, кожен одержав детальний науковий аналіз і опис [34].

У контексті задекларованої проблеми особливий інтерес викликає енергетичний аналіз життєвого циклу будівлі. Він має велике значення для формулювання стратегій скорочення використання первинної енергії в будівлях і контролю шкідливих викидів. Енергетичний аналіз життєвого циклу становить підхід, який враховує всі енерговитрати будівлі в його життєвому циклі, зокрема таких етапів: зведення, експлуатація і знесення [35]. Використання енергії на етапі зведення обумовлені виготовленням і транспортуванням будматеріалів і технічних установок, участь у зведенні і реконструкції будівель. Етап експлуатації охоплює всі види діяльності, пов'язані з використанням будівель протягом усього терміну їх служби. Етап знесення передбачає демонтаж, транспортування демонтованих матеріалів на звалища та заводи з переробки. Кожен із етапів життєвого циклу представлено на рис. 1.3.

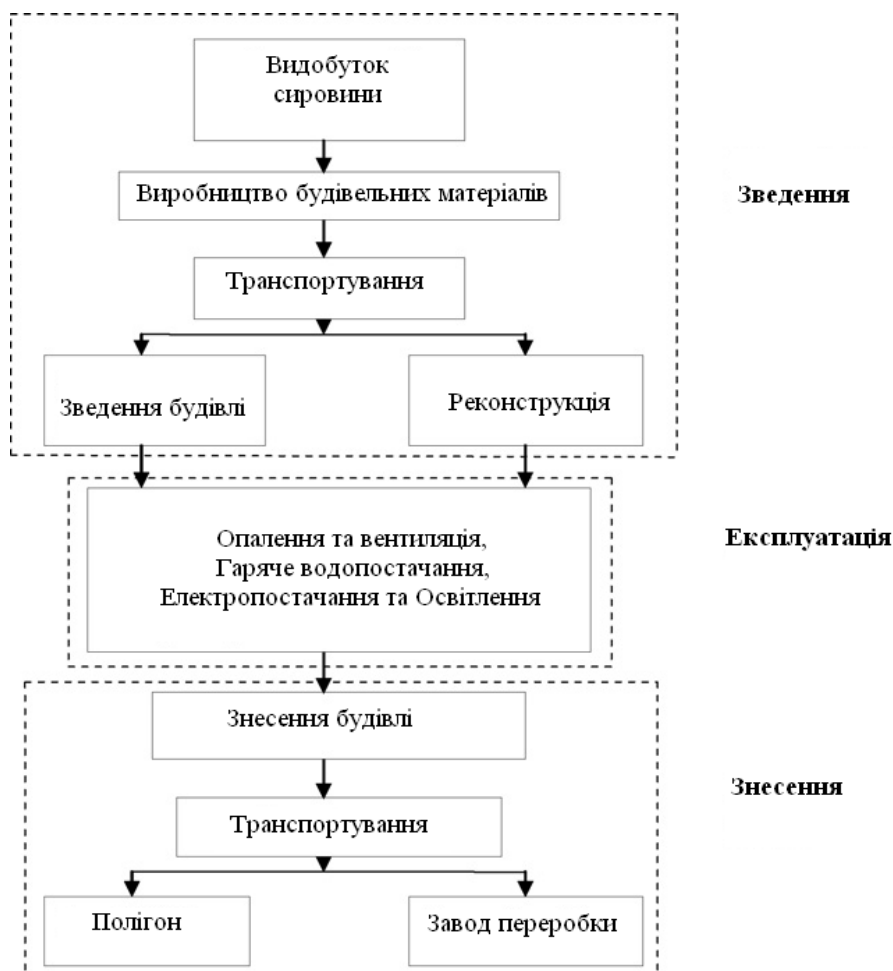


Рис. 1.3 – Етапи аналізу життєвого циклу будівлі [35]

Енергія, спожита впродовж життєвого циклу будівлі, визначається сумою всіх енергій, витрачених у життєвому циклі. Тому [35]:

$$LCE = EE_i + EE_r + OE + DE, \quad (1.1)$$

де EE_i – первинна витрата на зведення будівлі;

EE_r – сума енергії, витраченої на матеріал, який використовується для реконструкції і під час технічного обслуговування; це повторювана (поточна) витрата енергії;

OE – енергія, що витрачається в результаті експлуатації будівлі (робоча енергія);

DE – енергія знесення.

Первинна витрата енергії на зведення будівлі визначається таким способом:

$$EE_i = \sum m_i M_i + E_c, \quad (1.2)$$

де m_i – кількість будівельних матеріалів;

M_i – енергетична цінність i -го матеріалу, відноситься до його кількості;

E_c – енергія, яка використовується для зведення будівлі (на будівельному майданчику).

Поточна витрата енергії:

$$EE_r = \sum m_i M_i \left[\frac{L_b}{L_{mi}} - 1 \right], \quad (1.3)$$

де L_b – тривалість життя будівлі;

L_{mi} – термін служби i -го матеріалу.

Експлуатаційні енергетичні витрати:

$$OE = E_{OA} L_b, \quad (1.4)$$

де OE – експлуатаційна енергія (робоча енергія) за термін служби будинку;

E_{OA} – річні витрати енергії;

L_b – термін експлуатації будівлі.

Енергія демонтажу:

$$DE = E_D + E_T, \quad (1.5)$$

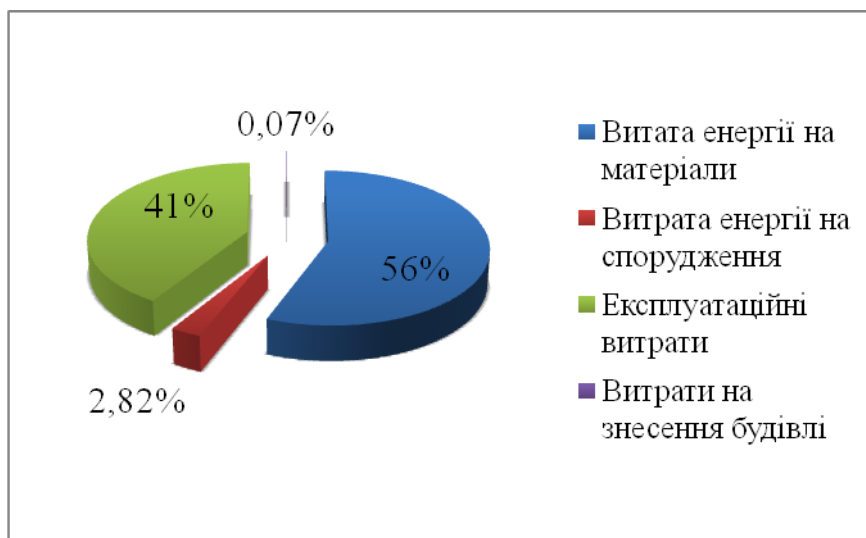
де E_D – енергія, витрачена на демонтаж (знесення) будівлі;

E_T – енергія, витрачена на транспортування відходів.

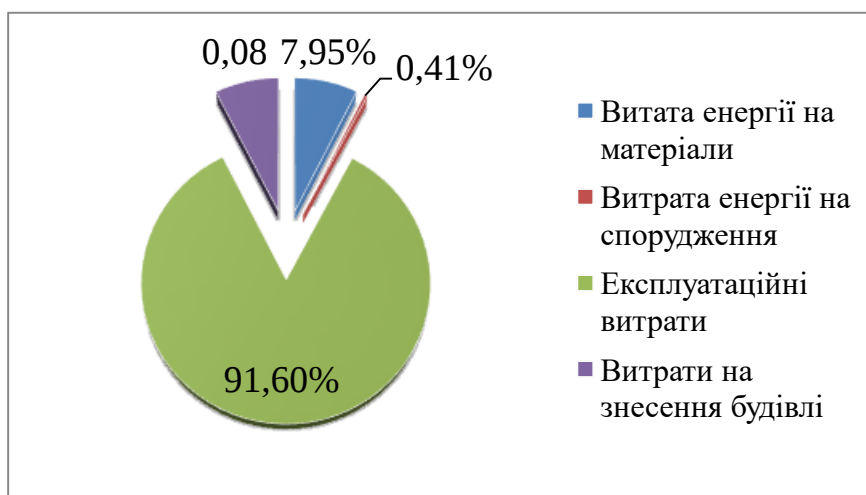
Структуру витрати енергії на кожному з етапів життєвого циклу будівлі відповідно до двох розроблених стратегій представлено на рис. 1.4: перша враховує витрати енергії на створення матеріалів, друга – ні. Переваги кожної з них детально охарактеризовані у наукових працях [36]. Отже, відповідно до другого підходу, найвищі показники витрати енергії – 91,6 % – зафіксовано у період експлуатації. Відповідно до першого підходу, 41 % витрат енергії припадає на період експлуатації, що зумовлено врахуванням витрат енергії на утворення викопних матеріалів.

Отже, найвища частка витрат енергії припадає на період експлуатації і коливається в межах 41–91 %. Враховуючи те, що в Україні близько 61 % житлових будівель побудовані до 1970 р., а середнє питоме енергоспоживання в багатоквартирних житлових будинках у 2-3 рази вище, ніж відповідний показник у розвину-

тих державах-членах ЄС [30], то частка енерговитрат, що припадає на період експлуатації, значно вища. Тому проекти щодо підвищення енергоефективності будівель спрямовані на зменшення цієї складової частини.



а)



б)

Рис. 1.4 – Структура витрат енергії впродовж життєвого циклу будівлі [35]:

а) метод, що враховує витрати енергії на створення матеріалів Eco-LCA;

б) метод, що не враховує витрати енергії на створення матеріалів EIO-LCA

1.2. Основні напрямки розвитку комплексного підходу до розгляду будівлі як складної енергетичної системи

Будівля є складною енергетичною системою, тому для її вивчення застосовується методологія системного підходу. Будівля складається з обмеженої

кількості типових елементів, науково описаних [37], [38] і представлених у рис. 1.5. Теплова енергоефективність будівель – це комплекс оцінювальних показників, які характеризують питомі затрати енергії на опалення і вентиляцію чи кондиціювання приміщень. На практиці користуються показником теплової ефективності – відношенням мінімально можливих затрат для досягнення умов комфортності будівель заданого об’єму до дійсних відповідно до проектного рішення [39].

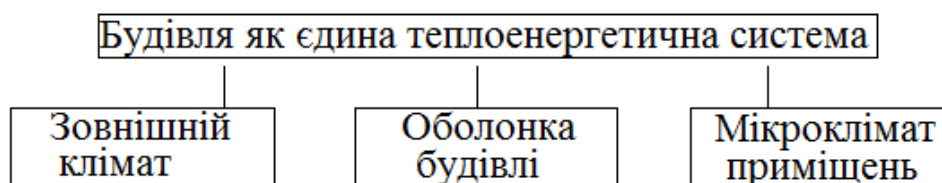


Рис. 1.5 – Блок-схема основних елементів єдиної енергетичної системи теплохолодопостачання будівлі [37]

Із врахуванням системного підходу показник теплової ефективності будівель представляють у вигляді [39]:

$$\eta_{m,e} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \quad (1.6)$$

де $\eta_{m,e}$ – показник теплової ефективності;

η_1 – частковий показник теплової ефективності, який характеризує оптимальний розрахунок напрямленої дії зовнішнього клімату на тепловий баланс будівлі – температури зовнішнього середовища, напрямку і швидкості вітру, а також інтенсивність сонячної радіації;

η_2 – частковий показник теплової ефективності, який визначає теплозахисні показники зовнішніх огорожувальних конструкцій будівлі – стін, дверей, перекриття, підлоги і покриття;

η_3 – частковий показник теплової ефективності, що визначає оптимальність вибору основних параметрів технічних систем теплохолодопостачання для забезпечення мікроклімату у приміщеннях.

Необхідно розглядати енергозберігаючі заходи будівлі як єдиної теплоенергетичної системи, адже максимізація одного із них може сприяти максимізації іншого (рис. 1.6.) [39].



Рис. 1.6 – Схема взаємозалежності основних енергозберігаючі заходів будинку як єдиної теплоенергетичної системи [39]

Основні принципи розгляду будівлі як єдиної енергетичної системи представлено у роботі А. Табунщикова [40]. Розглядати проектування енергоефективної будівлі як оптимізацію взаємозалежних збалансованих енергетичних підсистем запропоновано і в Україні [41]. Автори розробили комплекс моделей інтегрованої єдиної енергетичної моделі будівлі з врахуванням впливу навколишнього середовища та визначенням теплових характеристик огорожувальних конструкцій будівлі. Обирати ті чи інші енергозберігаючі заходи вже для зведених будівель пропонується на основі розроблених алгоритмів. Розроблено підходи для вибору інвестиційного проекту щодо зменшення енергоспоживання будівлями, в основі яких – лінійні моделі [42] та підхід, що ґрунтується на застосуванні нелінійної

енергетичної функції граничної корисності [43] та теорії нечітких множин [44]. Отже, на різних етапах життєвого циклу будівлі дослідники підходять комплексно до вирішення питання енергоефективності, враховуючи джерело теплоти та огорожувальні конструкції. Наприклад, нами використано системний підхід до будівлі, враховуючи джерело теплоти, огорожувальні конструкції та вплив зовнішнього клімату [39], також вперше запропоновано обирати джерело теплоти в комплексі з огорожувальними конструкціями за допомогою функції інтегрованої вартості [11]. Однак у цьому контексті не згадано про мікроклімат у приміщенні та задоволення потреб людини у тепловому комфорті. Натомість у праці А. Табунщикова [38] не враховано джерело теплоти. Як бачимо, під час аналізу та проектування складних систем «джерело теплоти – будівля» не враховано такий аспект, як людина. Водночас поза увагою залишаються математичні моделі теплового комфорту у проектуванні та створенні будівель із високою якістю мікроклімату, що забезпечується системами теплопостачання, вентиляції та кондиціонування. Нами вперше враховано вплив комфортних умов на інтегровану вартість системи ДК [9], однак у якості моделі теплового комфорту обрано модель Богословського, яка має простіший характер, залежить тільки від інтенсивності діяльності людини і загалом окреслює діапазон умов. Тому зростаючі вимоги до теплового комфорту будівлі, комплексний підхід до вибору енергозберігаючих заходів та до будівлі в цілому актуалізують моделі теплового комфорту, які враховують інтенсивність діяльності людини, тип одягу, швидкість руху повітря у кімнаті, відносну вологість. Якщо йдеться про будівлю як складну енергетичну систему, що охоплює в тому числі й джерело теплоти, то широкого застосування набув ексергетичний аналіз [45, 46].

1.3. Розвиток ексергетичного підходу як методу для комплексного аналізу будівлі

Будинок – єдина теплоенергетична система, через яку проходять різні потоки енергії. Будівля втрачає енергію тільки у вигляді тепла, оскільки всі види енергії, які надходять, перетворюються в тепло. Відповідний мікроклімат у будівлях з

урахуванням сучасних технічних досягнень можна забезпечити різними джерелами теплоти, які, відповідно, використовують різні за якістю енергоносії. У цьому контексті для порівняння та вибору найкращої альтернативи доцільним є застосування ексергетичного аналізу. Ексергетичний аналіз – це потужна термодинамічна техніка для оцінювання характеристик комплексу енергетичних систем та оптимізації їх ефективності [47]. Ексергетичний підхід дозволяє якісно оцінити потоки енергії від різних джерел теплоти і є новим інструментом для комплексного аналізу.

Вперше термін ексергія з'явився в Америці 1940 р, згодом, у 1950-х роках, набув поширення в Європі [48]. Отже ексергія – це енергія, яка за участі конкретного навколишнього середовища може бути перетворена в будь-яку іншу форму енергії; аенергія – це енергія, яка не може бути перетворена в ексергію [49]. Зіставлення властивостей ексергії та енергії представлено в табл. 1.1.

На основі критерію ступеня перетворюваності енергії форми енергії можна поділити на три групи [50, 51]:

1) ексергія таких форм енергії, що не визначаються ентропією (електрична, механічна та електромагнітна енергія). У цьому випадку ексергія рівна енергії системи і ніяких спеціальних розрахунків не потрібно;

2) ексергія потоків речовини та потоків енергії, що характеризуються ентропією (внутрішня енергія речовини, енергія хімічних зв'язків, теплового потоку);

3) неперетворювана енергія, наприклад, внутрішня енергія навколишнього середовища; її перетворення в ексергію за другим законом неможливе.

Ексергія речовини у замкнутому об'ємі з термодинамічними параметрами U , S , T , p і V визначається співвідношенням [51]:

$$e_V = (U - U_0) - T_0 \cdot (S - S_0) + p_0 \cdot (V - V_0), \quad (1.7)$$

де e_V – питома на одиницю маси ексергія речовини;

U_0 , S_0 , T_0 , p_0 , V_0 – внутрішня енергія, ентропія, температура, тиск і об'єм речовини відповідно, за умови повної рівноваги системи з навколишнім середовищем;

U, S, T, p, V – внутрішня енергія, ентропія, температура, тиск і об'єм речовини відповідно, у замкнутому об'ємі.

Таблиця 1.1 –Порівняння властивостей енергії та ексергії [49]

Енергія	Ексергія
1	2
Залежить від параметрів речовини або потоку енергії і не залежить від параметрів навколишнього середовища	Залежить як від параметрів системи, так і від параметрів навколишнього середовища
Завжди відмінна від нуля	Може бути рівною нулю (в нульовому стані, тобто у повній рівновазі з навколишнім середовищем)
Підпорядковується закону збереження в будь-яких процесах і зникати не може	Підпорядковується закону збереження під час оборотних процесів; у реальних, необоротних процесах частково або повністю зникає
Перетворюваність одних видів в інші обмежена за умовами другого закону термодинаміки для всіх процесів, у тому числі оборотних	Перетворюваність одних складових в інші не обмежена для оборотних процесів за умовами другого закону термодинаміки

Хімічний складник ексергії (хімічну ексергію, пов'язану з термодинамічними параметрами хімічної реакції) розраховують, використовуючи різні напівемпіричні співвідношення. Наприклад, для газів та рідин встановлені співвідношення між хімічною ексергією і вищою теплотою згорання Q_g [49]:

$$e_x = K \cdot Q_v, \quad (1.8)$$

де Q_v – вища теплота згорання палива; K рівний 0,975 (гази) і 0,95 (рідини), якщо у молекулі речовини міститься більше одного атому, C .

Для інших речовин, наприклад, газів, можна прийняти наступні значення K : 0,97 (генераторний газ), 1,0 (коковий газ), 1,04 (природний газ).

У випадку твердих палив з урахуванням вологовмісту W хімічну ексергію можна з достатньою для практичних цілей точністю визначати у такий спосіб:

$$e_x = (1 - W) \cdot Q_B \quad (1.9)$$

Ексергія теплового потоку визначається за наведеним співвідношенням:

$$e = q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right), \quad (1.10)$$

де $\left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$ – ексергетична температура. Якщо $T < T_0$, тоді напрям теплового потоку – протилежний, теплота рухається від довколишнього середовища.

Ексергія випромінювання визначається за таким співвідношенням [49]:

$$e_\varepsilon = \varepsilon \cdot k \cdot [3 \cdot (3 \cdot T^4 + T_0^4 - 4 \cdot T_0 \cdot T^3)], \quad (1.11)$$

де e_ε – питома ексергія, що припадає на одиницю площі поверхні випромінювання;

ε и T – ступінь її чорноти і температура;

T_0 – температура навколишнього середовища, К;

k – стала Стефана-Больцмана.

Розрахунок ексергії вологого повітря необхідний під час аналізу енергоефективності систем кондиціонування. Для зручності розрахунків вологе повітря прийнято умовно розглядати як суміш 1 кг абсолютно сухого повітря та X кг водяної пари. Відповідно, ексергія такої суміші e_{1+X} , віднесена до 1 кг абсолютно сухого повітря, буде рівна сумі ексергії повітря та пари і розраховується за формулою [49]:

$$e_{1+X} = C_B(t - t_0) - T_0 \left[C_B \ln \frac{T}{T_0} - R_B \ln \frac{p - \varphi p_{\text{нас}}(t)}{p_0 - \varphi_0 p_{\text{нас}}(t_0)} \right] + \\ + X [I_{\Pi} - I_{\Pi,0} - T_0 (S_{\Pi} - S_{\Pi,0})] \quad (1.12)$$

де C_B и R_B – теплоємність і газова стала для сухого повітря;

t і t_0 , T і T_0 – температури потоку та довколишнього середовища, відповідно, в °С і К;

φ і φ_0 , p і p_0 – відносна вологість повітря і повний тиск в потоці і середовищі відповідно;

$p_{\text{нас}}(t)$ і $p_{\text{нас}}(t_0)$ – тиск насиченої водяної пари при температурі потоку і середовища відповідно;

I_{Π} і S_{Π} , $I_{\Pi,0}$ і $S_{\Pi,0}$ – ентальпія і ентропія парів при параметрах потоку і середовища.

Об’єкти дослідження в ексергетичному методі. Об’єктом дослідження є технічні системи, які мають специфічні особливості. По-перше, в аналізованій системі суттєве місце повинні займати енергетичні перетворення, які характеризуються ентропією, відмінною від нуля. Отже, друга важлива особливість технічних систем, що визначає доцільність використання їх термодинамічного аналізу, полягає в тому, що діяльність цих систем відбувається в умовах взаємодії з рівноважним довколишнім середовищем, параметри якого (температура, тиск і склад) не залежать від дій системи. Разом з тим, ці параметри впливають на характеристики системи й абстрагуватися від них у ході аналізу, як правило, неможливо; розглядається по суті велика система, що охоплює і розглянуту систему, і навколишнє середовище. Такий підхід найбільшою мірою відповідає більшості завдань інженерної практики.

Метод потоків ексергії. Будь-яку енергетичну установку можна представити у вигляді «термодинамічного ящика» [52, 53], обмеженого контрольною поверхнею (рис. 1.7).

На відміну від методу ексергетичних потоків, аналіз за ентропійним методом обмежуються розглядом тільки ексергії теплоти. Остання (у випадку необхідності) застосовується для підрахунку перетворюваної частини теплоти лише на вході та виході з установки, що розглядається. Основою ентропійного методу є система коефіцієнтів ексергетичних втрат.

Основа ексергетичного балансу будь-якої теплоенергетичної установки в цьому методі – рівність [51]:

$$Ex_{\text{вих}} = Ex_{\text{вх}} - \sum_{i=0}^n P_i, \quad (1.13)$$

де $Ex_{\text{вх}}$, $Ex_{\text{вих}}$ – ексергія, що, відповідно, вводиться в установку і виводиться нею;

$\sum_{i=0}^n \Pi_i$ – сумарні ексергетичні втрати.

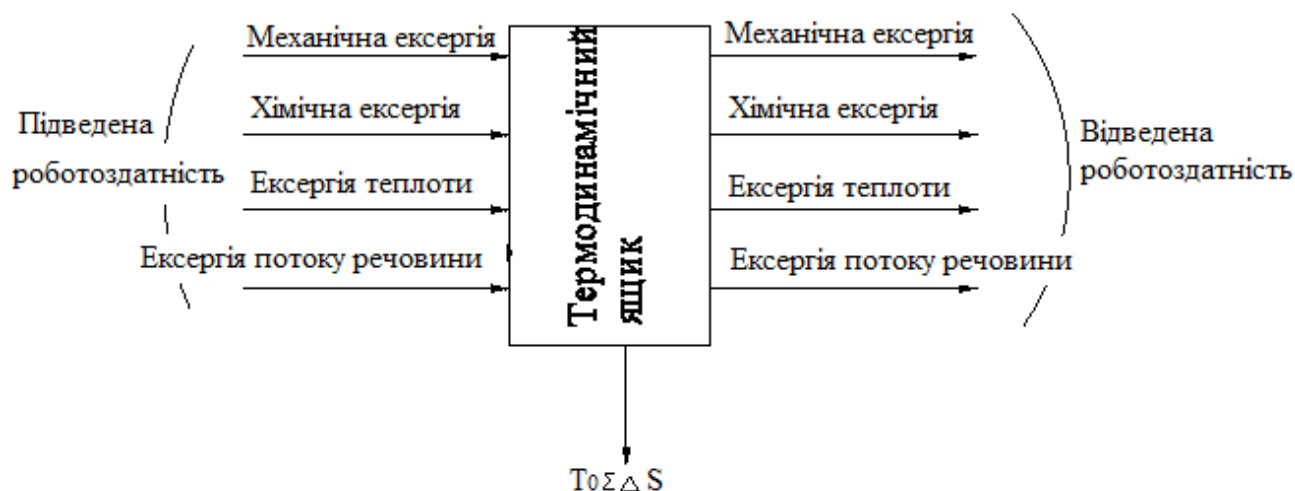


Рис. 1.7 – «Термодинамічний ящик» П. Грасмана [49]

Ексергетичні втрати, зумовлені будь-яким необоротним процесом, дорівнюють добутку абсолютної температури навколишнього середовища на приріст ентропії системи [51]:

$$\sum_{i=0}^n \Pi_i = T_o \cdot \sum_{i=0}^n \Delta s_i . \quad (1.14)$$

Цей вираз кількісно характеризує необоротність будь-якого реального процесу.

Основними недоліками ексергетичного методу є:

- відсутність простого зв'язку між ексергетичними ККД вузлів та ексергетичним ККД всієї установки;
- відсутність простого зв'язку між ексергетичними ККД вузлів та перевитратою палива, викликаною необоротністю відповідних процесів;
- непослідовністю математичного запису ексергетичних ККД різних вузлів;

-відсутність детального розгляду процесів, які відбуваються безпосередньо в досліджуваному об'єкті, зведення аналізу до оцінки потоків ексергії лише на вході та виході з установки (технологічна установка розглядається як «чорний ящик»).

Модель для ексергетичного аналізу будівлі як єдиної ексергетичної системи представлено на рис. 1.8. Пропонована модель поділяє ланцюг перетворення енергії/ексергії на такі складники: огорожувальні конструкції, повітря у кімнаті, випромінювання та контроль, розподіл, нагромадження, генерація, первинне енергоперетворення [54]. На базі зазначеної моделі в межах міжнародного проекту розроблено електронні таблиці «Pre-design sheet for an exergy optimised building design. IEA ECBCS Annex 37. Steady state calculations for heating case. Version 2.3» розроблені у MS Excel, що дозволяють визначити потоки енергії та ексергії через елементи системи та деструкцію ексергії у кожному елементі.

Вперше ексергетичний підхід для систем сонячного теплопостачання застосовано І. Osida [55]. Починаючи з 2008 року з'явилися роботи щодо ексергетичного аналізу енергетичних систем будівлі [47]. Проведено оцінювання вартості енергії та ексергії від різних енергоносіїв, зокрема природного газу, пічного палива, дизельного палива, зрідженого нафтового газу (LPG) і деревини та електричної енергії, що використовується тепловими насосами, порівнюється їх хімічна ексергія. Найвищу ціну має одиниця енергії для дизельного палива, а найнижчу – для природного газу (вартість газу аналізувалася для Туреччини). Різниця між цінами на енергоносії та вартістю ексергії незначна для всіх енергоносіїв [56]. Якісну оцінку енергетичних потоків у складній системі будівлі зроблено у праці D. Schmidt [57]. Такий аналіз виявив ланки системи, де деструкція ексергії – найвища. Проведений [58, 59] аналіз потоків та втрат енергії та ексергії в різних компонентах системи «будівля – джерело опалення (теплова насосна установка – ТНУ)» засвідчує доцільність комплексного застосування енергетичного та ексергетичного аналізу. Крім того, під час дослідження будівель варто оцінювати енерго- та ексергоефективність використання різних первинних джерел енергії. На сьогодні науково описано чимало аспектів зазначеної

проблематики, зокрема проведено енергетичний та ексергетичний аналіз системи опалення вентиляції та кондиціонування будівлі [60], здійснено порівняння різних джерел теплоти [56, 61, 62], приладів опалення [63] для різних варіантів огорожувальних конструкцій [64].

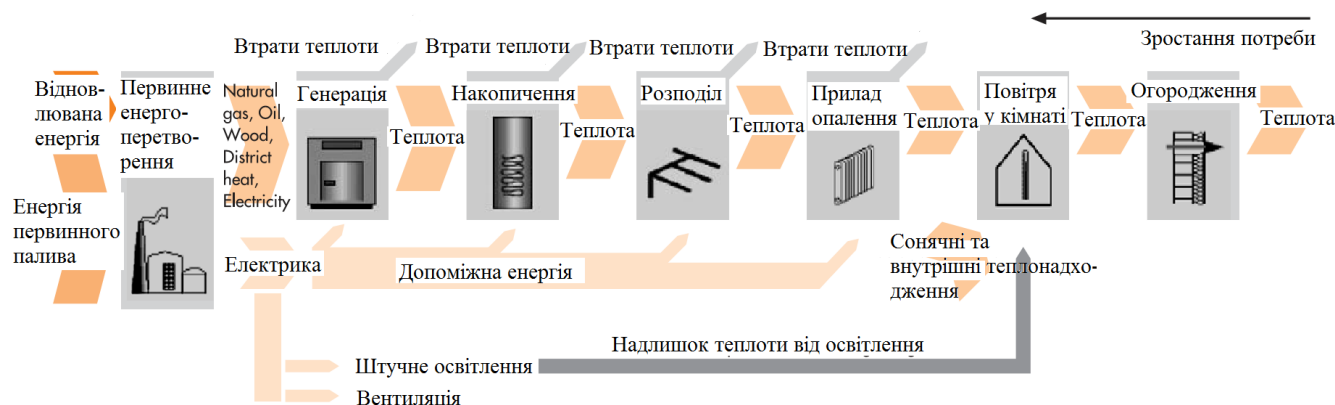


Рис. 1.8 – Ланцюг передачі енергії від джерела теплоти до огорожувальних конструкцій [54]

Науковцями проаналізовано споживання ексергії будівлею на опалення та охолодження за умови погодинної зміни параметрів довколишнього середовища [64], врешті споживання ексергії досліджено за різних варіантів термічного опору огорожувальних конструкцій. Під час аналізу втрат ексергії від джерела теплоти до огорожувальних конструкцій будівлі основну увагу звернено на те, що близько 80 % – це втрати ексергії на етапі первинної трансформації. Саме тому вибір джерела теплоти слід здійснювати, ґрунтуючись не тільки на економічному та енергетичному підходах, але й використовуючи ексергетичну концепцію. Основні три підходи для порівняння відновлювальних та невідновлювальних енергосистем будівлі, а саме: внутрішніх границь системи, порівняльної ексергетичної ефективності та потенціалу сонячної ексергетичної ефективності – проаналізовано у дослідженні R. Sangri та D. Müller [47]. Упродовж останніх років розвивається сучасний та поглиблений ексергетичний аналіз [65–68]. У сучасному (modern) ексергетичному аналізі розрізняють поняття деструкції та втрат ексергії. Деструкція ексергії описує, зокрема, незворотності, що трапляються в кожному елементі системи, без поділу їх на зовнішні та внутрішні, а втрати ексергії (Exergy losses) ви-

никають під час теплової взаємодії елемента системи з навколишнім середовищем [65]. Поглиблений ексергетичний аналіз (Advanced exergetic analysis) полягає у поділі деструкції ексергії на зовнішні та внутрішні, а також ті, які можна усунути, та незворотні. Такий аналіз проведено для системи «джерело теплоти – огорожувальні конструкції будівлі – оточуюче середовище» [66].

Також представлено метод, що пов'язує первинний енергетичний та ексергетичний аналізи [69]. Його суть полягає у тому, що первинна енергопотреба не моделюється, але аналізується ефект від енерговпровадження та енергозмін у відношенні до всього ланцюга. Спочатку з'явилася ексергетична концепція, яка згодом виокремилася в окрему дисципліну міждисциплінарного характеру, що обумовлено зв'язком ексергії з навколишнім середовищем та сталим розвитком, рис. 1.9. [70]. У дослідженнях акцентовано увагу на значному потенціалі ексергії у вирішенні екологічних проблем, а також для досягнення сталого розвитку

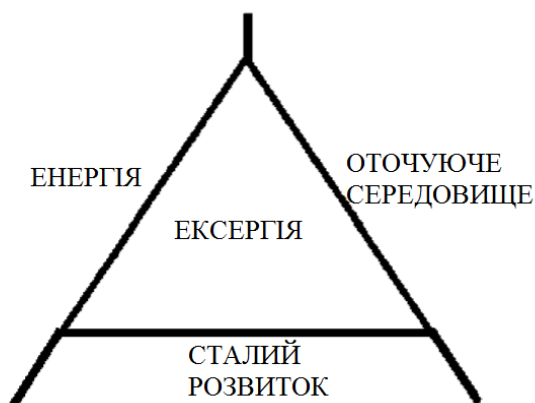


Рис. 1.9. – Міждисциплінарний трикутник ексергії [70]

Для оцінки сталого розвитку будівель запропоновано використовувати ексергетичний показник, що враховує ексергію сонця та життєвий цикл будівлі. Такий показник дозволяє уникнути суб'єктивності, обумовленої ваговими коефіцієнтами під час експертного аналізу екологічності будівель [71]. Наявні приклади застосування методу ексергетичного аналізу в галузі планування міст з метою пошуку резервів енергозбереження у групах будівель за умови застосування енергоефективних конструкцій [72]. Автори доводять, що застосування ексергетичного методу під час проектування міст дозволить

підвищити ексергетичну ефективність групи будівель від 1,5 % до 12%. Отже, ексергетична ефективність значно зростає, що дозволяє економити значну частину енергії високої якості.

В Україні для оцінки енергоефективності будівель застосовується енергетичний підхід, що полягає у визначенні річної енергопотреби на опалення, охолодження та гаряче водопостачання, та порівняння її з максимально допустимим значенням [33], це не дає можливості оцінити ефективність використання первинного палива. За кордоном для аналізу якості енергетичних потоків у будівлі використовують також ексергетичну методику [73]. Сьогодні говорять про появу та існування будинків із низьким споживанням ексергії (Low exergy building), основну увагу під час проектування яких приділяють технологіям, які дозволяють використовувати для забезпечення комфортних умов енергію навколишнього середовища [73]. Особливу увагу в таких будинках приділено параметрам комфорту. Автори S. Gopisetty та J. Pfafferot [74] провели оптимізацію операційної стратегії контролю в низькоексергетичному будинку, спорудженому в Німеччині.

На теренах нашої країни ексергетичний підхід розвивається для оцінки теплоенергетичного обладнання [75], а саме для оцінки енергоефективності теплових насосів [76] та низькоексергетичних опалювальних систем [77]. Існує думка [78], що ексергія як фактор роботоздатності потоку не може використовуватися під час формування макроенергетичного критерію енергоефективності будівлі (запропонований критерій оцінює ефект експлуатації). Із чинними тенденціями використання в будівлі різних за якістю джерел теплоти та розвитком низькотемпературних концепцій опалення застосування ексергетичного та енергетичного аналізу дають більш повне розуміння за умови оптимізації системи «будівля – джерело опалення». Використання ексергетичного підходу дозволяє враховувати взаємозв'язки енергій різної фізичної природи та дисипативні втрати потужності. Застосування ексергетичних підходів для аналізу енергоефективності будівель в умовах України потребує подальшого розвитку. Поєднання ексергетичного аналізу для

будівлі в цілому та ексергетичного аналізу людського тіла [79] дозволить знизити споживання ексергії системою та забезпечити мікроклімат у будівлі, що відповідатиме найкращому функціонуванню людини з погляду другого закону термодинаміки.

1.4. Ексергоекономічний аналіз та його застосування для підвищення енергоефективності будівлі як складної системи

Ексергетичний метод дозволяє вирішити низку науково-практичних завдань у різних галузях техніки. Поєднання ексергії з екологією надало розвитку новій дисципліні – ексергоекології, а оцінювання вартості ексергетичних потоків дало початок ексергоекономіці. І саме у США М. Трайбусом та Р. Евансом була розроблена спеціальна «гібридна методика» ексергетичної оптимізації технологічних процесів – «термоекономіка» [51]. Ексергоекономіка – це унікальне поєднання ексергетичного аналізу та вартісного аналізу, в якому застосовується принцип ексергетичної вартості [80]. Варто зазначити, що термоекономічний (ексергоекономічний) метод використовує термодинамічні та економічні методи із максимальним ступенем декомпозиції системи. Основними термінами в ексергетичному та ексергоекономічному аналізі є: ексергія палива, ексергія продукту, деструкція ексергії, втрати ексергії. Визначення, терміни та загальноприйняті позначення, що використовуються в ексергетичному та ексергоекономічному аналізах, описано у працях George Tsatsaronis [81]. Ексергоекономіку активно застосовують для будівель та джерел теплоти, а саме: геотермальної системи теплопостачання [82], систем опалення [83]. Широкого застосування до ексергетичних потоків у будівлі набув метод питомої ексергетичної вартості SPECO [84]. Зокрема С. Yücer та А. Hepbasli акцентували увагу на трьох етапах SPECO методу: 1) визначення ексергетичних потоків; 2) визначення поняття паливо та продукт, 3) складання балансів вартості та допоміжних рівнянь [85], елементи вартісного балансу представлено на рис. 1.10.

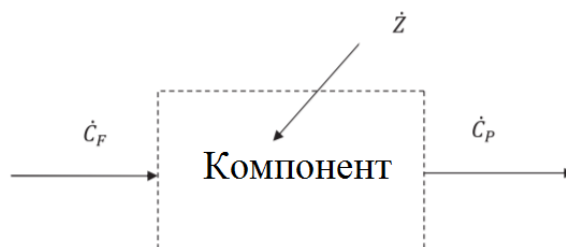


Рис. 1.10 – Елементи вартісного балансу [85]:

$\dot{C}_F$, $\dot{C}_P$ – вартість вхідного та вихідного потоків;

$\dot{Z}_F$ – капітальні та експлуатаційні витрати та витрати на обслуговування

У термoeкономiчному аналізі кожному потоку ексергії присвоюють значення вартості. Отже, із врахуванням значень ексергії вхідних та вихідних потоків речовини E'_x та E''_x , механічної енергії W і теплообміну Q , відповідно, будуть виконуватися такі співвідношення [86]:

$$B' = b'E'_x, \quad (1.15)$$

$$B'' = b''E''_x, \quad (1.16)$$

$$B_w = b_w W, \quad (1.17)$$

$$B_Q = b_Q E_Q, \quad (1.18)$$

де B' , B'' – вартість вхідного та вихідного потоку ексергії відповідно;

b' , b'' , b_w , b_Q – середні вартості одиниці ексергії в умовних одиницях за ГДж;

Отже, вартісний баланс в термoeкономiчному аналізі для елемента, що здійснює роботу за рахунок підведеної теплоти:

$$\sum B''_i + B_{w,i} = B_{Q,i} + \sum B'_i + Z_i \quad (1.19)$$

Враховуючи попередні рівняння можна записати:

$$\sum (b''E''_x)_i + b_{w,i}W_i = b_{Q,i}E_{Q,i} + \sum (b'E'_x)_i + Z_i \quad (1.20)$$

Термoeкономiчна оцінка проекту енергетичної системи пов'язана з визначенням для кожного компонента системи таких характеристик [86]:

- 1) ексергетичного коефіцієнта корисної дії (ККД) h_i^{ex} ;

- 2) дисипації ексергії $P_{д,i}$ та ексергетичних втрат P_i ;
- 3) приведеної вартості дисипації ексергії $n_{д,i}$ і відношення ексергетичних втрат n_i ;
- 4) капіталовкладень Z_k , експлуатаційних витрат та вартості технічного обслуговування Z_e , їх суми, Z ;
- 5) вартості дисипації ексергії, $B_{д,i}$;
- 6) відносної різниці вартостей, d_i ;
- 7) ексергоекономічного фактору, j_i .

Еволюція ексергоекономічного аналізу аналогічна ексергетичному і полягає у появі сучасного ексергоекономічного аналізу (ALEXERGO) [85]. Зазначений метод застосовувався для системи з LNG регазифікатором та електричним генератором [87] а також для оцінювання характеристик основних компонентів системи опалення будівлі [88] та у інших роботах. Отже, термoeкономічний аналіз дозволяє виявити реальні причини витрат в енергетичній системі. Зіставлення для основних компонентів, з одного боку, інвестиційних та експлуатаційних витрат, вартості технічного обслуговування, а з іншого – вартості дисипації ексергії вкрай необхідне для розробки конструкторсько-технологічних рішень, здатних підвищити вартісну ефективність системи в цілому. Враховуючи розвиток термoeкономічного аналізу для будівлі в цілому, застосування такого підходу для комплексного вибору джерела теплоти та огорожувальних конструкцій є необхідністю. Тому використання термoeкономічного аналізу для оцінки енергоефективності будівель досить актуальне, оскільки будівля – складна енергетична система, оптимізація якої дасть значну економію енергоресурсів, зменшення викидів парникових газів та є запорукою сталого розвитку житлового-комунального сектору.

1.5. Підвищення вимог до енергоефективності в рамках забезпечення комфортних умов у приміщенні

Підвищення якості теплового комфорту в будівлях пов'язане із конкретними показниками теплового комфорту, значення яких визначають відповідні

стандарти. В основі сучасних стандартів лежить енергетична модель людини. Для оцінки умов комфортності використовують такі типи шкал: *PMV* (прогнозована середня оцінка тепловідчуттів людини) та *PDD* (прогнозований процент незадоволених) [7], на базі яких визначаються три зони комфортності (А, В і С) [89]. Індекс *PMV* визначається на основі виразу теплового балансу людського тіла, враховуючи внутрішню генерацію та теплообмін з навколишнім середовищем, а індекс *PDD* дає кількісну оцінку – очікуваний відсоток незадоволених людей конкретним температурним середовищем. Такі індекси використовуються в країнах західної Європи, в Америці існує своя шкала комфортності [90]. На території РФ введено в дію ГОСТ Р ИСО 7730 – 2009 [91], який ідентичний міжнародному ISO 7730 – 2005 [7].

Параметри мікроклімату у приміщеннях та комфортність умов в Україні визначають на основі таких документів:

1. ДСТУ Б EN 15251:2011 Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики будівель [5]. Цей стандарт наводить приклади рекомендованих категорій для проектування будівель із механічним опаленням та охолодженням. Виділяють чотири категорії будівель, залежно від значення *PMV* (табл.1.2). Також проведено пояснення сфер застосування цих категорій, залежно від рівня очікувань та тривалості перебування людини (табл. 1.3).

2) ДСТУ Б EN 15261:2012. Розрахунок параметрів мікроклімату [6].

3) ДСТУ Б EN ISO 7730:2011 Ергономіка теплового середовища.

Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників *PMV* і *PPD* і критеріїв локального теплового комфорту [7]. Цей стандарт дає аналітичне визначення показників теплового комфорту, критеріїв локального теплового дискомфорту.

4) ДСТУ Б EN 15603:2012 Енергоефективність будівель. Загальне енергоспоживання та визначення енергетичних показників [8]. У зазначеному стандарті наведено два основних типи енергетичних оцінок будівель, а саме:

розрахована та виміряна. Введено поняття енергопотреба, первинна енергія, коефіцієнт первинної енергії.

Таблиця 1.2 – Приклади рекомендованих категорій для проектування будівель із механічним опаленням та охолодженням [5]

Категорія	Тепловий стан будівлі в цілому	
	<i>PPD</i> %	Очікувана середня оцінка ступеня комфорту (індекс комфортності) Predicted Mean Vote
I	< 6	$-0,2 < PMV < +0,2$
II	<10	$-0,5 < PMV < +0,5$
II	<15	$-0,7 < PMV < +0,7$
IV	>15	$PMV < -0,7$; або (or) $+0,7 < PMV$

Таблиця 1.3 – Сфери застосування зазначених категорій [5]:

Категорія Category	Пояснення Explanation
I	Високий рівень очікувань, рекомендований для приміщень, що займають дуже чутливі та слабкі люди з особливими потребами, такі як інваліди, хворі, маленькі діти та люди похилого віку High level of expectation and is recommended for spaces occupied by very sensitive and fragile persons with special requirements like handicapped, sick, very young children and elderly persons
II	Нормальний рівень очікувань має використовуватися для нових будівель та рено- вації Normal level of expectation and should be used for new buildings and renovations
III	Допустимий середній рівень очікувань може бути використаний для існуючих будівель An acceptable, moderate level of expectation and may be used for existing buildings
IV	Значення поза межами критеріїв вищезгаданих категорій. Ця категорія має прийматися для обмеженого періоду року Values outside the criteria for the above categories. This category should only be accepted for a limited part of the year

Введення в дію стандартів щодо якості теплового клімату та підвищення енергоефективності будівель обумовлюють підвищення наукового інтересу до цієї проблематики. Тому українськими дослідниками представлена нечітка модель комфортного повітряного середовища в житловому приміщенні, на основі якої вихідні комфортні значення температури внутрішнього повітря та відносної вологості формуються із врахуванням індивідуальних характеристик людини [92]. Комфортну швидкість руху повітря як вихідну величину для систем

кондиціонування повітря представлено у дослідженні О. Т. Возняка [93]. Отже, вітчизняні дослідники частково вивчали умови комфорту, однак в умовах зростання вимог до якості мікроклімату важливо оцінити вплив параметрів навколишнього середовища та параметрів, що залежать від людини, на комфортну температуру повітря у приміщенні. Це дозволить її знизити без зниження якості теплового комфорту.

1.6. Розвиток моделей теплового комфорту людини

Ефективне використання теплової енергії житловими будівлями – одне з найактуальніших питань сьогодення. Забезпечення умов теплового комфорту у приміщенні є не менш важливим в умовах зростання вимог до збереження енергії. Досягнення компромісу між цими двома вимогами без шкоди здоров'ю людини – основний виклик до фахівців з енергозбереження.

Математичні моделі теплових відчуттів людини за різних параметрів навколишнього середовища необхідні для проектування систем теплопостачання, а також для регулювання їх роботи. Крім того, забезпечення умов комфорту є обмежувальним фактором з огляду на зростання вимог до енергозбереження. Існує ряд термопсихологічних моделей людини, їх розробка та розвиток розпочалися ще з 1970 року [94] (рис. 1.11). Основні та широко відомі дві моделі, що передбачають тепловідчуття людини [95, 96]. Модель А. Р. Gagga [95] – це двовузлова енергетична модель людини, що передбачає тепловідчуття за перехідних умов довкілля. Ґрунтуючись на емпіричній моделі [96], розроблено міжнародний стандарт визначення показників теплового комфорту [7]. Ця модель дозволяє врахувати інтенсивність діяльності людини, тип одягу, швидкість руху повітря, відносну вологість, температуру повітря у кімнаті t_a та середню радіаційну температуру t_r . Модель [97] встановлює залежність між t_a та t_r для зимового періоду, що залежить від інтенсивності діяльності людини. Існують ще й інші моделі теплового комфорту людини, що пов'язують між собою

температуру повітря, середню радіаційну температуру, швидкість руху повітря та тиск повітря, наприклад модель Ван – Зулена [98]:

$$S = 7,83 - 0,1 \cdot t_b - 0,0968 \cdot t_p - 0,0372 \cdot p_n + 0,0367 \cdot v^{0,5} (37,8 - t_b), \quad (1.21)$$

де S – показник теплового відчуття людини: 1 – жарко; 2 – тепло; 3 – приємно тепло; 4 – комфортно; 5 – приємно прохолодно; 6 – холодно; 7 – дуже холодно;

t_b – температура повітря у кімнаті, °C;

t_p – середня радіаційна температура повітря, °C;

p_n – парціальний тиск, бар;

v – швидкість руху повітря у кімнаті, м/с.

А також модель Уінслоу С.Є та Гейджа А.П. [98]:

$$S = 11,16 - 0,0556 \cdot t_b - 0,0538 \cdot t_p - 0,0372 \cdot p_n + 0,014 \cdot v^{0,5} (37,8 - t_b) \quad (1.22)$$

Однак у порівнянні із моделями теплового комфорту, модель Фангера [96] побудована на великій кількості досліджень і характеризується об'єктивністю отриманих результатів. Сучасні дослідники розглядають людину як складну систему, представляючи її у вигляді 18 вузлів, створюють нейронну модель для контролю потоку крові до шкіри, з метою забезпечення і вдосконалення теплового комфорту людини. Ексергетичний підхід полягає у визначенні мінімуму споживання ексергії людським тілом і ґрунтується на енергетичній моделі, тобто дозволяє врахувати фактори, що залежать від навколишнього середовища та від людини. Крім того, така модель визначає мінімум деструкції ексергії у дво-вузловій системі людини та умови, за яких цей мінімум настає.

Адаптивна модель теплового комфорту представляє залежність між операційною температурою приміщення та середньою щомісячною температурою зовнішнього повітря. Існує американська адаптивна модель теплового комфорту, яка відображена в американському стандарті ASHRAE 55: 2004 [99], європейська – EN 15251 та будівельна біокліматична діаграма Givolini [100], [101]. Врахування комфортних умов у будівлі під час енергетичного та ексергетичного аналізу показників енергоефективності будівлі є важливим і не достатньо вивченим фактором.

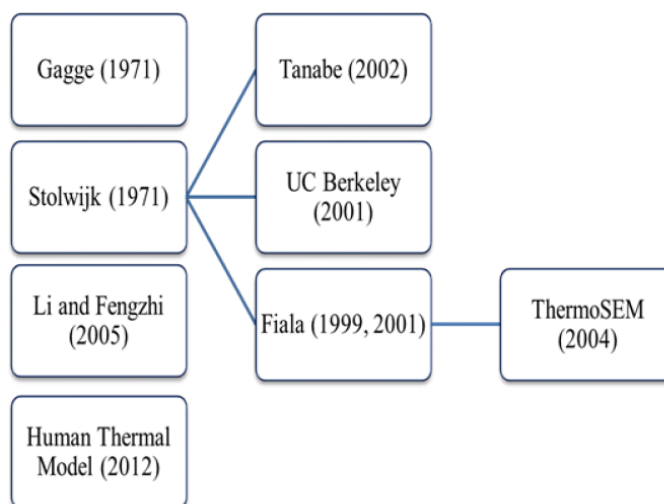


Рис. 1.11 – Розвиток термопсихологічних моделей [95]

Залежно від цілей дослідження вчені представляють різні моделі теплового комфорту, в основі яких лежать енергетичні [102, 103] та ексергетичні баланси [104–113]. У дослідженні М. Shukuya [107] представлено вступ до ексергетичної концепції, ексергетичний баланс людського тіла для типових (typical) та перехідних (transient) умов. Подальший розвиток такого підходу відображено у порівнянні моделі споживання ексергії людським тілом за сталих та перехідних умов [108]. Аналіз впливу теплового захисту огорожувальних конструкцій на споживання ексергії людським тілом [106] для різних кліматичних умов засвідчив, що споживання ексергії людським тілом зменшується на 0,6 %, 6,4 %, 10,1 % та 35,9 % для теплового/волого, помірного, теплового/сухого та холодного типів клімату відповідно, за умови зростання теплового захисту. Структуру енергетичного та ексергетичного балансу для людського тіла для літнього періоду відображено у дослідженні Н. Caliskan [109]. Проаналізовано процес терморегуляції людини в різних типах клімату із застосуванням ексергетичної моделі людини [110]. Використано метод ексергетичного аналізу для пошуку оптимального співвідношення між температурою повітря в кімнаті і середньою радіаційною температурою для фінляндських офісних працівників у літній період, адже відповідно до досліджень, саме ексергетичний підхід до теплового комфорту

забезпечує найвищу продуктивність праці [110]. Встановлено, що мінімальне споживання ексергії людським тілом за умови, що відлік ексергії починається від температури повітря у кімнаті, відповідає тепловідчуттям «дещо прохолодно» [111]. Під час проведення ексергетичного аналізу людського тіла запропоновано оцінювати значення ексергії, що руйнується, та ексергії, яка надходить у навколишнє середовище, оскільки мінімальні значення руйнування ексергії не завжди відповідають комфортним умовам [112].

Стаціонарна модель теплового комфорту і значення споживання ексергії людським тілом описані за допомогою програми, розробленої для електронних таблиць Excel Hideo Asada [113]. Вхідними даними (рис. 1.12) у програмі є параметри нового середовища та людського тіла, а вихідні (рис. 1.13) – представлені відсотковим співвідношенням між складниками вхідного та вихідного потоку ексергії для людського тіла, значенням *PMV* (прогнозованої середньої оцінки тепловідчуттів людини). Наведені таблиці дозволяють оцінити споживання ексергії людським тілом для заданих параметрів, однак для вибору та проектування джерела теплоти важливою є температура повітря в кімнаті, яка відповідає мінімуму споживання ексергії людським тілом. Оцінка впливу факторів, які залежать від людини та від будівлі, на комфортну температуру в кімнаті дозволить її максимально знизити, а отже, знизити енергоспоживання будівель.

Визначають шість параметрів, які впливають на тепловий комфорт, серед яких чотири об'єктивних (температура повітря в кімнаті, середня радіаційна температура, швидкість руху повітря, відносна вологість) і два суб'єктивних (ступінь метаболізму, термічний опір одягу людини). Один із параметрів, який найважче аналізувати, – це середня радіаційна температура приміщення [114]. Отже, середня радіаційна температура – це одна із найскладніших змінних, що входить в енергетичний баланс людини [115].

Є два основних методи визначення середньої радіаційної температури [116]:

- 1) вимірювання, за допомогою кульового (кулястий) термометра;

2) розрахунок за допомогою емпіричних співвідношень, що ґрунтуються на різних підходах і дозволяють врахувати різні фактори, як-от: надходження сонячного випромінювання, параметри огорожувальних конструкцій та розміщення людини у приміщенні.

Таблиця для розрахунку складових
ексергетичного балансу для людського
тіла
Розроблено Н. Asada 2.06.2010



☐ Input values

Вхідні дані

Довкілля

Температура повітря	33.5 °C
Відносна вологість	80 %

Повітря у приміщенні

Температура повітря	35.5 °C
Середня радіаційна температура	35.0 °C
Відносна вологість	80.0 %
Швидкість руху повітря	0.07 m/s

Модель дослідження

Ширина	Увага!!	5 m
Глибина	Ці дані не впливають на результати розрахунку складових ексергетичного балансу людини та не можна вводити нульові значення	5 m
Висота		2.4 m

Людське тіло

Одяг	0.63 clo
Діяльність	1.1 met 1met=58.2 W/m

Розрахунки

Execute calculaion

Рис. 1.12 – Вхідні дані для розрахунку складників ексергетичного балансу людського тіла [113]

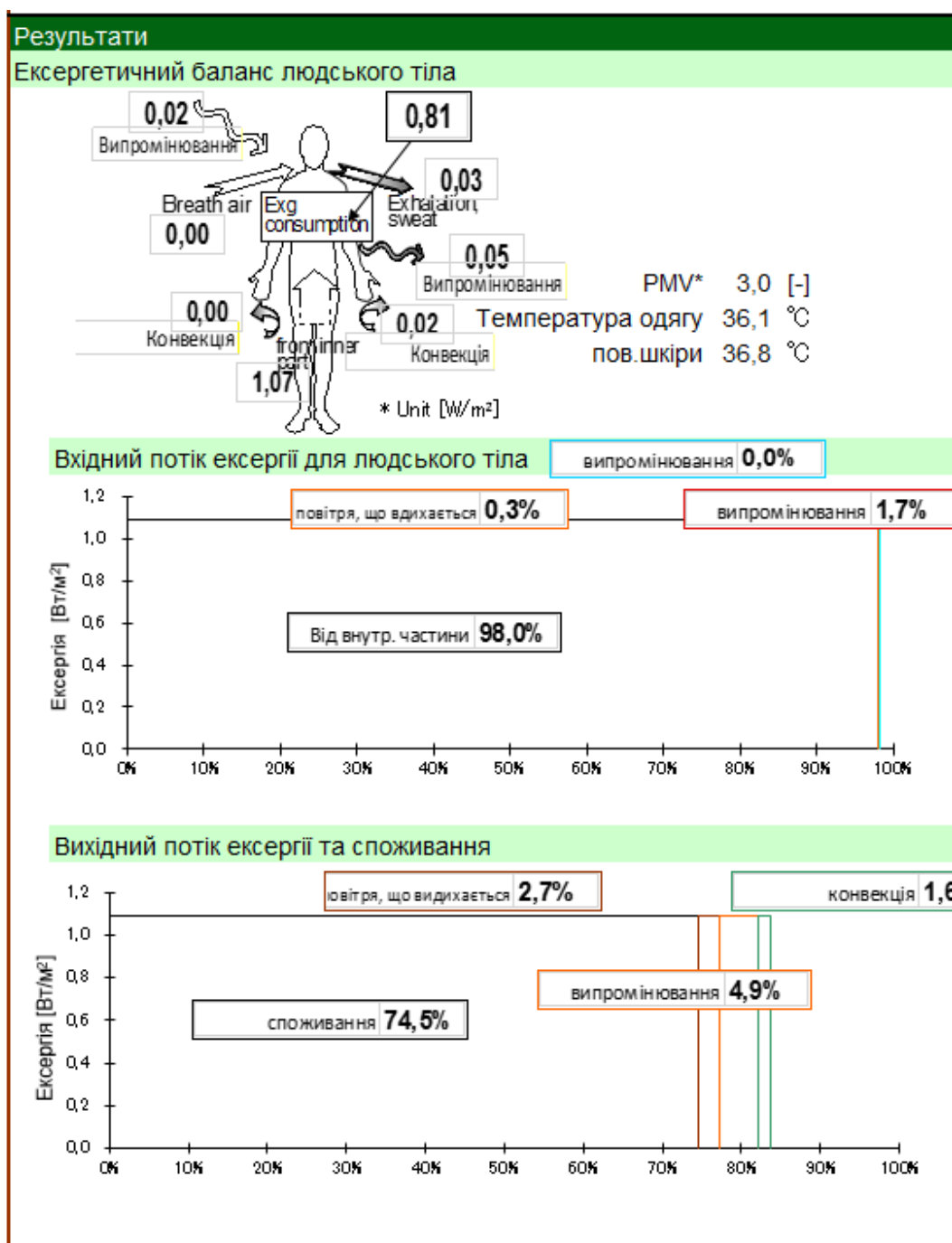


Рис. 1.13 – Вихідні дані розрахунку складників ексергетичного балансу людського тіла [113]

Розроблено кілька методів для визначення середньої радіаційної температури приміщення:

1) метод, що враховує площу та температуру огорожувальних конструкцій [117]:

$$t_R = (\sum_{i=1}^n F_i t_i) / (\sum_{i=1}^n F_i), \quad (1.23)$$

де F_i – площа огорожувальної конструкції;

t_i – температура огорожувальної конструкції, °C ;

n – кількість огорожувальних конструкцій;

2) визначення рівневої радіаційної температури – для різного положення тіла людини [118]:

$$t_{R(\text{standing})} = (0,08 \cdot [t_{pr(\text{up})} + t_{pr(\text{down})}] + 0,23 \cdot [t_{pr(\text{right})} + t_{pr(\text{left})}] + 0,35 \cdot [t_{pr(\text{front})} + t_{pr(\text{back})}]) / 2 \cdot (0,08 + 0,23 + 0,35), \quad (1.24)$$

$$t_{R(\text{seated})} = \left(\begin{array}{l} 0,18 \cdot [t_{pr(\text{up})} + t_{pr(\text{down})}] + \\ + 0,22 \cdot [t_{pr(\text{right})} + t_{pr(\text{left})}] + \\ + 0,3 \cdot [t_{pr(\text{front})} + t_{pr(\text{back})}] \end{array} \right) / 2 \cdot (0,18 + 0,22 + 0,3), \quad (1.25)$$

де $t_{R(\text{standing})}$ – середня радіаційна температура для людини, що стоїть, °C ;

$t_{R(\text{seated})}$ – середня радіаційна температура для людини, що сидить, °C ;

$t_{pr(\text{up})}$ – рівнева температура стелі, °C ;

$t_{pr(\text{down})}$ – рівнева температура підлоги, °C ;

$t_{pr(\text{right})}$ – рівнева температура стіни праворуч мешканця, °C ;

$t_{pr(\text{left})}$ – рівнева температура стіни ліворуч мешканця, °C ;

$t_{pr(\text{front})}$ – рівнева температура стіни попереду мешканця, °C ;

$t_{pr(\text{back})}$ – рівнева температура стіни позаду мешканця, °C .

3) враховується геометричний зв'язок людини зі всіма поверхнями [119, 99]:

$$t_R^4 = \sum_{i=1}^n F_{p-i} t_i^4, \quad (1.26)$$

де F_{p-i} – кутовий фактор, між людиною та n -ою поверхнею;

4) метод, що враховує зв'язок людини із кожною поверхнею та надходження сонячної радіації [119]:

$$t_R = \left[\frac{\sum_{i=1}^n F_i t_i}{\sum_{i=1}^n F_i} + 273 \right]^4 + 0,179 \cdot 10^8 \cdot \alpha_{ir} \cdot f_p \cdot q_{ir} - 273, \quad (1.27)$$

де α_{ir} – середнє поглинання сонячного випромінювання (для скла приймається 0,9 – 0,92);

f_p – коефіцієнт прогнозованої площі для теплового потоку (це функція, що залежить від напрямку випромінювання і розміщення людини, може змінюватися від 0,082 до 0,308, для зміни кута між людиною та висотою стояння сонця від 90° до 0 відповідно [120]);

q_{ir} – густина теплового потоку сонячного випромінювання Вт/м².

Коефіцієнт прогнозованої площі визначається так:

$$f_p = \frac{A_p}{A_r}, \quad (1.28)$$

де A_p – площа людського тіла, м²;

A_r – ефективна площа опромінення людського тіла, м²;

5) ще один метод дозволяє враховувати пряме та розсіяне сонячне випромінювання [121]:

$$T_r = \sqrt[4]{\sum_{i=1}^n F_{p \rightarrow i} \cdot T_i^4 + \frac{C_{dn}}{\varepsilon_s \cdot \sigma} (\alpha_{irr,d} \cdot \sum_{j=1}^M F_{p \rightarrow i} \cdot I_{d,j} + C_s \cdot \alpha_{irr,b} \cdot f_p \cdot I_b)}, \quad (1.29)$$

де ε_s – випромінювальна здатність людського тіла;

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ – стала Стефана-Больцмана;

$\alpha_{irr,d}$, $\alpha_{irr,b}$ – поглинальна здатність людського тіла до розсіяного та прямого сонячного випромінювання;

I_d – розсіяне сонячне випромінювання, що потрапляє у кімнату Вт/м²;

I_b – пряме сонячне випромінювання Вт/м²;

C_{dn} – коефіцієнт день-ніч (=1 вдень і =0 в нічний період);

C_s – коефіцієнт затінення (=1, коли суб'єкт знаходиться під прямим впливом сонячних променів, та =0 у інших випадках).

Кожен із зазначених методів має свої особливості. Перший метод не враховує надходження сонячного випромінювання, що для Південної (Пд) стіни має суттє-

вий вплив на середню радіаційну температуру та її відмінність від температури повітря у приміщенні, що описано у ряді досліджень [114, 119, 122, 123]; інші методи мають свою специфіку, пов'язану із визначенням кутових коефіцієнтів відповідно до розміщення людини. Середня радіаційна температура – один із основних параметрів, що впливають на відчуття теплового комфорту людини, це підтверджують роботи багатьох дослідників [107, 122]. Тому обґрунтування вибору методики розрахунку середньої радіаційної температури є важливим кроком під час комплексного розгляду будівлі як єдиної енергетичної системи із врахуванням моделі теплового комфорту людини. Як бачимо, перспективно використовувати комплексний підхід до системи ДЛК з погляду поєднання комфортних умов та енергоефективності будівлі. Використання комплексного підходу потребує застосування відповідної моделі для визначення належного рівня забезпечення теплового комфорту та енергетичних показників системи. Водночас в умовах мультиваріантності енергетичних перетворень активно використовують ексергетичний аналіз.

Висновки до розділу

Проведений огляд літературних джерел, а також аналіз розроблених підходів до підвищення енергоефективності системи ДЛК дозволяє зробити такі висновки:

1. Умотивовано необхідність комплексного підходу до аналізу будівлі на етапі проектування, експлуатації та вибору енергозберігаючих заходів. Проаналізовано різні праці, де рекомендовано вибирати енергозберігаючі заходи на основі лінійних моделей та функції граничної корисності. Встановлено, що за умови комплексного підходу до вибору енергозберігаючих заходів до будівлі в цілому доцільно використовувати моделі теплового комфорту, які враховують суб'єктивні та об'єктивні фактори. Проведений аналіз нормативного забезпечення енергоефективності будівель та забезпечення теплового комфорту свідчить про доцільність комплексного підходу щодо вирішення обох проблем.

2. Встановлено, що ексергетичний підхід широко застосовують для аналізу потоків енергії від джерела теплоти до огорожувальних конструкцій. Викор-

ристання комплексного підходу передбачає застосування відповідної моделі для визначення рівня забезпечення теплового комфорту та енергетичних показників системи. Водночас в умовах мультиваріантності енергетичних перетворень активно використовують ексергетичний аналіз.

3. Проведено комплексний аналіз моделей теплового комфорту. Умотивовано доречність ексергетичного аналізу людського тіла. Описано сучасні моделі, які поділяють людину на велику кількість вузлів і враховують зміну параметрів навколишнього середовища. Обґрунтовано взаємозв'язок між споживанням ексергії людським тілом та показником *PMV*, отже, існує необхідність використання ексергетичної моделі людини під час проектування будівлі з високою якістю мікроклімату.

4. Оскільки середня радіаційна температура має вагомий вплив на відчуття теплового комфорту людиною, тому проаналізовано різні методи визначення середньої радіаційної температури, доведено необхідність враховувати випромінювання від низькотемпературних огорожень, опалювального приладу та сонця. Показано суттєвий вплив середньої радіаційної температури на тепловідчуття людини, що обумовлює необхідність врахування цього фактору при термомодернізації будівлі, яка дозволяє знизити температуру повітря у приміщенні і додатково енергоспоживання усієї системи.

5. Для вирішення економічних питань під час комплексного розгляду системи ДК слід використовувати функцію інтегральної вартості системи, що дозволяє врахувати зміну вартості енергоносіїв і грошей в часі та рівень інфляції. Водночас застосування ексергетичного аналізу є першим етапом для здійснення комплексної ексергоекономічної оцінки систем.

На основі проведеного огляду літератури з обраної теми зроблено висновок про необхідність поглибленого дослідження складної системи ДЛК, що полягає у застосуванні методів енергетичного, ексергетичного, економічного та ексергоекономічного аналізів, розробці й використанні енергетичної та ексергетичної моделей людини під час проектування та експлуатації будівель.

Основні наукові результати розділу опубліковано у працях [9–15].

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОГО, ЕНЕРГЕТИЧНОГО ТА ЕКСЕРГЕТИЧНОГО АНАЛІЗУ СИСТЕМИ «ДЖЕРЕЛО ТЕПЛОТИ – ЛЮДИНА – ОГОРОДЖУВАЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ»

2.1. Аргументація використання функції інтегральної вартості для сумісного вибору джерела теплоти та огороджувальних конструкцій будівлі

Для України характерна проблема низької ефективності використання теплової енергії для забезпечення відповідного мікроклімату в будівлях. Питання теплової ефективності будівель пов'язане із вибором джерела теплоти та теплозахисних властивостей огороджувальних конструкцій. Оскільки ці рішення передбачають значні початкові інвестиції, то виникає потреба в техніко-економічному аналізі різноманітних альтернатив. Енергетична ефективність будівлі із ростом термічного опору огороджувальних конструкцій зростає. В умовах постійної зміни цін на енергоносії врахування вартісної сторони під час визначення оптимальних теплозахисних властивостей огороджувальних конструкцій будівлі є досить актуальною.

Будівля – складна система, тому питання вибору джерела теплоти та теплозахисних властивостей огороджувальних конструкцій повинні розглядатися в комплексі. Під час звичного розрахунку оптимальної товщини теплоізоляції [124] не враховано зміну вартості грошей в часі, крім того автор не конкретизує яким чином враховувати зміну вартості енергоносіїв. Не враховується можливий вплив рівня теплового захисту будівлі не тільки на кількісні, але і на якісні показники теплопостачання. Існують пропозиції визначати доцільність збільшення товщини теплоізоляції, шляхом розрахунку економії енергоносіїв [125]. Оптимальну товщину теплоізоляції можна визначати через максимум чистого дисконтованого прибутку [126]. Такий розрахунок враховує тільки тариф на теплову енергію і не враховує обране джерело теплоти, інвестиції пов'язані із ним, їх зменшення у зв'язку із покращенням захисних властивостей огороджувальних конструкцій. Автор методики наголошує на неприпустимості

використання бездисконтних методів розрахунку інвестицій (перші два проаналізованих методи дисконтування не враховують), для яких термін окупності є більшим ніж три роки. Оскільки термін окупності енергоефективних джерел теплоти, а також додаткового шару ізоляції – більший, то і врахування дисконтування є обов'язковим під час вибору оптимальних значень термічного опору огорожувальних конструкцій.

Отже вибір оптимальних теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій є складним питанням, під час якого необхідно враховувати дисконтування, ціни на різні енергоресурси, котрі мають тенденцію до стрімкого зростання, енергоефективність та капітальні затрати на джерело теплоти, їх зміну під час зменшення теплового навантаження будівлі.

Оскільки питання вибору джерела теплоти є актуальним, то необхідно оцінити доцільність використання різних джерел теплоти враховуючи їх енергоефективність та зміну вартості в часі енергоносіїв, застосовуючи метод руху грошових потоків (тобто визначимо доцільність застосування різних джерел теплоти з енергетичної та економічної сторони). Сучасні вимоги, щодо техніко-економічної оцінки проектів передбачають врахування таких чинників [127]:– вплив вартості грошей у часі; – можлива зміна у параметрах проекту; – інфляцію; – ризик, пов'язаний із виконанням проекту.

Для підвищення енергоефективності будівель пропонується розглянути вибір економічно-доцільного теплового захисту у поєднанні із джерелом теплопостачання та системою опалення. Для вирішення цієї задачі використаємо функцію, що враховує наступні чинники:

- 1) енергетичну ефективність джерела теплоти та термічний опір огорожувальних конструкцій;
- 2) вартість джерела теплоти та енергоефективних огорожень їх монтажу та обслуговування, термін експлуатації;
- 3) зменшення вартості теплогенерувальної установки під час зростанні теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій;
- 4) тенденції зміни цін на енергоресурси, що споживаються;

- 5) зміну вартості грошей в часі;
- 6) погодні та кліматичні умови;
- 7) призначення та режими експлуатації будівлі.

Вибір джерела теплоти можна здійснювати за допомогою методу аналізу руху грошових потоків:

$$B = \sum_{\tau=0}^n \frac{B_{\tau}^{\text{обслг}}}{(1+E)^{\tau}} + \sum_{\tau=0}^n \frac{B_{\tau}^{\text{енерг}}(1+l \cdot \tau)}{(1+E)^{\tau}} + I_0 + I_{\text{із}} + I_{\text{со}}, \quad (2.1)$$

де $B_{\tau}^{\text{енерг}}$ – річні затрати за спожиті енергоносії, грн. (€, \$);

$B_{\tau}^{\text{обслг}}$ – інші затрати, грн. (€, \$);

I_0 – капітальні затрати на придбання теплогенеруючого обладнання, грн. (€, \$);

$I_{\text{із}}$ – витрати направлені на покращення теплового захисту будівлі, грн. (€, \$);

$I_{\text{со}}$ – витрати на придбання приладів опалення, грн. (€, \$);

l – коефіцієнт, що враховує приріст цін на енергоносії;

n – час, для якого визначаються інтегральні дисконтовані витрати, роки;

E – ставка дисконтування, обирається відповідно до рівня інфляції, типу фінансування [128];

B – чиста теперішня вартість витрат [129] системи «джерело теплоти – прилад опалення – огорожувальні конструкції будівлі».

Отже запропоновано використовувати функцію B (надалі функція інтегральної вартості системи). Інтегральна вартість системи – це чиста теперішня вартість витрат [129] системи «джерело теплоти – прилад опалення – огорожувальні конструкції будівлі».

Економічно доцільний термічний опір ізоляції визначають наступним чином [124]:

$$R_{\text{опт}} = \left[\frac{C_{\text{к}} + C_{\text{ек}} \cdot T}{\lambda \cdot C_{\text{із}}} \right]^{0,5}, \quad (2.2)$$

де $R_{\text{опт}}$ – термічний опір ізоляції, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;

$C_{\text{к}}$ – капітальні інвестиції, грн (€, \$);

$C_{\text{ек}}$ – річні експлуатаційні витрати на опалення будівель, грн (€, \$);

λ – теплопровідність матеріалу, Вт/м·К;

T – термін окупності інвестицій;

$C_{\text{із}}$ – вартість 1 м³ теплоізоляції.

Оптимальну товщину теплоізоляції можна визначати через максимум [125]:

$$\text{ЧДП} = -S - I \cdot \delta + 24 \cdot G_0 \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_0 + \frac{\delta}{\lambda}} \right) \sum_{t=1}^T \Delta E_t \frac{1+\mu}{1+p}, \quad (2.3)$$

$$\delta = \lambda \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T \Delta E_t \frac{1+\mu}{1+p}}{\lambda \cdot I}} - R_0 \cdot \lambda, \quad (2.4)$$

де ЧДП – чистий дисконтований прибуток, грн (€, \$);

S – постійна частина інвестиційних затрат на ізоляцію, грн (€, \$) / м;

I – ціна 1 м³ теплової ізоляції, грн (€, \$) / м³;

δ – товщина теплової ізоляції, м;

G_0 – тариф на теплову енергію в опалювальному періоді, грн (€, \$)/ГДж;

R_0 – опір теплопередачі стіни без теплоізоляції, (м²·К)/Вт;

λ – коефіцієнт теплопровідності теплоізоляції, Вт/(м·К);

ΔE_t – економія засобів в t -у році, пов'язана із зменшенням затрат енергії до і після встановлення теплоізоляції, грн (Євро, \$);

μ – норма інфляції;

p – ставка дисконту;

T – прийнятий термін експлуатації теплової ізоляції, років.

У формулі (2.2) не конкретизовано, яким чином враховувати зміну вартості енергоносіїв та дисконтування. А під час максимізації ЧДП, формула (2.3) та у [130], враховано тільки тариф на теплову енергію і не враховане обране джерело теплоти, інвестиції пов'язані із ним, їх зменшення у зв'язку із покращенням теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій. З метою отримання результатів, котрі враховують зазначені вище зауваження, в якості функції для

мінімізації обрано інтегральні дисконтовані витрати коштів B за певний проміжок часу, що визначається відповідно до (2.1).

Річні витрати за спожиті енергоносії можна визначити так:

$$B_t^{\text{енерг}} = \frac{Q_{H,nd} \cdot C}{\varepsilon}, \quad (2.5)$$

де $Q_{H,nd}$ – річна енергопотреба будівлі на опалення, кВт·год [33, 131];

C – вартість енергоносія грн(Євро,\$)/кВт·год;

ε – коефіцієнт, що враховує ефективність системи опалення.

Річна енергопотреба на опалення відповідно до місячного методу розрахунку, за умови неперервного опалення [33]:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,nd,cont} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} Q_{H,gn}, \quad (2.6)$$

де $Q_{H,nd,cont}$ – енергопотреба для неперервного опалення будівлі, кВт·год, повинна бути більше чи дорівнювати 0;

$Q_{H,ht}$ – сумарна теплопередача в режимі опалення, кВт·год;

$Q_{H,gn}$ – сумарні теплові надходження в режимі опалення, кВт·год;

$\eta_{H,gn}$ – безрозмірний коефіцієнт використання надходжень.

Сумарна теплопередача в режимі опалення для кожної зони будинку та кожного місяця опалювального періоду:

$$Q_{ht} = Q_{tr} + Q_{ve}, \quad (2.7)$$

де Q_{tr} – сумарна теплопередача трансмісією, кВт·год;

$$Q_{tr} = H_{tr,adj}(\theta_{int,set,H} - \theta_e)t, \quad (2.8)$$

де $H_{tr,adj}$ – загальний коефіцієнт теплопередачі трансмісією зони, Вт/К, встановлений для різниці температур всередині-ззовні:

$$H_{tr,adj} = H_D + H_g + H_U + H_A, \quad (2.9)$$

де H_D – безпосередній узагальнений коефіцієнт теплопередачі трансмісією до зовнішнього середовища, Вт/К;

H_g – стаціонарний узагальнений коефіцієнт теплопередачі трансмісією до ґрунту, Вт/К;

H_U – трансмісійний узагальнений коефіцієнт теплопередачі трансмісією через некондиціоновані об’єми, Вт/К;

H_A – узагальнений коефіцієнт теплопередачі трансмісією до суміжних будівель, Вт/К.

У загальному випадку, H_x , що відображає H_D , H_g , H_U або , складається з трьох величин (див. ISO 13789):

$$H_x = b_{tr,x} \left[\sum_i A_i \cdot U_i + \sum_k l_k \cdot \psi_k + \sum_j \chi_j \right], \quad (2.10)$$

де A_i – площа i -го елемента оболонки будівлі, м²;

U_i – коефіцієнт теплопередачі i -го елемента оболонки будівлі, Вт/(м²·К);

l_k – довжина k -го лінійного теплопровідного включення, м;

ψ_k – лінійний коефіцієнт теплопередачі k -го лінійного теплопровідного включення, Вт/(м·К);

χ_j – точковий коефіцієнт теплопередачі j -го точкового теплопровідного включення, Вт/К;

$b_{tr,x}$ – поправковий коефіцієнт, зі значенням $b_{tr,x} \neq 1$ за температури на іншому боці конструкції елемента, що не дорівнює навколишній температурі, для випадку розділення на суміжні кондиціоновані та некондиціоновні об’єми або у випадку нижнього поверху;

$\theta_{int,set,H}$ – задана температура зони будівлі для опалення, °С;

θ_e – температура зовнішнього середовища, °С;

t – тривалість розрахункового інтервалу, Мс,

Q_{ve} – сумарна теплопередача вентиляцією, кВт·год.

$$Q_{ve} = H_{ve,adj} (\theta_{int,set,H,z} - \theta_e) t, \quad (2.11)$$

де $H_{ve,adj}$ – загальний коефіцієнт теплопередачі вентиляцією, Вт/К, встановлений для різниці температур всередині-ззовні:

$$H_{ve,adj} = \rho_a c_a \left(\sum_k b_{ve,k} q_{ve,k,mn} \right), \quad (2.12)$$

де $\theta_{int,set,H}$ – задана температура зони будівлі для опалення, °С.

Сумарні теплові надходження, Q_{gn} , до зони будівлі для місяця опалювального періоду:

$$Q_{gn} = Q_{int} + Q_{sol}, \quad (2.13)$$

де Q_{int} – сума внутрішніх теплових надходжень, кВт·год:

$$Q_{int} = \left(\sum_k \Phi_{int,mn,k} \right) t + \left[\sum_l (1 - b_{tr,l}) \Phi_{int,mn,u,l} \right] t, \quad (2.14)$$

де $b_{tr,l}$ – поправковий коефіцієнт для суміжного некондиціонованого об'єму з l -м внутрішнім тепловим джерелом, визначається згідно ISO 13789;

$\Phi_{int,k}$ – тепловий потік від k -го внутрішнього теплового джерела, Вт;

$\Phi_{int,u,l}$ – тепловий потік від l -го внутрішнього теплового джерела в суміжному некондиціонованому об'ємі, Вт;

$\Phi_{int,mn,k}$ – усереднений за часом тепловий потік від k -го внутрішнього джерела, Вт;

$\Phi_{int,mn,u,l}$ – усереднений за часом тепловий потік від l -го внутрішнього джерела в суміжному некондиціонованому об'ємі, Вт;

Q_{sol} – сума сонячних теплових надходжень протягом даного періоду, кВт·год.

Капітальні затрати на придбання теплогенеруючого обладнання:

$$I_0 = i_0 \cdot P, \quad (2.15)$$

де P – необхідна встановлена потужність джерела теплоти, кВт;

i_0 – вартість одиниці встановленої потужності джерела теплоти, $\frac{\text{грн}(\text{Євро}, \$)}{\text{кВт}}$.

Покращити захисні властивості зовнішніх стін, покриттів і перекриттів можливо шляхом використання додаткового ізоляційного шару із термічним опором R_{i3} . Проте для покращення таких властивостей для дверей та вікон необхідна їх заміна. Вважатимемо, що витрати на встановлення та купівлю ізоляційних матеріалів, вікон і дверей мають лінійну залежність від термічного опору:

$$I_{i3} = \sum_i (A_i + B_i \cdot F_i) \cdot \lambda \cdot R_{i3} + \sum_j (A_j + B_j \cdot F_j) \cdot R_j, \quad (2.16)$$

де A_i , A_j – коефіцієнти, що визначають вартість встановлення ізоляції, вікон чи дверей, грн(€, \$)/м, (грн(€, \$) · Вт)/(м² · К);

B_i – коефіцієнт, що враховує вартість ізоляційного матеріалу, приведену до його опору теплопередачі, грн(€, \$)/м³;

B_j – коефіцієнт, що враховує вартість дверей чи вікон приведену до їх опору теплопередачі, (грн (€, \$) · Вт)/(м⁴ · К);

λ – теплопровідність ізоляційного матеріалу, Вт/(м · К).

Для оцінки впливу різних приладів опалення на комфортні умови в приміщенні з різними джерелами теплоти, та зміну функції інтегральних витрат на опалення будівлі для врахування витрат на прилади опалення та особливостей комфортних умов, що ними забезпечуються, витрати на систему опалення визначаються:

$$I_{co} = \sum_{r=1}^p i_{co} \cdot \frac{P^2}{k \cdot \Delta T} \quad (2.17)$$

де p – кількість приладів опалення, шт.;

i_{co} – питома вартість опалювального приладу, грн(€, \$)/(м²·Вт);

P – необхідна потужність приладу опалення, Вт;

ΔT – температурний напір, °С;

k – коефіцієнт теплопередачі приладу.

Така функція дозволяє врахувати зміну вартості енергоносіїв в часі за допомогою коефіцієнта l , дисконтування за допомогою ставки дисконтування E , зміну капітальних затрат на джерело теплоти під час зростання теплового захисту – формула (2.8), енергоефективність джерела теплоти – коефіцієнт ε .

Розвиваючи дану методику слід враховувати можливість зонного обліку енергоносіїв, регульовану зміну температури в приміщенні, а також проводити оптимізацію роботи системи на основі економічного критерію під час використання кількох джерел теплоти.

Останні дослідження підходів щодо оцінки термомодернізації будівлі [132] показують необхідність застосування аналізу життєвого циклу будівлі та врахування соціальних аспектів, а саме показників *PMV*. Запропонована функція інтегральної вартості дозволяє врахувати ці аспекти та розглядати підвищення енергоефективності будівлі не як огорожувальних конструкцій, а підвищення енергоефективності цілої системи «джерело теплоти – людина – огорожувальні конструкції».

2.2. Особливості застосування теорії нечітких множин для врахування невизначеності щодо вартості енергоносіїв

У сучасних умовах об'єктивною є необхідність врахування невизначеності під час вибору того чи іншого енергозберігаючого проекту. Для аналізу ефективності проекту зміни джерела теплоти та покращення теплового захисту огорожувальних конструкцій пропонується визначати інтегральну вартість (2.1). Розраховуючи яку, основна невизначеність обумовлена тенденціями зміни вартості енергоносіїв в часі. Обґрунтовують три підходи до економіко-математичного моделювання в умовах невизначеності, а саме: імовірнісний, нечітко-множинний та експертний. Ефективність застосування кожного залежить від рівня і характеру невизначеності [133].

Нехай для (2.1) змінна l – лінгвістична змінна. Лінгвістичні оцінки, що складають терм множину мають наступний вигляд:

$$T_1 = \{\text{високий, середній, низький}\} \quad (2.18)$$

Для створення відповідного мікроклімату у будівлях використовуються різні енергоносії, тому для кожного із них характерна своя лінгвістична змінна:

l_1 – газ;

l_2 – теплова енергія;

l_3 – електрична енергія.

Нехай функція належності (ФН) має трикутну форму і зображена на рис. 2.1, аналітичне представлення [134]:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a; \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b; \\ \frac{c-x}{c-b}, & a \leq x \leq b; \\ 0, & x > c \end{cases}, \quad (2.19)$$

де c – оцінка Пуанкаре, Вінзора, Хубера або Тьюки (бівес-оцінка);

a та b – класичний довірчий інтервал, де в якості центрального значення береться відповідне вибране значення c .

Описані коефіцієнти визначаються на базі ретроспективного аналізу зміни цін на енергоносії.

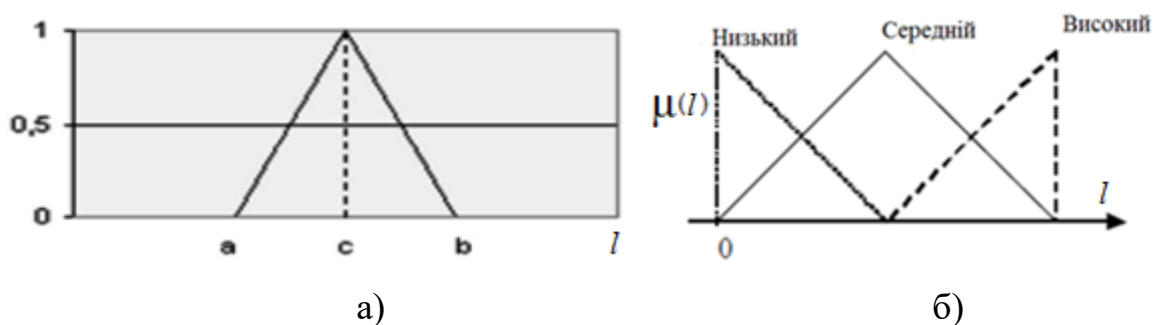


Рис. 2.1 – Функція належності (а) та лінгвістична терм множина (б) для коефіцієнту приросту цін на енергоносії μ

Відповідно інтегральну вартість системи ДК можна визначити так:

$$\tilde{B} = \sum_{\tau=0}^n \frac{B_{\tau}^{обсл}}{(1+E)^{\tau}} + \sum_{\tau=0}^n \frac{B_{\tau}^{енерг} (1 + \tilde{l} \cdot \tau)}{(1+E)^{\tau}} + I_0 + I_{із} + I_{co}. \quad (2.20)$$

Отже $\tilde{B}$ – лінгвістична змінна. Лінгвістичні оцінки, що складають терм множину мають наступний вигляд:

$$T_2 = \{\text{високий, середній, низький}\} \quad (2.21)$$

Аналітичний вигляд ФН для інтегральної вартості аналогічний співвідношенню (2.19). Для розрахунку коефіцієнтів a , b та c визначається значення інтегральної вартості для відповідного значення l .

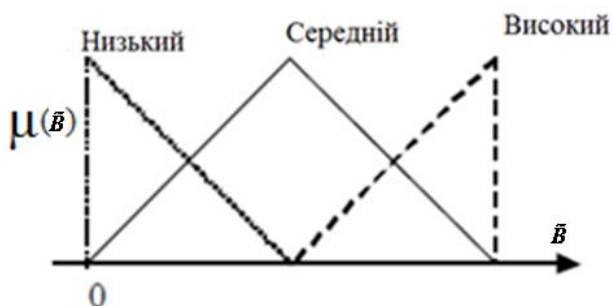


Рис. 2.2 –Лінгвістичний терм для інтегральної вартості системи ДК

Запропонована методика, що враховує неточність та невизначеність під час розрахунку інтегральної вартості системи ДК, обумовлену зміною вартості енергоносіїв. Основними даними для аналізу є ретроспективні дані щодо вартості енергоносіїв в часі.

2.3. Методика аналізу потоків енергії та ексергії для системи «джерело теплоти – огорожувальні конструкції будівлі»

Застосування ексергетичного підходу дозволяє враховувати взаємозв'язки енергій різної фізичної природи, що використовуються для забезпечення відповідного мікроклімату у приміщенні, та дисипативні втрати. Дослідження та аналіз енергетичних та ексергетичних потоків, які використовуються для забезпечення тепlopостачання будівлі, починаються від первинного палива і закінчуються огорожувальними конструкціями, для моделі представленої на рис. 2.3. В якості джерел теплової енергії розглядаються: газовий котел, електричний котел, ТНУ та кабельне електроопалення.

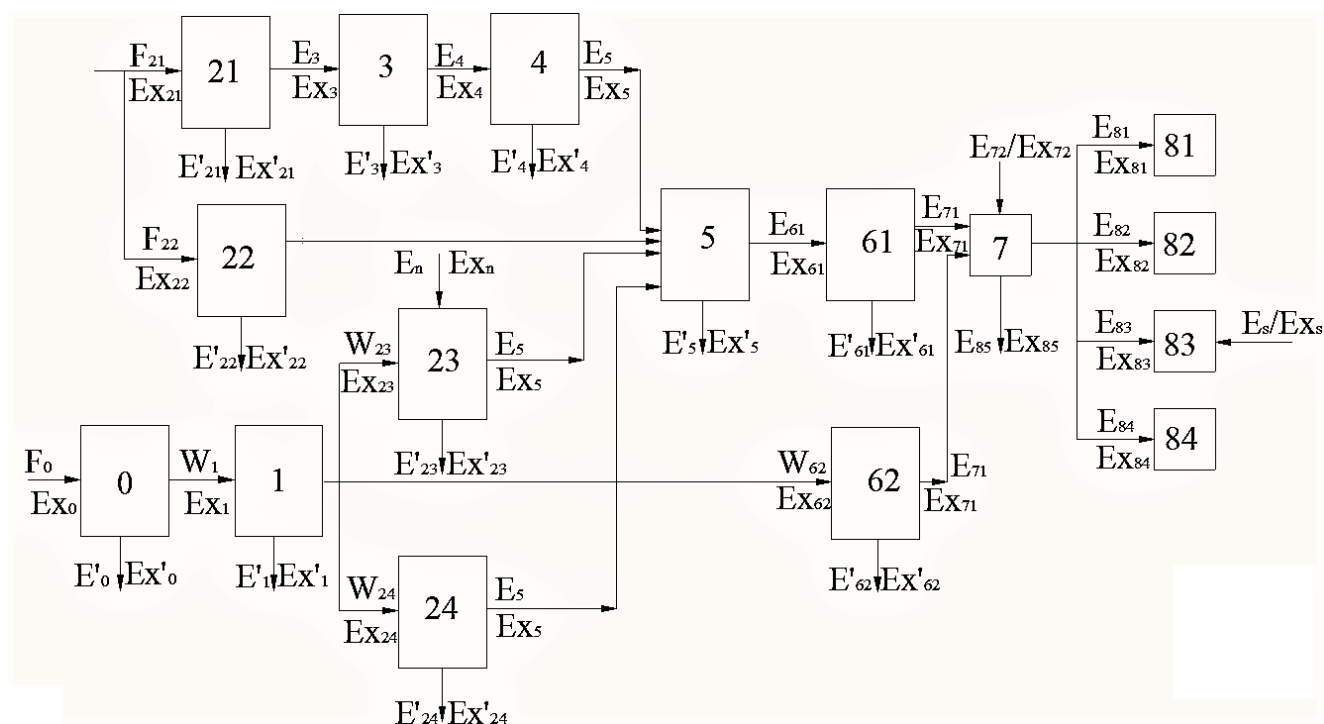


Рис. 2.3 – Схема потоків енергії / ексергії для різних джерел теплоти будівлі: 0 – електрична станція; 1 – електромережі; 21 – газовий котел централізованого теплопостачання; 22 – газовий котел автономної котельні; 23 – ТНУ; 24 – електричний котел; 3 – теплова мережа; 4 – тепловий пункт; 5 – система опалення; 61 – прилад опалення; 62 – кабелі в огороженнях; 7 – повітря в кімнаті; 81 – зовнішня стіна; 82 – покриття; 83 – вікно; 84 – двері

Таблиця 2.1 – Позначення надходжень та втрат енергії / ексергії в різних елементах системи

Надходження енергії / ексергії до	Втрати енергії / ексергії в
F_0 / Ex_0 – електростанції;	E'_0 / Ex'_0 – електростанції;
W_1 / Ex_1 – електричних мереж;	E'_1 / Ex'_1 – електричних мережах;
F_{21} / Ex_{21} – котла централізованого теплопостачання;	E'_{21} / Ex'_{21} – котлі централізованого теплопостачання;
F_{22} / Ex_{22} – газового котла автономної котельні;	E'_{22} / Ex'_{22} – газовому котлі автономної котельні;
W_{24} / Ex_{24} – електричного котла;	E'_{24} / Ex'_{24} – електричному котлі;

Продовження таблиці 2.1.

Надходження енергії / ексергії до	Втрати енергії / ексергії в
W_{23} / Ex_{23} – теплової насосної установки;	E'_{23} / Ex'_{23} – тепловій насосній установці;
E_n / Ex_n – теплової помпи, низько потенційне тепло;	
E_3 / Ex_3 – теплової мережі;	E'_3 / Ex'_3 – тепловій мережі;
E_4 / Ex_4 – теплового пункту;	E'_4 / Ex'_4 – тепловому пункті;
E_{51} / Ex_{51} – системи опалення від централизованого теплопостачання; E_{52} / Ex_{52} – системи опалення від газового котла; E_{53} / Ex_{53} – системи опалення від ТНУ; E_{54} / Ex_{54} – системи опалення від електричного котла;	E'_{51} / Ex'_{51} – системі опалення;
E_{61} / Ex_{61} – приладу опалення;	E'_{61} / Ex'_{61} – опалювальному приладі;
W_{62} / Ex_{62} – кабелів в огородженнях;	E'_{62} / Ex'_{62} – кабелях в огородженнях;
E_{71} / Ex_{71} – повітря в кімнаті від системи опалення;	E_{81} / Ex_{81} – зовнішній стіні; E_{82} / Ex_{82} – покритті; E_{83} / Ex_{83} – вікні; E_{84} / Ex_{84} – дверях; E_{85} / Ex_{85} – у вентиляційній системі.
E_s / Ex_s – повітря в кімнаті від сонячного випромінювання.	

Втрати енергії через огорожувальні конструкції і вентиляцію та надходження енергії від сонячного випромінювання та побутових приладів визначаються за методикою наведеною у стандарті [33], їх можна також розраховувати на основі іноземного досвіду [58]. Витрати електроенергії на роботу живильних та циркуляційних pomp не враховуються.

Приклад розрахунку надходжень та втрат енергії / ексергії в системі ДК для різних джерел теплоти приведено в таблицях 2.2 – 2.6. У цих таблицях потоки ексергії визначаються на основі даних про енергетичні потоки наступним чином [78]:

1) ексергія потоку теплоти:

$$Ex_Q = Q \cdot \tau_e, \quad (2.22)$$

де Q – енергія теплового потоку;

τ_e – ексергетична температурна функція, яка для i -го потоку дорівнює:

$$\tau_{ei} = \frac{T_i - T_{oc}}{T_i}, \quad (2.23)$$

де T_i – температура теплового потоку;

T_{oc} – температуру довкілля приймаємо сталою і рівною середній за опалювальний період [6];

2) ексергія електричної енергії:

$$Ex_w = W, \quad (2.24)$$

3) ексергія палива:

$$Ex_p = Q_p \cdot \frac{Q_p^e}{Q_p^h}, \quad (2.25)$$

де Q_p – кількість теплоти, що виділяється під час згоряння первинного палива кВт·год;

Q_p^e – вища теплота згоряння палива, кВт·год;

Q_p^h – нижча теплота згоряння палива [135], кВт·год.

Таблиця 2.2 – Потоки та втрати енергії / ексергії для централізованого теплопостачання з газовим котлом

Потоки та втрати енергії	Потоки та втрати ексергії
$F_{21} = E'_{21} + E_3$, де $E'_{21} = F_{21}(1 - \eta_{21})$	$Ex_{21} = Ex'_{21} + Ex_3$, де $Ex_{21} = F_{21} \cdot Q_p^e / Q_p^H$
$E_3 = E'_3 + E_4$, де $E'_3 = E_3(1 - \eta_3)$	$Ex_3 = Ex'_3 + Ex_4$, де $Ex_3 = E_3(1 - \frac{T_{oc}}{T_3})$
$E_4 = E'_4 + E_5$, де $E'_4 = E_4(1 - \eta_4)$	$Ex_4 = Ex'_4 + Ex_5$, де $Ex_4 = E_4(1 - \frac{T_{oc}}{T_4})$
$E_5 = E'_5 + E_{61}$, де $E'_5 = E_5(1 - \eta_5)$	$Ex_5 = Ex'_5 + Ex_{61}$, де $Ex_5 = E_5(1 - \frac{T_{oc}}{T_4})$
$E_{61} = E'_{61} + E_{71}$, де $E'_{61} = E_{61}(1 - \eta_{61})$	$Ex_{61} = Ex'_{61} + Ex_{71}$, де $Ex_6 = E_6(1 - \frac{T_{oc}}{T_4})$
$E_{71} = E_{81} + E_{82} + E_{83} + E_{84} + E_{85} - E_s - E_{72}$	$Ex_{71} = Ex_{81} + Ex_{82} + Ex_{83} + Ex_{84} + Ex_{85} - Ex_s - Ex_{72}$, де $Ex_{71} = E_{71} \cdot (1 - T_{oc} / T_p)$

де $\eta_{21} = 0,85$ – енергетична ефективність газового котла централізованого теплопостачання [136]; $\eta_3 = 0,8$ – ефективність передачі енергії тепловими мережами; $\eta_4 = 0,9$ – енергетична ефективність теплового пункту; $\eta_5 = 0,95$ – енергетична ефективність системи опалення; $\eta_{61} = 0,9$ – енергетична ефективність приладу опалення; T_3 – середня температура для теплових мереж, визначається на основі рівняння:

$$T_3 = \frac{T'_3 + T''_3}{2}, \quad (2.26)$$

де T'_3 – температура в прямому (або подавальному) трубопроводі теплових мереж, К;

T''_3 – температура в зворотному трубопроводі теплових мереж, К;

Вважаємо, що температури теплоносія на вході та виході прямого та зворотного трубопроводів є сталими.

T_4 – середня температура для системи опалення, визначається на основі наступного співвідношення:

$$T_4 = \frac{T'_4 + T''_4}{2}, \quad (2.27)$$

де T'_4 – температура в прямому (або подавальному) трубопроводі системи опалення, К;

T''_4 – температура в зворотному трубопроводі системи опалення, К.

Температури визначаємо за графіком навантаження для теплових мереж [137], для середньої температури за опалювальний період, $T_3'' = 320,6$ К, $T'_4 = 332,5$ К. T_p – температура повітря в кімнаті, згідно із нормами становить 293 К [33].

Таблиця 2.3 – Потоки та втрати енергії / ексергії для теплопостачання з газовим котлом автономної котельні:

Потоки та втрати енергії	Потоки та втрати ексергії
$F_{22} = E'_{22} + E_5$, де $E'_{22} = E_{22}(1 - \eta_{22})$	$Ex_{22} = Ex'_{22} + Ex_5$, де $Ex_{22} = F_{22}(Q_p^6 / Q_p^H)$
$E_5 = E'_5 + E_{61}$, де $E'_5 = E_5(1 - \eta_5)$	$Ex_5 = Ex'_5 + Ex_{61}$, де $Ex_5 = E_5(1 - T_{oc} / T_4)$

$\eta_{22} = 0,85$ – енергетична ефективність газового котла автономної котельні.

Таблиця 2.4 – Потоки та втрати енергії / ексергії для автономного теплопостачання з електричним котлом

Потоки та втрати енергії	Потоки та втрати ексергії
$F_0 = E'_0 + W_1$, де $E'_0 = F_0(1 - \eta_0)$	$Ex_0 = Ex'_0 + Ex_1$, де $Ex_0 = F_0 \cdot Q_p^6 / Q_p^H$
$W_1 = E'_1 + W_{24}$, де $E'_1 = W_1(1 - \eta_1)$	$Ex_1 = Ex'_1 + E_{24}$, де $Ex_1 = W_1$
$W_{24} = E'_{24} + E_5$, де $E'_{24} = W_{24}(1 - \eta_{24})$	$Ex_{24} = Ex'_{24} + Ex_5$, де $Ex_{24} = W_{24}$

$\eta_0 = 0,35$ – енергетична ефективність електричної станції; $\eta_1 = 0,82$ – ефективність передачі енергії електричними мережами; $\eta_{24} = 0,97$ – енергетична ефективність електричного котла.

Таблиця 2.5 – Потоки та втрати енергії / ексергії для теплопостачання від кабельної системи

Потоки та втрати енергії	Потоки та втрати ексергії
$F_0 = E'_0 + W_1$, де $E'_0 = F_0(1 - \eta_0)$	$Ex_0 = Ex'_0 + Ex_1$, де $Ex_0 = F_0 \frac{Q_p^6}{Q_p^H}$
$W_1 = E'_1 + W_{62}$, де $E'_1 = W_1(1 - \eta_1)$	$Ex_1 = Ex'_1 + W_{62}$, де $Ex_1 = W_1$
$W_{62} = E'_{62} + E_{71}$, де $E'_{62} = W_{62}(1 - \eta_{62})$	$Ex_{62} = Ex'_{62} + Ex_{71}$, де $Ex_{62} = W_{62}$

$\eta_{62} = 0,99$ – енергетична ефективність кабельної системи опалення.

Таблиця 2.6 – Потоки та втрати енергії / ексергії для теплопостачання від ТНУ

Потоки та втрати енергії	Потоки та втрати ексергії
$F_0 = E'_0 + W_1$, де $E'_0 = F_0(1 - \eta_0)$	$Ex_0 = Ex'_0 + Ex_1$, де $Ex_0 = F_0 \cdot (Q_p^6 / Q_p^H)$
$W_1 = E'_1 + W_{23}$, де $E'_1 = W_1(1 - \eta_1)$	$Ex_1 = Ex'_1 + E_{23}$, де $Ex_1 = W_1$
$W_{23} = E'_{23} + E_5 - E_n$, де $E'_{23} = W_{23}(1 - \eta_{23})$	$Ex_{23} = Ex'_{23} + Ex_5 - Ex_n$, де $Ex_{23} = W_{23}$

Енергоефективність ТНУ визначаємо наступним чином:

$$\eta_{23} = \frac{T_N}{T_N - T_L} \cdot \eta, \quad (2.28)$$

де T_N – температура, з якою підводиться теплота до ТНУ, К;

T_L – температура, з якою відводиться теплота, К;

η – коефіцієнт відповідності ефективності реальних ТНУ до ефективності за оборотніх умов.

Для оцінки енергоефективності будівлі та визначення класу енергоефективності в Україні порівнюють розрахункову або фактичну річну питому енергопотребу будівлі з нормативним максимальним значенням. Розрахунок річної енергопотреби проводиться помісячно і ґрунтується на теплотехнічних характеристиках огорожувальних конструкцій, враховує певні особливості системи опалення і не характеризує джерело теплоти. Європейські документи з теплових характеристик будівлі акцентуються на ефективності використання первинного палива, тому такий підхід доцільно розвивати і в Україні. Виходячи з цього, поряд з питомими витратами теплоти на опалення в якості енергетичного показника енергоефективності пропонуємо наступний:

$$\eta_T = \frac{E_{81} + E_{82} + E_{83} + E_{84} + E_{85}}{F} \quad (2.29)$$

де F – кількість теплоти, що виділяється під час згоряння первинного палива (для різних джерел теплоти це може бути F_{21} , F_{22} або F_0), кВт·год.

Для оцінки ефективності використання ексергії первинного палива можна використовувати ексергетичний показник:

$$\eta_e = \frac{Ex_{81} + Ex_{82} + Ex_{83} + Ex_{84} + Ex_{85}}{Ex_F} \quad (2.30)$$

де Ex_F – ексергія первинного палива (для різних джерел теплоти це може бути Ex_{21} , Ex_{22} або Ex_0), кВт·год.

Запропоновано методику енергетичного і ексергетичного аналізу різних джерел теплопостачання, обґрунтовано доцільність застосування показника ефективності використання первинного палива для порівняння різних будівель, оскільки він залежить від захисних властивостей огорожувальних конструкцій і від обраного джерела теплоти.

2.4. Енергетична та ексергетична модель теплового комфорту людини для аналізу енергетичних характеристик будівлі

Для оцінки рівня теплового комфорту застосовується метод, представлений у стандарті [7]. Метод, який розвинув Фангер, адаптований у стандарті ISO Standard 7730, ґрунтується на рівняннях теплового балансу для людського тіла [138]:

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-2,1 \cdot M} + 0,028) \cdot [(M - W) - H - E_c - C_{res} - E_{res}];$$

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)}, \quad (2.31)$$

де M – ступінь метаболізму, Вт/м²;

W – ефективна механічна робота, Вт/м²;

H – втрати теплоти випромінюванням (sensitive heat losses), Вт/м²;

E_c – теплообмін шляхом випаровування зі шкіри, Вт/м²;

C_{res} – теплообмін конвекцією, під час дихання, Вт/м²;

E_{res} – теплообмін випаровуванням під час дихання, Вт/м²;

$$H = 3,96 \cdot 10^8 \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_{cl} \cdot (t_{cl} - t_a), \quad (2.32)$$

$$E_c = 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15], \quad (2.33)$$

$$C_{res} = 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a), \quad (2.34)$$

$$E_{res} = 1,7 \cdot 10^5 \cdot M \cdot (5867 - p_a), \quad (2.35)$$

де f_{cl} – фактор, що враховує площу поверхні одягу;

t_a – температура повітря, °С;

t_r – середня радіаційна температура, °С;

t_{cl} – температура поверхні одягу, °С;

p_a – парціальний тиск пари у повітрі, Па;

I_{cl} – термічний опір одягу, м² · °С / Вт;

v_{air} – відносна швидкість руху повітря, м/с;

h_{cl} – коефіцієнт конвективного теплообміну, Вт/(м² · К).

Дані щодо значення метаболізму, залежно від виду діяльності людини та термічного опору одягу представлені у табл.2.7.

Табл.2.7 – Параметри людського тіла
Коефіцієнт теплоізоляції одягу [96]

Одяг	<i>clo</i>
Без одягу	0
Нижня білизна	0,05
Шорти	0,1
Звичайний тропічний костюм: шорти, сорочка з коротким рукавом, легка нижня білизна	0,3
Легкий літній одяг: довгі легкі штани, сорочка на короткий рукав, нижня білизна	0,5
Легкий тропічний костюм	0,8
Звичайний бізнес костюм	1
Традиційний північноєвропейський костюм з жилетом, нижньою білизною на довгий рукав, піджаком	1,5
Полярний одяг	3–4

Швидкість обміну речовин [95]

Діяльність	<i>met</i>
Сон	0,8
Сидіння	1
Друк	1,2
Стояння	1,4
Звичайна стояча робота в магазині, лабораторії, на кухні	1,6–2
Повільна хода (3 км/год)	2
Нормальна хода (5 км/год)	2,6
Швидка хода (7 км/год)	4
Робота столяра чи будівельника	3
Біг (10 км/год)	8

Основною проблемою розрахунків за цим методом є те, що температура поверхні одягу не є відомою наперед, і визначається методом ітерацій з рівняння теплового балансу для шару одягу [96]:

$$(t_{sk} - t_{cl}) = 3,96 \cdot 10^8 \cdot f_{cl} \cdot \left[(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4 \right] + f_{cl} \cdot h_{cl} \cdot (t_{cl} - t_a), \quad (2.36)$$

$$t_{sk} = 35,7 - 0,028(M - W). \quad (2.37)$$

Коефіцієнт конвективного теплообміну визначається наступним чином:

$$h_c = \begin{cases} 2,38|t_{cl} - t_a|^{0,25}, & \text{якщо } 2,38|t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1\sqrt{v_{ar}}, \\ 12,1\sqrt{v_{ar}}, & \text{якщо } 2,38|t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1\sqrt{v_{ar}}, \end{cases} \quad (2.38)$$

Фактор, що враховує площу поверхні одягу:

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,29 \cdot I_{cl}, & \text{якщо } I_{cl} \leq 0,78 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}} \\ 1,05 + 1,645 \cdot I_{cl}, & \text{якщо } I_{cl} > 0,78 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}. \end{cases} \quad (2.39)$$

Метод визначення *PMV* (Predicted Mean Vote) передбачає зв'язок між оптимальними тепловими умовами, використовуючи рівняння теплового балансу для людського тіла для стаціонарних умов і рейтинг забезпечення теплового комфорту. Розрахунок показників теплового комфорту можна здійснювати за допомогою таких інтернет розробок [139, 140]. Вікно для розрахунку представлено на рис. 2.4, цей продукт обрано за вищу точність розрахунків і можливість оцінити *PMV* та *PPD* для сталих параметрів мікроклімату у приміщенні. Однак для розрахунку комфортної температури повітря у кімнаті і вивчення впливу на неї різних факторів необхідно розв'язати систему нелінійних рівнянь. Приклад вирішення цієї задачі у середовищі Mathcad представлено у Додатку А. Дана модель розроблена Фангером, а показник *PMV* обґрунтований на базі великої кількості експериментів, однак тут не прописаний механізм терморегуляції, що є суттєвим при розрахунку теплообміну людини.

В основі ексергетичної моделі лежить двох-вузлова термопсихологічна модель людини, розроблена А. Р. Gagge [95]. Людське тіло розглядається як відкрита термодинамічна система за сталих умов. На рис. 2.5 представлено схематичну модель механізму теплообміну людського тіла з навколишнім середовищем. Така модель враховує втрати теплоти за рахунок дихання, випаровування вологи, а також втрати теплоти за рахунок конвекції та випромінювання.

Calculation of PMV and PPD

58	M (W/m2), Metabolic energy production (58 to 232 W/m2)
0	W (W/m2), Rate of mechanical work, (normally 0)
20	Ta (C), Ambient air temperature (10-30)
22	Tr (C), Mean radiant temperature (often close to ambient air temperature)
0.1	v (m/s), Relative air velocity (0.1 to 1 m/s)
50	rh (%), Relative humidity
1.0	Icl (clo), basic clothing insulation (1 clo = 0.155 W/m2K)

PMV and PPD

PMV -3 cold to +3 hot

PPD (%)

CALCULATION READY!

Рис. 2.4 – Інтернет розробка для розрахунку прогнозованої середньої оцінки якості внутрішнього середовища (*PMV*) та прогнозованого проценту незадоволених температурним середовищем (*PPD*) [139]

Існуючі стандарти щодо мікроклімату у приміщенні та показники теплового комфорту ґрунтуються на енергетичній моделі теплового комфорту, що розроблена Фангером [96], в основі якої лежить енергетичний баланс, що використовується для визначення розсіювання теплоти людським тілом. Механізми терморегуляції в даному випадку не враховуються. В той час ексергетична модель теплового комфорту дозволяє враховувати процеси термогенезу та термолізу, оскільки побудована на базі енергетичної моделі Гага [95], що описує механізм терморегуляції людини. Енергетичний баланс людського тіла (за умови, що температура зовнішнього середовища є сталою), враховуючи, що людина складається із ядра та оболонки [95]:

$$S_{sk} = K_{min} \cdot (T_{cr} - T_{sk}) + c_{bl} \cdot V_{bl} \cdot (T_{cr} - T_{sk}) - E_{sk} - DRY, \quad (2.40)$$

$$S_{cr} = (M - E_{res} - W) - K_{min} \cdot (T_{cr} - T_{sk}) - c_{bl} \cdot V_{bl} \cdot (T_{cr} - T_{sk}),$$

де S_{cr} , S_{sk} , – накопичення енергії у ядрі та оболонці, Вт/м²;

K_{min} – коефіцієнт ефективної теплопередачі між ядром та оболонкою = 5,28 Вт/(м²·К);

T_{cr} – температура ядра, К;

T_{sk} – температура оболонки (шкіри), К;

c_{bl} – питома теплоємність крові людини = 4187 Дж/кг·К;

V_{bl} – потік крові до шкіри кг/с·м².

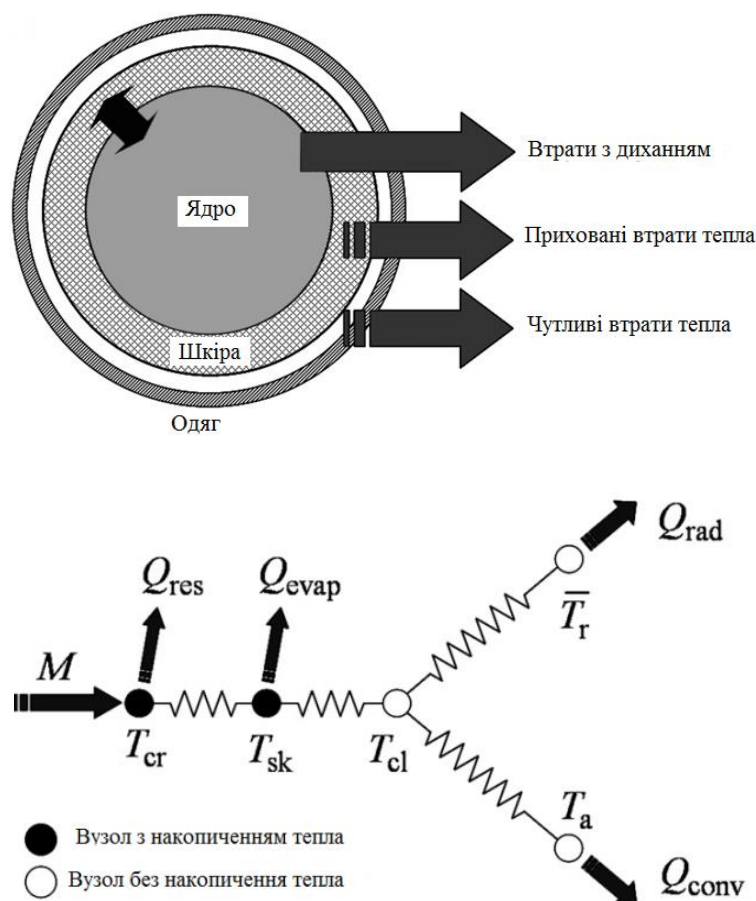


Рис. 2.5 – Механізм теплообміну та модель мережі теплових опорів для моделі Гага [101]

Сумарні втрати теплоти випаровуванням із поверхні шкіри можна представити наступним чином:

$$E_{sk} = E_{diff} + E_{rsw}, \quad (2.41)$$

Величину $DRY = (R + C)$ називають сухим теплообміном із поверхні тіла і визначають наступним чином:

$$DRY = h \cdot F_{cle} \cdot (T_{sk} - T_o), \quad (2.42)$$

де h – комбінований коефіцієнт теплопередачі, Вт/м²·°C:

$$h = h_r + h_c, \quad (2.43)$$

де h_r – коефіцієнт теплопередачі випромінюванням:

$$h_r = 4 \cdot \frac{A_r}{A_D} \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{t_{cl} + t_r}{2} + 273,2 \right)^3, \quad (2.44)$$

де A_r – площа опромінення людського тіла, м²;

A_D – коефіцієнт дюбуа (коефіцієнт площі поверхні людського тіла):

$$A_D = 0,202 \cdot m^{0,425} \cdot l^{0,725}, \quad (2.45)$$

де m – маса тіла людини, кг;

l – висота людини, м;

σ – стала Стефана Больцмана;

ε – випромінювальна здатність поверхні одягу;

Для спрощення $A_r/A_D=0,72$;

t_{cl} – температура поверхні одягу, °С;

t_r – середня радіаційна температура, °С;

h_c – коефіцієнт конвективного теплообміну:

$$h_c = \max \left\{ \begin{array}{l} 2,38 \cdot \sqrt[4]{|t_{cl} - t_a|} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v} \end{array} \right., \quad (2.46)$$

де t_a – температура повітря в кімнаті, °С;

T_o – операційна температура, К;

v – швидкість руху повітря м/с.

$$t_o = \frac{h_c \cdot t_a + h_r \cdot t_r}{h_c + h_r}, \quad (2.47)$$

де F_{cle} – коефіцієнт теплової ефективності одягу:

$$F_{cle} = \frac{1}{1 + 0,155 \cdot h \cdot I_{cle}}, \quad (2.48)$$

де M – питоме значення генерування теплоти за рахунок обміну речовин, Вт/м²;

E – втрати теплоти за рахунок випаровування, Вт/м²;

R – надходження чи втрати теплоти випромінюванням, Вт/м²;

C – надходження або втрати теплоти конвекцією, Вт/м²;

W – робота, яку виконує людина, Вт/м².

Втрати теплоти за рахунок випаровування поділяються на три частини:

E_{res} – теплота від випаровування рідини за рахунок дихання, Вт/м²;

E_{diff} – теплота від випаровування рідни, що проникає через шар шкіри, Вт/м²;

E_{rsw} – теплота від випаровування поту, для регулювання температури тіла, Вт/м².

Теплота від випаровування рідини за рахунок дихання:

$$E_{res} = 0,0023 \cdot M \cdot (44 - P_a), \quad (2.49)$$

де P_a – тиск пари в кімнаті, мм.рт.ст (torr);

$$E_{sk} = w \cdot E_{max}, \quad (2.50)$$

$$E_{sk} = (0,06 + 0,094 \cdot w_{regsw}) \cdot E_{max}, \quad (2.51)$$

$$w_{regsw} = \frac{E_{regsw}}{E_{max}}, \quad (2.52)$$

$$E_{regsw} = 0,7 \cdot m_{reg.sw} \cdot 2^{\frac{t_{sk} - 34,1}{3}}, \quad (2.53)$$

де E_{max} – максимально можливе випаровування з поверхні шкіри, Вт/м²;

w – показник вологості шкіри;

w_{regsw} – зволоженість шкіри, обумовлена регулярним генеруванням вологи;

0,7 – прихована теплота поту Вт·год/гр.;

E_{regsw} – втрати випаровуванням з поверхні шкіри, за рахунок нормативного генерування вологи, Вт/м²;

m_{regsw} – міра покриття шкіри вологою, гр/год·м².

Максимально можливе випаровування з поверхні шкіри:

$$E_{max} = k \cdot h_c \cdot (p_{sk} - p_a) \cdot F_{pcl}, \quad (2.54)$$

де k – коефіцієнт Левіса = 2,2 °C/мм.рт.ст;

p_{sk} – тиск насиченої водяної пари, для температури T_{sk} , мм.рт.ст;

F_{pcl} – коефіцієнт ефективності проникнення випарів водяної пари з поверхні шкіри через одяг до навколишнього середовища:

$$F_{pcl} = \frac{1}{1 + 0,143 \cdot h_c \cdot I_{cle}}, \quad (2.55)$$

де I_{cle} – коефіцієнт теплоізоляції одягу, clo (1 clo = 0,155 м²·°C/Вт)

Температура поверхні одягу людини [138]:

$$t_{cl} = (35,7 - 0,028(M - W) - I_{cl} \cdot (3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot ((t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4) + f_{cl} \cdot h_c(t_{cl} - t_a)) \quad (2.56)$$

Систему терморегуляції описано наступними рівняннями, а саме температурні сигнали від оболонки та ядра:

$$\Sigma_{sk} = t_{sk} - 34,1; \quad (2.57)$$

$$\Sigma_{cr} = t_{cr} - 36,6, \quad (2.58)$$

де Σ_{cr} , Σ_{sk} – температурний сигнал від ядра та оболонки відповідно, °C.

На базі цих двох сигналів визначається швидкість руху крові по судинах, та маса вологи, що генерується людиною:

$$V_{bl} = \begin{cases} \frac{6,3 + 75 \cdot \Sigma_{cr}}{1 - 0,5 \cdot \Sigma_{sk}}, & \text{якщо } \Sigma_{cr} < 0 \cap \cup \Sigma_{sk} < 0; \\ 6,3 & \end{cases} \quad (2.59)$$

$$m_{reg.sw} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \Sigma_{cr} < 0 \cup \Sigma_{sk} < 0 \\ 250 + 100 \cdot \Sigma_{cr} & \end{cases}. \quad (2.60)$$

За співвідношеннями (2.40)–(2.60) для визначених параметрів навколишнього середовища розраховуються T_{cr} , T_{sk} та E_{sk} . Ці показники дозволяють на основі балансу ексергії визначити споживання ексергії людським тілом. Ексергетичний баланс для людського тіла [105]:

$$Ex_m + Ex_{gen,cr} + Ex_{gen,sk} + Ex_{inh,air} + Ex_{abs,sk-cl} = \quad (2.61)$$

$$= Ex_{rad,dc} + Ex_{conv} + Ex_{exh,air} + Ex_{sw,ha} + Ex_{stored,cr} + Ex_{stored,sk} + Ex_{cons},$$

де Ex_m – потік ексергії теплоти, що обумовлений обміном речовин, Вт/м²;

$Ex_{gen,cr}$ – потік ексергії рідини, що генерується в ядрі за рахунок метаболізму, Вт/м²;

$Ex_{gen,sk}$ – потік ексергії рідини, що генерується в оболонці за рахунок метаболізму, Вт/м²;

$Ex_{inh,air}$ – потік ексергії вологого повітря, що вдихає людина, Вт/м²;

$E_{x_{abs,sk-cl}}$ – потік ексергії випромінювання, що поглинається шкірою та одягом людини, Вт/м²;

$E_{x_{rad,dc}}$ – потік ексергії випромінювання від поверхні тіла, Вт/м²;

$E_{x_{conv}}$ – потік ексергії, що передається конвекцією повітря, Вт/м²;

$E_{x_{exh,air}}$ – потік ексергії вологого повітря, що видихає людина, Вт/м²;

$E_{x_{sw,ha}}$ – потік ексергії водяної пари, що появляється за рахунок секрету шкіри, Вт/м²;

$E_{x_{stored,cr}}$ – потік ексергії, що накопичується в ядрі, Вт/м²;

$E_{x_{stored,sk}}$ – потік ексергії, що накопичується в оболонці, Вт/м²;

$E_{x_{cons}}$ – потік ексергії, що споживається людським тілом, Вт/м².

Всі складові енергетичного та ексергетичного балансів людини визначаються для 1м² площі тіла людини, для включення теплоти, що надходить від людини у тепловий баланс приміщення, площа тіла людини визначається відповідно до наступного співвідношення [98]:

$$F_l = 0,203 \cdot l^{0,725} \cdot p^{0,425}, \quad (2.62)$$

де F_l – площа тіла людини, м²;

l – висота, м;

p – маса тіла людини, кг.

Ексергія теплоти, що обумовлена обміном речовин розраховується відповідно до [112]:

$$E_{x_m} = M \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{cr}}\right). \quad (2.63)$$

Ексергія рідини, що генерується в ядрі за рахунок метаболізму [110]:

$$E_{x_{gen,cr}} = V_{w,core} \cdot \rho_w \cdot \left\{ c_{p,w} \left[(T_{cr} - T_0) - T_0 \cdot \left(\ln \frac{T_{cr}}{T_0} \right) \right] + \frac{R}{X_w} T_0 \cdot \ln \frac{p_{sv,T_0}}{p_{v0}} \right\}, \quad (2.64)$$

де $V_{w,core}$ – об'ємна швидкість руху води, що генерується у ядрі, (м³/с)/м²;

ρ_w – густина води, кг/м³ ($\rho_w = 1000$ кг/м³);

$c_{p,w}$ – питома теплоємність води, Дж/кг·К ($c_{p,w}=4186$ Дж/кг·К);

R – постійна газова стала, Дж/(моль·К) ($R=8,314$ Дж/(моль·К));

X_w – молярна маса молекули води, г/моль ($X_w=18,05$ г/моль);

p_{sv,T_0} – тиск насиченої водяної пари, за температури зовнішнього повітря, Па;

p_{v0} – тиск водяної пари, за температури зовнішнього повітря, Па.

Ексергія рідини, що генерується в оболонці за рахунок метаболізму [107]:

$$Ex_{gen,sk} = V_{w,shell} \cdot \rho_w \cdot \left\{ c_{p,w} \left[(T_{sk} - T_0) - T_0 \cdot \left(\ln \frac{T_{sk}}{T_0} \right) \right] + \right. \\ \left. + T_0 \cdot \frac{R}{X_w} \left[\ln \frac{p_{sv,T_0}}{p_{v0}} + \frac{P - p_{vr}}{P - p_{v0}} \right] \right\}, \quad (2.65)$$

де $V_{w,shell}$ – об'ємна швидкість води, що генерується оболонкою у вигляді поту, (м³/с)/ м²;

P – тиск атмосферного повітря, Па;

p_{vr} – тиск водяної пари у кімнаті, Па.

Ексергія вологого повітря, що вдихає людина [107]:

$$Ex_{inh,air} = V_{in} \cdot \left\{ \left[c_{p,a} \left(\frac{X_{da}}{R \cdot T_{ra}} \right) (P - P_{vr}) + c_{p,v} \left(\frac{X_{da}}{R \cdot T_{ra}} \right) P_{vr} \right] \cdot \left[(T_{ra} - T_0) - T_0 \cdot \left(\ln \frac{T_{ra}}{T_0} \right) \right] + \right. \\ \left. + \frac{T_0}{T_{ra}} \left[(P - P_{vr}) \cdot \ln \left(\frac{P - P_{vr}}{P - P_{v0}} \right) + P_{vr} \left(\ln \frac{P_{vr}}{P_{v0}} \right) \right] \right\} \quad (2.66)$$

де V_{in} – об'ємна швидкість повітря, що вдихається, (м³/с)/м²;

$c_{p,a}$ – питома теплоємність сухого повітря, Дж/(кг К) ($c_{p,a}=1005$ Дж/(кг К));

X_{da} – молярна маса сухого повітря, г/моль (28,97 г/моль);

$c_{p,v}$ – питома теплоємність водяної пари, Дж/кг·К ($c_{p,v}=1846$ Дж/кг·К);

T_{ra} – температура повітря у кімнаті, К.

Ексергія випромінювання, що поглинається шкірою та одягом людини [109]:

$$Ex_{abs,sk-cl} = f_{ef} f_{cl} a_i \varepsilon_{cl} h_{rb} \frac{(T_i - T_0)^2}{(T_i - T_0)}, \quad (2.67)$$

де f_{ef} – відношення ефективної площі людського тіла що підлягає тепловому випромінюванню до площі людського тіла, покритої одягом;

f_{cl} – відношення площі людського тіла, покритої одягом до площі без одягу;

a_i – коефіцієнт поглинання між площею поверхні людського тіла та оточуючими поверхнями;

ε_{cl} – випромінювальна здатність поверхні одягу;

h_{rb} – відносний коефіцієнт теплопередачі темної поверхні;

T_i – температура i -ї поверхні, K .

Ексергія випромінювання від поверхні тіла:

$$Ex_{rad,dc} = f_{ef} f_{cl} a_i \varepsilon_{cl} h_{rb} \frac{(T_{cl} - T_0)^2}{(T_{cl} - T_0)}. \quad (2.68)$$

Ексергія, що передається конвекцією повітря:

$$Ex_{conv} = f_{cl} h_{ccl} \cdot (T_{cl} - T_{ra}) \left(1 - \frac{T_0}{T_{cl}}\right), \quad (2.69)$$

де h_{ccl} – середній коефіцієнт теплопередачі поверхні людського тіла, вкритої одягом, $Вт/(м^2 \cdot K)$.

Ексергія вологого повітря, що видихає людина:

$$Ex_{exh,air} = V_{out} \left\{ \left[c_{p,a} \left(\frac{X_{da}}{R \cdot T_{cr}} \right) (P - P_{vs}(T_{cr})) + c_{p,v} \left(\frac{X_{da}}{R \cdot T_{cr}} \right) P_{vs}(T_{cr}) \right] \times \right. \\ \left. \times \left[(T_{cr} - T_0) - T_0 \cdot \left(\ln \frac{T_{cr}}{T_0} \right) \right] + \right. \\ \left. + \frac{T_0}{T_{cr}} \left[(P - P_{vs}(T_{cr})) \cdot \ln \left(\frac{P - P_{vs}(T_{cr})}{P - P_{v0}} \right) + P_{vs}(T_{cr}) \left(\ln \frac{P_{vs}(T_{cr})}{P_{v0}} \right) \right] \right\} \quad (2.70)$$

де V_{out} – об'ємна швидкість повітря, що видихається, $(м^3/с)/м^2$;

$P_{vs}(T_{cr})$ – тиск насиченої водяної пари для температури ядра, $Па$.

Ексергія водяної пари, що появляється за рахунок секрету шкіри [110]:

$$Ex_{sw,ha} = V_{w,shell} \cdot \rho_w \cdot \left\{ c_{p,v} \left[(T_{cr} - T_0) - T_0 \cdot \left(\ln \frac{T_{cr}}{T_0} \right) \right] + \right. \\ \left. + \frac{R}{X_w} \left[\ln \left(\frac{P_{vr}}{P_{v0}} \right) + \frac{P - P_{vr}}{P_{vr}} \cdot \left(\ln \frac{P - P_{vr}}{P - P_{v0}} \right) \right] \right\} \quad (2.71)$$

Складові ексергетичного балансу розраховувалися відповідно до емпіричних співвідношень представлених у роботах [104–113] параметри навколишнього середовища приймаються сталими, накопичення енергії та ексергії у оболонці та ядрі не враховується.

Представлена методика розрахунку, побудована на показниках теплового комфорту PMV , PPD та на споживанні ексергії людським тілом дозволяє встановити сукупність цих та інших факторів, що забезпечує потрібний рівень комфортності.

2.5. Алгоритм розрахунку комфортної температури відповідно до ексергетичного підходу

Розроблено алгоритм розрахунку комфортної температури повітря у кімнаті відповідно до ексергетичного підходу, який представлено на рис. 2.6. Відповідно до ексергетичного підходу людський організм функціонує найкраще за умови мінімального споживання чи деструкції ексергії людським тілом, тому основним завданням є визначення мінімального значення споживання ексергії людським тілом та відповідної йому температури повітря у кімнаті при сталих інших параметрах мікроклімату. Згідно із запропонованим алгоритмом мінімум функції однієї змінної визначається методом перебору. Апробація ексергетичної моделі людини представлена у роботі [10], дані кореспондуються з джерелом [111].

Комп'ютерна модель, що реалізує зазначений алгоритм, і побудована з використанням емпіричних співвідношень (2.40 – 2.71) у середовищі Mathcad, представлена у додатку Б.

Запропонований алгоритм та комп'ютерна модель дозволяють визначити температуру повітря у кімнаті, що відповідає мінімуму споживання ексергії

людським тілом. Тобто відповідає умовам, у яких людський організм функціонує найкраще, відповідно до другого закону термодинаміки. Тому опиратися на умови, де деструкція ексергії буде найменшою є доцільніше під час проектування систем теплопостачання, ніж опиратися на показник прогнозованої середньої оцінки тепловідчуттів людини.

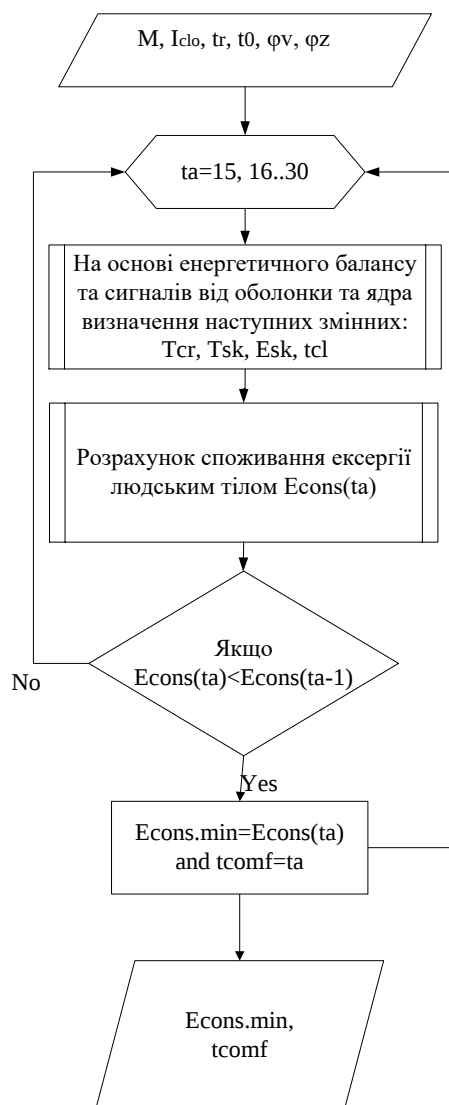


Рис. 2.6 – Алгоритм розрахунку комфортної температури повітря у кімнаті відповідно до ексергетичного підходу

2.6. Методика розрахунку середньої радіаційної температури

Розроблено методику визначення середньої радіаційної температури на базі ефективних потоків внутрішніх поверхонь огорожень на основі комп'ютерної

моделі, представленої авторами [141]. Комп'ютерна модель описує приміщення з однією зовнішньою стіною та вікном. У стаціонарному тепловому балансі враховано втрати теплопередачею через зовнішню стіну та вікно, теплові надходження від сонячної радіації через вікно та від внутрішніх джерел та опалення, втрати на вентилявання приміщення. Приймається, що значення температур для кожної внутрішньої поверхні та повітря має усталені значення. Сонячна радіація після потрапляння в приміщення через вікна, а також власне теплове випромінювання та радіаційні характеристики поверхонь мають дифузний характер. Також приймемо, що теплофізичні властивості матеріалу огорожувальних конструкцій не залежать від температури. У комп'ютерну модель будівлі, представлену авторами [141] включено прилад опалення та враховано його власний та ефективний тепловий потік. Нижче представлені співвідношення, що стосуються приладу опалення, інші рівняння детально описані у [141].

Рівняння теплового балансу кімнати[142]:

$$Q_v + Q_3 = Q_{o\Sigma} + Q_{\text{TH}} + Q_{\text{p.v.2}}, \quad (2.72)$$

де Q_v – втрати теплоти вентиляцією, Вт;

Q_3 – тепловтрати через зовнішні огорожувальні конструкції, Вт;

$Q_{o\Sigma}$ – теплонадходження від опалювальних приладів, Вт;

Q_{TH} – додаткові теплонадходження [33], Вт.

Рівняння балансу енергії для опалювального приладу [142, 143]:

$$Q_{o\Sigma} = Q_o' + Q_o''; \quad (2.73)$$

$$Q_o' = Q_{\text{OK}}' + Q_{\text{OP}}'; \quad (2.74)$$

$$Q_o'' = Q_{\text{OK}}'' + Q_{\text{OP}}''; \quad (2.75)$$

$$Q_o' = F_o \cdot \alpha_o (t_o - t_{\text{BH}}) + A_{\text{пр}} \cdot \sigma \cdot (T_o^4 - T_{\text{BH}}^4); \quad (2.76)$$

$$Q_{\text{OK}}'' = F_o \cdot \frac{t_o - t_{30}}{R_{\alpha 3}}; \quad (2.77)$$

$$Q_{op}'' = A_{пр} \cdot \sigma \cdot (T_o^4 - T_{30}^4); \quad (2.78)$$

$$A_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{A_{o1}} + \frac{1}{A_1} - 1}, \quad (2.79)$$

де $Q_{o\Sigma}$ – теплонадходження від опалювального приладу, Вт;

Q_o' – кількість теплоти, що надходить від опалювального приладу в кімнату, Вт;

Q_o'' – кількість теплоти, що віддається опалювальним приладом зовнішній стіні, Вт;

$Q_{ок}'$, $Q_{ок}''$ – кількість теплоти, яка передається шляхом конвективного теплообміну, Вт;

Q_{op}' , Q_{op}'' – кількість теплоти, яка передається шляхом радіаційного теплообміну, Вт;

F_o – площа приладу опалення, м²;

α_o – коефіцієнт тепловіддачі опалювального приладу Вт/м²·°С;

t_o , $t_{вн}$, t_3 – температура приладу опалення, внутрішнього повітря, зовнішнього повітря відповідно, °С;

t_{30} – температура на поверхні зовнішньої стіни з внутрішньої сторони, °С;

σ – постійна Стефана – Больцмана ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴));

$A_{пр}$ – приведений коефіцієнт поглинання для приладу опалення й зовнішньої стіни;

A_{o1} , A_1 – коефіцієнти поглинання теплового випромінювання для приладу опалення та зовнішньої стіни відповідно;

$R_{\alpha z}$ – термічний опір тепловіддачі пристінного прошарку, м²·°С/Вт.

Рівняння теплопереносу назовні від внутрішньої поверхні стіни за приладом опалення [142]:

$$Q_3''' = F_0 \frac{t_{30} - t_3}{R_{\alpha_3} + R_3}; \quad (2.80)$$

$$Q_0'' = Q_3''' \quad (2.81)$$

де Q_3''' – тепловтрати через зовнішню стіну за приладом опалення, Вт;

R_3 – термічний опір теплопровідності зовнішньої стіни, (м²·°C)/Вт.

Значення ефективних та результуючих потоків теплової та сонячної радіації, а також власний тепловий потік для приладу опалення [143]:

$$Q_{\text{рез.о.1}} = Q_{\text{эф.о.1}} - Q_{\text{во.1}} \cdot \varphi_{\text{во-о}}; \quad (2.82)$$

$$Q_{\text{рез.о.2}} = Q_{\text{эф.о.2}} - Q_{\text{во.2}} \cdot \varphi_{\text{во-о}}; \quad (2.83)$$

$$Q_{\text{эф.о.1}} = Q_{\text{рез.о.1}} \cdot \left(1 - \frac{1}{A_{\text{o1}}}\right) + \frac{Q_{\text{е.о.1}}}{A_{\text{o1}}}; \quad (2.84)$$

$$Q_{\text{эф.о.2}} = Q_{\text{рез.о.2}} \cdot \left(1 - \frac{1}{A_{\text{o2}}}\right); \quad (2.85)$$

$$Q_{\text{е.о.1}} = F_0 \cdot \sigma \cdot A_{\text{o1}} \cdot T_0^4, \quad (2.86)$$

де $Q_{\text{рез.о.1}}$ – результуючий потік теплового випромінювання приладу опалення, Вт;

$Q_{\text{рез.о.2}}$ – результуючий потік сонячної радіації від приладу опалення, Вт;

$Q_{\text{эф.о.1}}$ – ефективний потік теплового випромінювання від приладу опалення, Вт;

$Q_{\text{эф.о.2}}$ – ефективний потік сонячної радіації приладу опалення, Вт;

$Q_{\text{е.о.1}}$ – власний потік теплового випромінювання від приладу опалення, Вт;

A_{o2} – коефіцієнт поглинання сонячного випромінювання для приладу опалення.

Подібні рівняння ефективних, власних і результуючих потоків теплової та сонячної радіації сформульовані для зовнішньої стіни, вікна й внутрішніх стін, зведені в енергобалансі, який слугує для визначення температур поверхонь [141].

Для врахування впливу відбиття сонячної радіації та теплового випромінювання розроблено методику визначення радіаційної температури на базі ефективних потоків внутрішніх поверхонь огорожень і приладу опалення:

$$t_i = ((t_{im} + 273)^4 + \frac{0,179 \cdot 10^8 \cdot Q_{ef2i}}{F_i})^{0,25} - 273; \quad (2.87)$$

$$t_r = \frac{\sum_{i=1}^n F_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (2.88)$$

де t_{im} – температура огорожувальної конструкції, що визначається на основі моделі, яка враховує власний теплообмін огорожувальних конструкцій тепловим випромінюванням та сонячною радіацією, °C;

Q_{ef2i} – ефективний потік сонячної радіації для i -ї огорожувальної конструкції, Вт;

F_i – площа огорожувальної конструкції, м².

Комп'ютерна модель, що дозволяє врахувати вплив відбиття сонячної радіації та теплового випромінювання на температуру повітря в кімнаті та визначати середню радіаційну температуру представлено у додатку В.

Комп'ютерна модель описує приміщення з однією зовнішньою стіною та вікном, у випадку, якщо зовнішніх стін – дві, то для врахування впливу сонячної радіації під час розрахунку середньої радіаційної температури можна скористатися підходом, що визначає середню радіаційну температуру, як середньозважену по площах (2.88), а температуру на внутрішній поверхні світлопрозорої огорожувальної конструкції пропонується розраховувати так:

$$t_v = \sqrt[4]{\frac{P_s + P_v}{\sigma}} - 273, \quad (2.89)$$

де P_s – середнє значення потужності сонячного випромінювання, що надходить на вертикальну поверхню, відповідної орієнтації, Вт;

P_v – потужність власного випромінювання, Вт.

Температура на внутрішній поверхні зовнішніх огорожувальних конструкцій визначається [142]:

$$t_i = t_{\text{вн}} - \frac{t_{\text{вн}} - t_z}{R_3 \cdot R_{\alpha 3}} \quad (2.90)$$

Температура інших огорожувальних конструкцій приймається рівною температурі повітря в кімнаті $t_{\text{вн}}$.

Запропоновано два підходи для розрахунку середньої радіаційної температури приміщення, що є одним із найвпливовіших факторів на відчуття теплового комфорту людиною [73, 111]. Перший – дозволяє враховувати ефективний та власний потік сонячного та теплового випромінювання від огорожувальних конструкцій та приладу опалення, однак комп'ютерна модель розроблена для приміщення з однією зовнішньою стіною, другий – забезпечує спрощення розрахунків та дозволяє враховувати надходження сонячної радіації.

2.7. Ексергоекономічний аналіз та ексергоекономічні показники

Термoeкономічна оцінка проекту енергетичної системи пов'язана з визначенням для кожного компонента системи таких характеристик [86]: 1) ексергетичного ККД ε_k ; 2) дисипації ексергії, E_D та ексергетичних втрат, E_L ; 3) капіталовкладень Z_k , експлуатаційних витрат та вартості технічного обслуговування Z_e , їх суми, Z ; 4) вартості дисипації ексергії, Z_D ; 5) відносної різниці вартостей, r_k ; 6) ексергоекономічного фактору, $f_k = \frac{Z_k}{Z_k + c_{p,k}(E_{D,k} + E_{L,k})}$.

Для вибору джерела теплоти у комплексі з огорожувальними конструкціями (модель дослідження представлена на рис. 2.7) пропонується аналізувати наступні показники:

- 1) ексергетичний ККД для джерела теплоти;
- 2) питома вартість ексергії, що споживається системою;
- 3) капіталовкладення Z_k ;

4) вартість одиниці ексергії, що втрачається через огорожувальні конструкції та на вентиляцію.

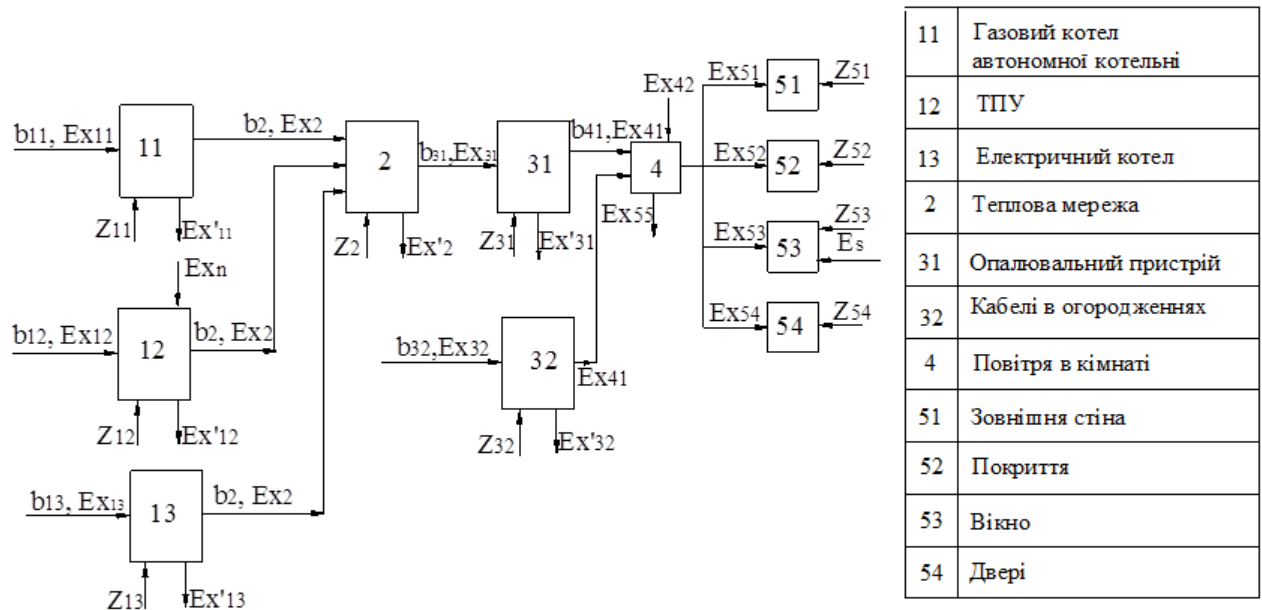


Рис. 2.7 – Ексергоекономічна модель будівлі з різними джерелами теплоти

Ексергетична ефективність джерела теплоти визначається[47]:

$$\eta_{ex} = 1 - \frac{Ex_{1i}^D}{Ex_{1i}}, \quad (2.89)$$

де Ex_{1i}^D – значення деструкції ексергії;

Ex_{1i} – ексергія палива, що споживається джерелом теплоти.

Рівняння балансу ексергетичної вартості для системи в цілому матиме вигляд [144]:

$$b_5 \sum_i Ex_{5i} = \sum_j b_{1j} Ex_{1j} + \sum Z, \quad (2.90)$$

де b_{1j} – ціна потоку ексергії палива для системи ДК, \$/кВт·год;

b_5 – ціна потоку ексергії продукту, \$/кВт·год.

Відповідно до рівняння ексергоекономічного балансу:

$$c_5 = \frac{\sum_j c_{pj} Ex_{pj} + \sum Z}{\sum_i Ex_{5i}} \quad (2.91)$$

де c_p – вартість одиниці ексергії палива, що надходить в систему, \$/кВт·год;

E_{x_p} – ексергія палива, що надходить в систему, кВт·год;

E_{x_5} – ексергія, що втрачається будівлею через огорожувальні конструкції та на вентиляцію, кВт·год;

j – джерело теплоти.

Капітальні витрати на покращення теплового захисту визначаються згідно з співвідношеннями (2.16), а на джерело теплоти під час покращення теплового захисту відповідно до (2.15). Ціна потоку ексергії продукту є основним термoeкономічним критерієм порівняння та оптимізації роботи теплових насосів [144]. Більшість дослідників визначають термoeкономічні показники для однієї години роботи обладнання [83, 84, 86, 87]. У даному випадку оберемо інтервал часу, рівний опалювальному періоду, враховуючи специфіку забезпечення теплового комфорту у системі ДК. Ціну потоку ексергії продукту для системи обираємо в якості термoeкономічного критерію оптимальності будівлі:

$$b_5 = \frac{b_p E_p + \sum_j Z_j \cdot k_j}{\sum_i E_{5i}} \quad (2.92)$$

де k_j – частки відрахування від вартості обладнання [145];

j – ті елементи системи, капітальні витрати на які враховуються;

E_{5i} – втрати ексергії в огорожувальних конструкціях та на вентиляцію, кВт·год.

Вартість ексергії, що затрачається на виробництво одиниці продукції, широко застосовується в термoeкономічному аналізі [83–85]. Враховуючи те, що ексергія в будівлях втрачається через огорожувальні конструкції та на вентиляцію, для забезпечення відповідного теплового комфорту, можна визначати середню вартість одиниці ексергії, що втрачається будівлею не за опалювальний період, а за певний проміжок часу, рівний терміну експлуатації системи опалення. Даний підхід дозволяє врахувати зміну в часі вартості спожитих енергоносіїв і термoeкономічний критерій оптимальності пропонуємо розраховувати так:

$$b_5' = \frac{\sum_{\tau=1}^n \frac{b_p E_p (1+l_i)^\tau}{(1+E)^\tau} + \sum_n Z_{k,i} \cdot k_i + \sum_n \frac{Z_{e,i}}{(1+E)^n}}{\sum_n E_5} \quad (2.93)$$

де n – глибина розрахунку, роки;

$Z_{i,j}$ – капітальні затрати на кожній ділянці термoeкономічної моделі, грн.;

E – ставка дисконтування, обґрунтовується відповідно до економічної ситуації та фінансування;

l – коефіцієнт приросту цін на одиницю ексергії енергоресурсів.

Запропонована методика ексергоекономічного аналізу системи ДК. Представлено два ексергоекономічних критерії для комплексного вибору джерела теплоти та огорожувальних конструкцій будівлі: перший критерій визначає вартість втрат ексергії для забезпечення комфортних умов у будівлі за опалювальний період; другий показник оцінює вартість втрат ексергії для забезпечення комфортних умов у будівлі за n років і дозволяє врахувати зміну вартості енергоносіїв в часі.

Висновки до розділу

1. Розроблено методику комплексного вибору джерела теплоти та огорожувальних конструкцій будівлі на основі функції інтегральної вартості системи, що дозволяє враховувати зміну вартості енергоносіїв в часі та рівень інфляції. А також запропоновано використовувати функцію інтегральної вартості системи на базі теорії нечітких множин для врахування зміни вартості енергоносіїв в часі. Розвиваючи дану методику слід враховувати можливість зонного обліку енергоносіїв, регульовану зміну температури в приміщенні, а також проводити оптимізацію роботи системи на основі економічного критерію під час використання кількох джерел теплоти.

2. Представлено методику аналізу потоків енергії та ексергії для системи ДК. Обґрунтовано доцільність застосування показника ефективності використання первинного палива та аналогічного ексергетичного критерію для порівняння різних будівель, оскільки він залежить від захисних властивостей огорожувальних конструкцій і від обраного джерела теплоти.

3. Описано стаціонарну енергетичну та ексергетичну модель теплового комфорту людини та розроблено алгоритм для розрахунку комфортної температури відповідно до ексергетичного підходу.

4. Показано, що доступні комп'ютерні моделі, дозволяють оцінити показники теплового комфорту для енергетичної моделі та значення складових ексергетичного балансу та споживання ексергії людським тілом для визначених параметрів навколишнього середовища. Для забезпечення відповідного рівня теплового комфорту та для зниження енергоспоживання будівлі без шкоди здоров'ю людини необхідно орієнтуватися на температуру повітря у кімнаті, що є комфортною згідно з енергетичним чи ексергетичним підходом, тому розроблена комп'ютерна модель для розрахунку комфортної температури відповідно до двох підходів.

5. Розроблено методику визначення середньої радіаційної температури на базі ефективних потоків внутрішніх поверхонь огорожень на основі комп'ютерної моделі приміщення з однією зовнішньою стіною та вікном. Запропоновано ще один метод розрахунку середньої радіаційної температури, що враховує надходження сонячної радіації.

6. Представлена методика ексергоекономічного аналізу системи ДК. Запропоновано два ексергоекономічних критерії для комплексного вибору джерела теплоти та огорожувальних конструкції будівлі: перший критерій визначає вартість втрат ексергії для забезпечення комфортних умов у будівлі за опалювальний період; другий показник оцінює вартість втрат ексергії для забезпечення комфортних умов у будівлі за n років і дозволяє врахувати зміну вартості енергоносіїв в часі.

Основні наукові результати розділу опубліковані у працях [10–18].

РОЗДІЛ 3. ІНТЕГРАЛЬНА ВАРТІСТЬ СИСТЕМИ «ДЖЕРЕЛО ТЕПЛОТИ – ОГОРОДЖУВАЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ»

3.1. Характеристики моделі дослідження

Для аналізу обрано кімнату в м. Києві, побудовану в 1981 році з однією зовнішньою стіною, розміри кімнати – 4×4 м². Потреба на опалення кімнати приводиться до потреби на опалення будівлі, відповідно до наступного співвідношення:

$$Q_6 = Q_k(F_i, R_i), \quad (3.1)$$

де F_i – площа i -ї огорожувальної конструкції, м²;

R_i – термічний опір i -ї огорожувальної конструкції, (м²·°C)/Вт.

Базові параметри моделі дослідження наведені в табл. 3.1 та рис. 3.1., а характеристики зовнішнього клімату – в табл. 3.2. Всі дані, щодо параметрів зовнішнього мікроклімату обрано відповідно до ДСТУ [146]. Проаналізувавши ринкові ціни на газові, електричні котли, теплові насосні установки (ТНУ) та кабельне електроопалення, визначено середню вартість установки кожного виду у розрахунку на установлений 1 кВт потужності, витрати на обслуговування, та оцінка їх енергоефективності, результати у табл.3.3. Для проведення попередніх техніко-економічних розрахунків ККД газових котлів прийняті на рівні 85%, що відповідає значенням, які приймають при обґрунтуванні інвестиційних проектів [147], а також відповідають міжнародним стандартам [148], COP теплового насоса приймається рівним 3, а ККД електричного котла = 0,98, така енергоефективність приймається для розрахунку сумарних витрат, як критерію оцінки енергоефективних проектів [149]. Ринкові ціни на джерела теплоти та вартість енергоносіїв для населення [150–152] в м. Києві взята станом на початок 2017 року. Вартісна та теплотехнічна оцінка різних теплоізоляційних матеріалів представлена у табл. 3.4, теплопровідність матеріалів відповідає [153], нормальним умовам експлуатації. А вартісна оцінка проводилася із врахуванням теплопровідності та густини теплоізоляційного матеріалу.

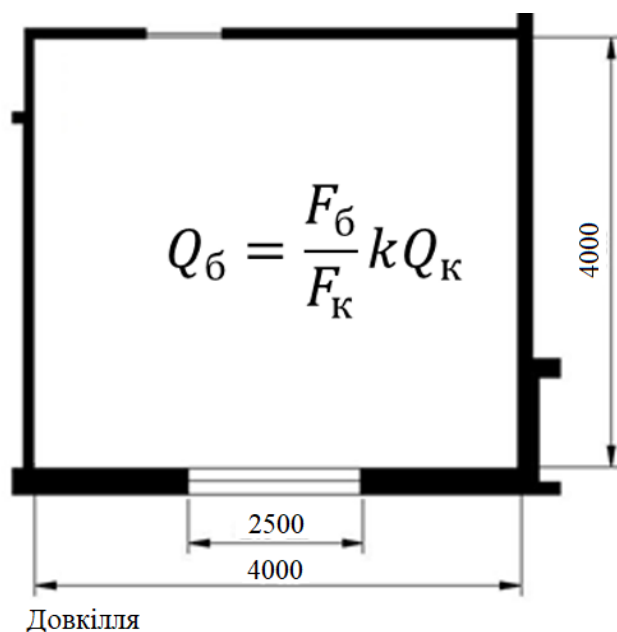


Рис. 3.1. Модель кімнати

Таблиця 3.1 – Базові параметри моделі дослідження

Віртуальна модель кімнати	
Площа зовнішньої стіни F_z , м ²	6,25
Площа вікна F_v , м ²	3,75
Площа внутрішніх огорожувальних конструкцій, м ²	62
Термічний опір зовнішньої стіни R_z , м ² ·°C/Вт	0,8
Термічний опір вікна R_v , м ² ·°C/Вт	0,17
Кратність повітрообміну n , год ⁻¹	1

Таблиця 3.2. – Характеристики зовнішнього клімату

Параметри внутрішнього та зовнішнього (оточуючого) середовища	
Температура повітря довкілля T_o , К	273
Відносна вологість довкілля φ_o , %	78
Відносна вологість повітря в кімнаті, φ_v , %	50
Атмосферний тиск, Па	101325
Середня потужність надходження сонячної радіації на вертикальну поверхню Вт/м ²	30

Таблиця 3.3. – Характеристика джерела теплоти

Джерело теплоти	Питомі капітальні затрати €/кВт	Коефіцієнт енергоефективності η	Ціна енергоносія станом 1.01.17	Питомі річні витрати на обслуговування, €/кВт·рік
Автономний котел	33	0,85	7,17 Євро/ГДж	3
Конденсаційний котел	38	1,1		3
Електричний котел	29	0,98	0,031 Євро/кВт·год	1
ТНУ	570	3		1
Кабельне опалення	76	0,99		1
Централізоване теплопостачання	-	-	50,57 Євро/Гкал	-

Таблиця 3.4. – Характеристики теплоізоляційних матеріалів

Тип ізоляційного ма- теріалу	Теплопровідність, λ , Вт/м·°С	Густина, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Вартість встановлення $A_1, \frac{\text{грн}}{\text{м}^3}$	Вартість одиниці об'єму $B_1, \frac{\text{грн}}{\text{м}^3}$
Мінераловатні вироби: Rockwool (Panelrock)	0,055	65	5	50
Скловатні вироби: Isover	0,049	60	5	75
Пінополістироли: -екструдовані	0,037	30	4	80
-термоударні	0,05	35	4	40
Газобетон	0,125	400	45	50

Для врахування приладів опалення при розрахунку інтегральної вартості системи ДК проведено вартісну оцінку приладів опалення, відповідні характеристики представлені у табл.3.5.

Таблиця 3.5. – Характеристики приладів опалення

Тип ОП	i_{cor} , Євро/м ² ·Вт	t_1' / t_2'	ΔT , К
Сталевий	0,0250	95/70	62,5
Біметалічний	0,1320	95/70	62,5
Алюмінієвий	0,0751	95/70	62,5
Низькотемпературний	0,18	50/40	25

3.2. Ретроспективний аналіз зміни цін на енергоносії

Питання ефективного використання енергоресурсів у всіх галузях, особливо населенням є не просто актуальним, а життєво важливим. Аналіз цін на

енергоресурси у країнах Європи свідчить, що зростання цін на газ для населення України буде стабільним. А за таких тенденцій потрібно оцінити терміни окупності технологічного обладнання, що споживає інші ресурси для створення відповідного мікроклімату на протязі опалювального періоду. Графіки зміни ціни на газ згідно із даними Євростату для домовласників середнього розміру (medium size householders) представлені на рис. 3.2. [154]. Найвища ціна на газ для серед країн Євросоюзу у Швеції, а найнижча – Румунії. Ціна на газ в Україні, станом на початок 2016 року на 22 % нижча, ніж у Румунії.

Графіки зміни ціни на електричну енергію згідно із даними Євростату для домовласників середнього розміру (medium size householders) представлені на рис. 3.3. [154]. Найвища ціна на електричну енергію для серед країн Євросоюзу у Данії, а найнижча – Болгарії. Ціна на електричну енергію для населення, що споживає менше 100 кВт·год в Україні, станом на початок 2016 року на 69 % нижча, ніж у Болгарії. Тенденції зниження ціни на електричну енергію у 2015 році обумовлені стрімким зростанням курсу Євро.

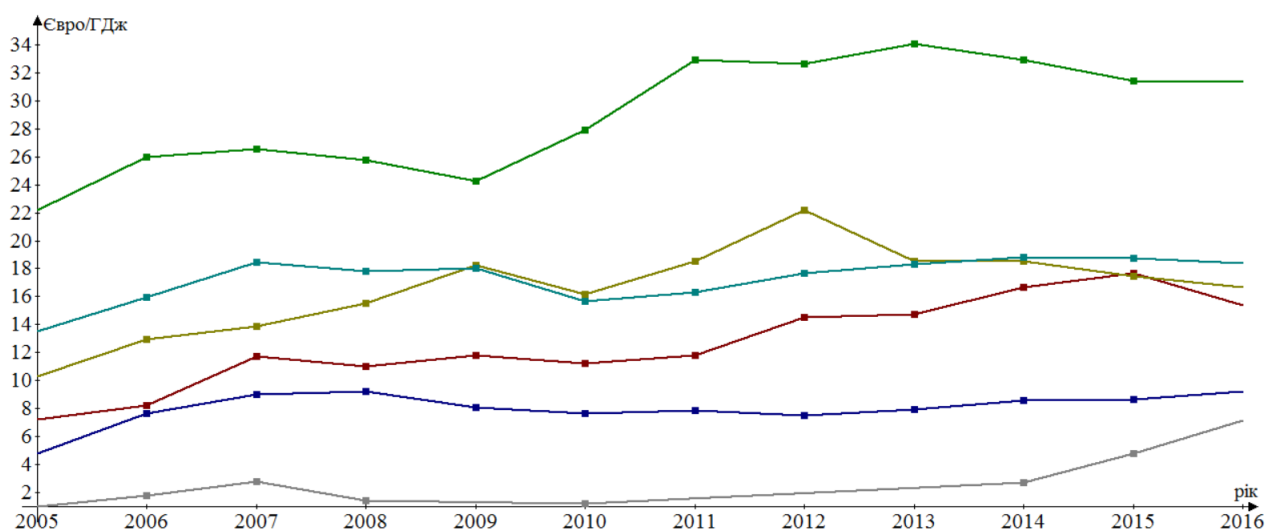


Рис. 3.2 – Графіки зміни тарифу на газ [154]:

■ — Швеція; ■ — Велика Британія; ■ — Словенія; ■ — Румунія; ■ — Німеччина; ■ — Україна

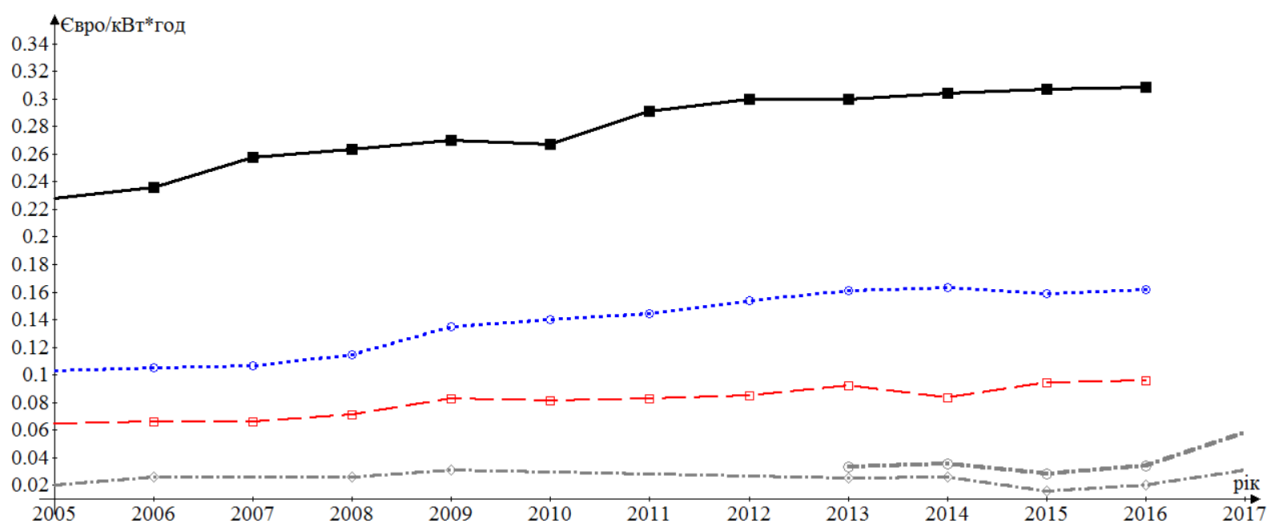


Рис. 3.3 – Графіки зміни тарифу на електричну енергію [154]

■ — Данія; □ — Болгарія; ● — Словенія; ◇ — Україна;
 ○ — Україна (споживання понад 100 кВт·год)

Значення коефіцієнтів приросту ціни на газ та електричну енергію представлено на рис. 3.4. Від'ємні значення коефіцієнту обумовлені ростом курсу євро, тому для статистичного аналізу вони не враховуються.

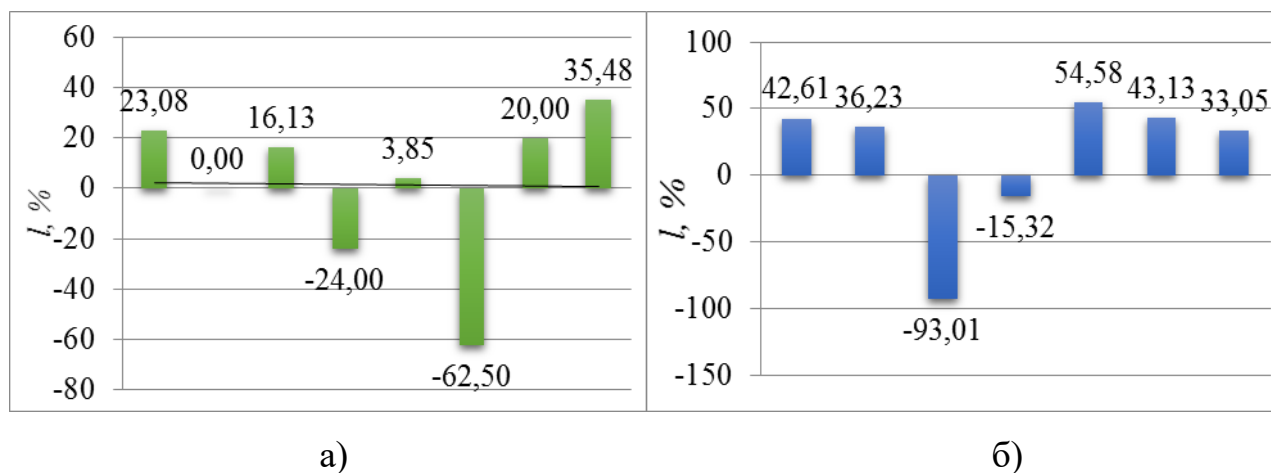


Рис. 3.4 – Коефіцієнти приросту ціни на електричну енергію (а) та газ (б)

При розрахунку середньої помилки по вибірках малої чисельності завжди потрібно користуватись незміщеною оцінкою дисперсії [155]:

$$S^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (3.2)$$

де x_i – і-е значення малої вибірки;

$\bar{x}$ – середнє значення;

n – число ступенів свободи.

Для коефіцієнта приросту цін на електричну енергію $S=12,89$, а середня помилка вибіркової середньої $\mu_l = \frac{S}{\sqrt{n}} = 4,07$. За таблицями Стюдента встановимо, що при довірчій імовірності $P = 0,95$ (рівень значущості $\alpha = 0,05$) і при $k = n - 1 = 9$ ступенях свободи варіації $t = 2,26$. Тоді гранична помилка вибірки дорівнює $\epsilon_l = t \cdot \mu_l = 9,2$. Для коефіцієнта приросту цін газ: $S=33,47$; $\mu_l = 11,15$; $\epsilon_l = 25,2$. Враховуючи велику граничну похибку розрахунку коефіцієнтів для подальших розрахунків оберемо наступні сценарії зміни цін на енергоносії: 1) оптимістичний – ціни на енергоносії не змінюються; 2) середньостатистичний – коефіцієнт приросту цін на енергоносії дорівнює середньостатистичному значенню; 3) песимістичний – коефіцієнти приросту цін на енергоносії рівні максимальному значенню із вибірки. Значення коефіцієнтів приросту цін на енергоносії l , відповідно до сценарію представлені у табл.3.6.

Таблиця 3.6. – Можливі сценарії росту цін на енергоносії

	Газ	Електрична енергія
Оптимістичний	0	0
Середньостатистичний	25	10
Песимістичний	50	35

Порівняння прогнозу із прогнозом ТОВ ЕСКО "Екологічні Системи" для газу представлено на рис. 3.5[156], для електричної енергії на рис. 3.6. Прогноз зміни тарифів на газ зроблений ТОВ ЕСКО "Екологічні Системи" має лінійний характер. Коефіцієнт приросту цін відповідно до цього прогнозу є суттєво занижений, оскільки у 2022 році тариф досягне існуючого. ТОВ ЕСКО

"Екологічні Системи" запропонували прогноз зміни тарифів на електричну енергію для промислових споживачів, нами розроблений прогноз для населення, чим обумовлена різниця за абсолютною величиною.

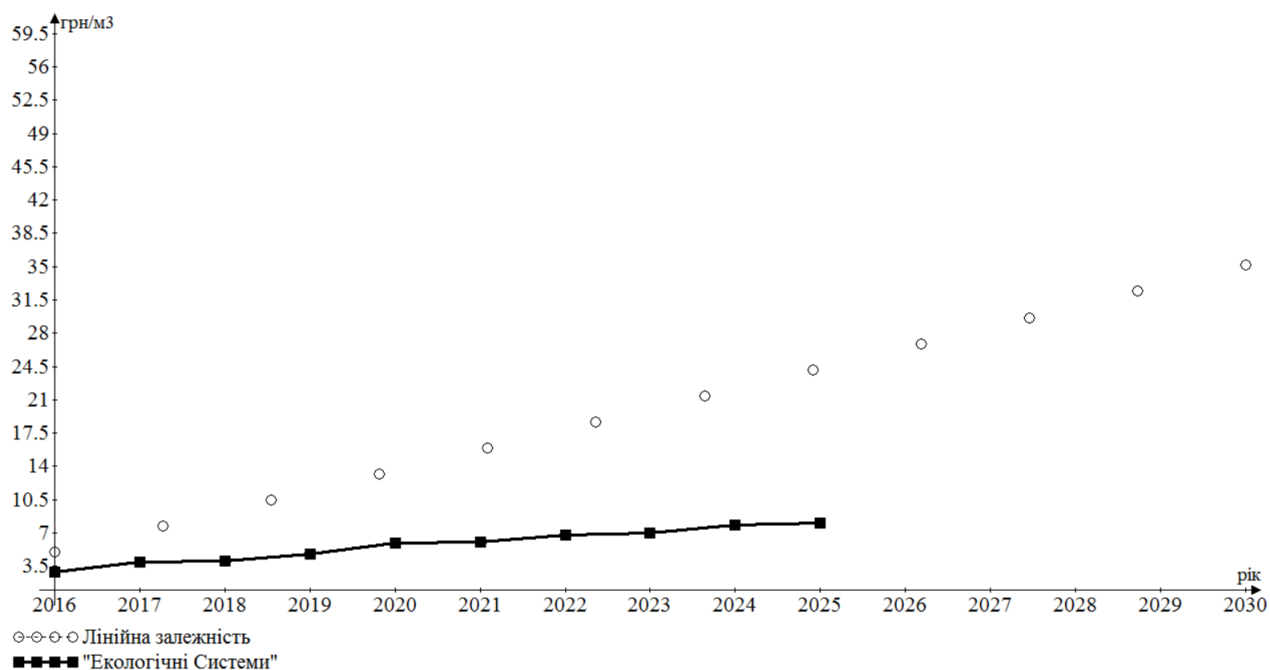


Рис. 3.5— Порівняння прогнозів щодо зміни тарифів на газ

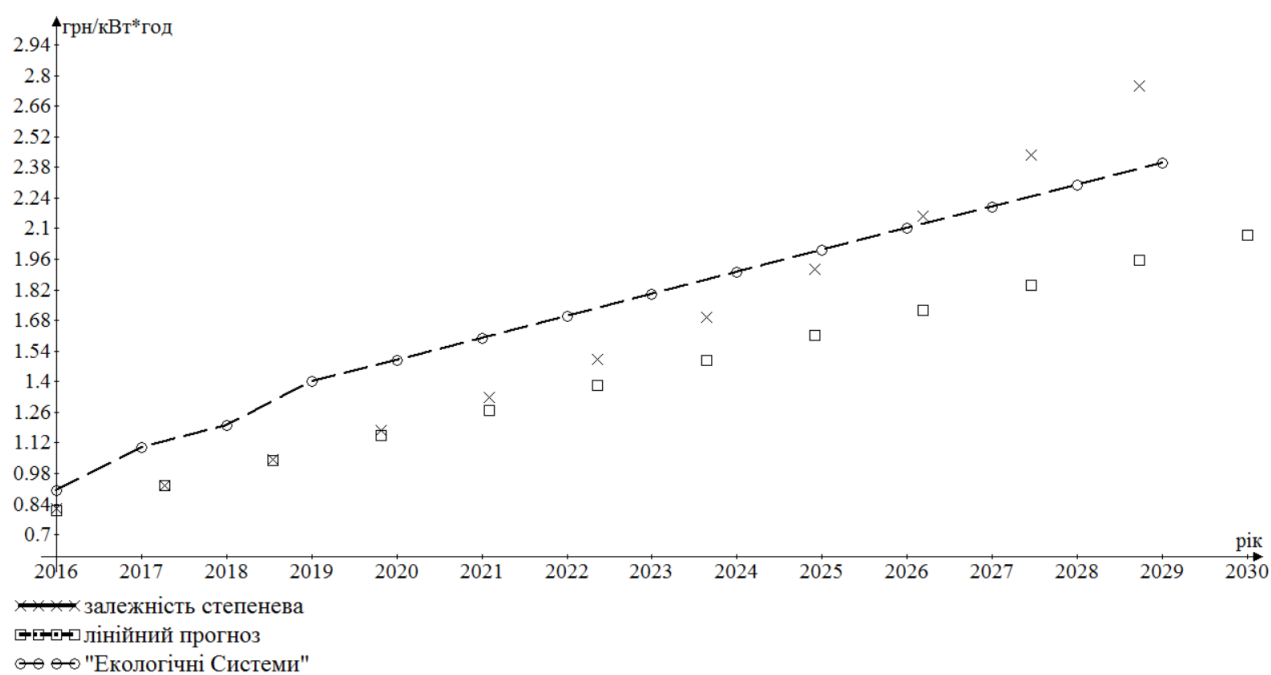


Рис. 3.6— Порівняння прогнозів щодо зміни тарифів на електричну енергію

3.3. Обґрунтування вибору ставки дисконтування

Ставка дисконту; дисконтна ставка; облікова ставка; ставка дисконтування; коефіцієнт приведення капітальних вкладень; ставка капіталізації (discount rate) – відсоткова ставка, яка використовується для визначення вартості майбутніх надходжень і зумовлена часовим фактором [129]. Для вибору джерела теплоти в комплексі з огороженнями, обґрунтування вибору ставки дисконтування в контексті різних методів, щодо її визначення, що висвітлено у працях [157, 158], є актуальним. У відповідності до проведених досліджень ставку дисконтування можна розраховувати таким чином у залежності від проекту та способу фінансування [159, 160] плюс поправка на ризик (охарактеризована у додатку Д):

1) для комерційних проектів вільна від ризику ставка може прирівнюватися до середньої процентної ставки за банківськими депозитами. Якщо рентабельність діяльності фірми вища за ставку за банківськими депозитами, то – середньому рівню рентабельності;

2) для енергоефективних проектів, що реалізуються комунальними підприємствами або/і місцевою владою, враховуючи їх соціальний і екологічний ефект, вільна від ризику ставка може дорівнювати рівню інфляції [161] плюс 1–2%;

3) якщо проект розробляється під конкретного інвестора, потрібно використовувати ті дисконтні ставки, які пропонує інвестор. Наприклад, ЄБРР для проектів розвитку міської інфраструктури пропонував в якості дисконтної ставки облікову ставку НБУ [162].

У даному випадку ставку дисконтування обираємо рівною середній процентній ставці за банківськими депозитами у євро, оскільки аналіз зміни тарифів на енергоносії проводився у євро.

3.4. Вибір економічно доцільного теплового захисту будівлі з різними джерелами теплоти

Для оцінки тенденції та зміну руху грошових потоків для системи з різними джерелами теплоти, проведемо розрахунок для 1 кВт встановленої потужності,

враховуючи середньо сезонний коефіцієнт використання встановленої потужності для умов Києва рівний 40 %. Тривалість опалювального періоду та середня температура довкілля відповідає чинним нормативам [145]. Витрати на систему опалення та її встановлення враховані для кабельного опалення, для інших варіантів вважаємо, що в кімнаті вже є встановлена система опалення, що відповідає всім вимогам. Спожиті енергоносії за опалювальний період визначаються множенням середньо сезонного коефіцієнту використання встановленої потужності на тривалість опалювального періоду і діленням на енергоефективність джерела теплоти відповідно до табл. 3.3. Результати розрахунків представлені на рис. 3.7. Графіки руху грошових потоків, як інтегральні дисконтовані питомі витрати, при застосуванні газового, електричного котлів, ТНУ, кабельного обігріву, централізованого теплопостачання (рис. 3.7 а) дозволили отримати дані про окупність систем опалення порівняно з іншими (таблиця 3.7). Термін окупності одного джерела теплоти в порівнянні з іншим визначається рівністю інтегральних дисконтованих питомих витрат, тобто точкою перетину графіків на рис. 3.7 а.

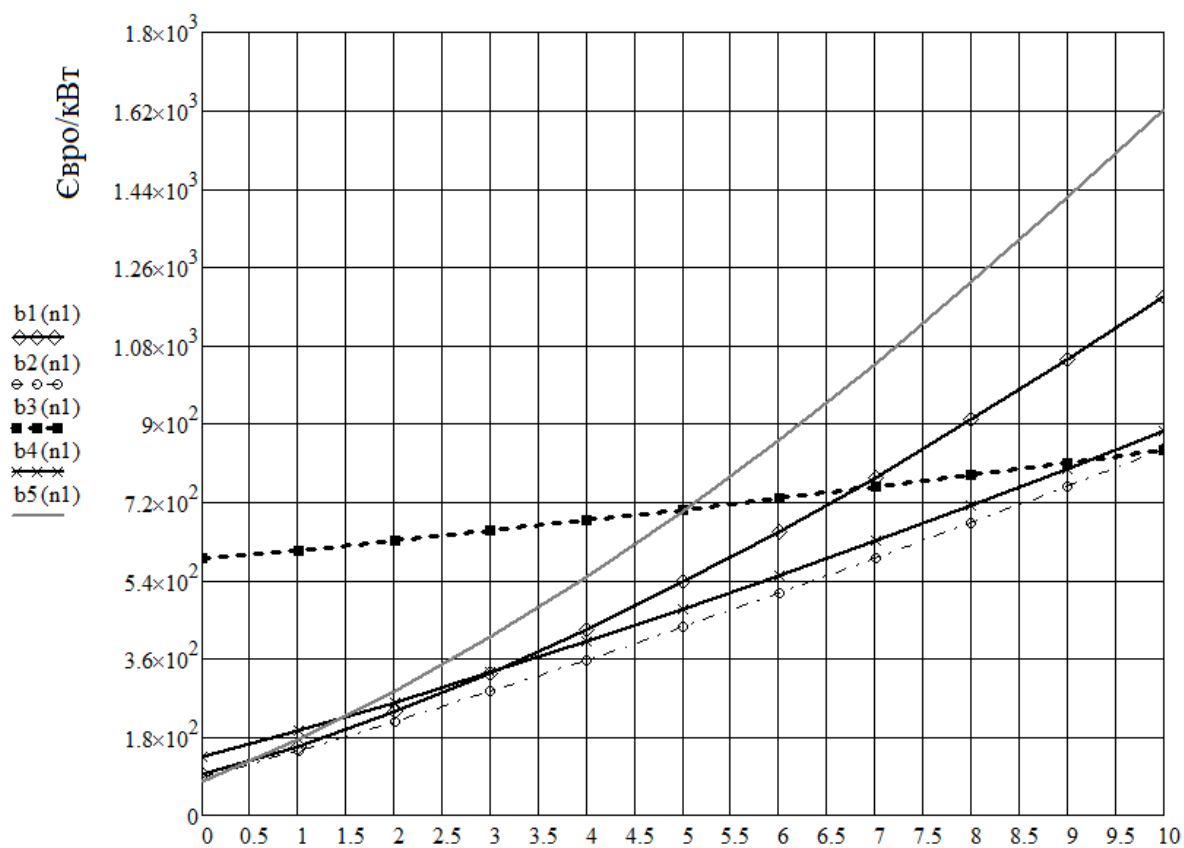
Отже нині найефективніше використовувати централізоване опалення, оскільки питомі дисконтовані витрати для якого на період часу $t=0$ є найменшими, через 0,4 року електричний котел повністю себе окупує. Через 7 років окупить себе ТНУ порівняно з газовим котлом, що пов'язано із значними початковими (капітальними) затратами. Окупність електричних джерел теплоти порівняно із газовим котлом пояснюється більшими тенденціями росту цін на газ, ніж на електроенергію.

На прикладі ТНУ проведено аналіз впливу врахування дисконтування (E) і зміни ціни на енергоносії (I), у порівнянні з результатами розрахунків, коли ці фактори враховані (рис. 3.7 б, таблиця 3.8). Врахування дисконтування є обов'язковим, коли розрахунок проводиться на термін більш ніж п'ять років. Не врахування зміни вартості енергоносіїв дає більшу зміну витрат, ніж не врахування дисконтування. При врахуванні обох факторів при терміні окупності 5

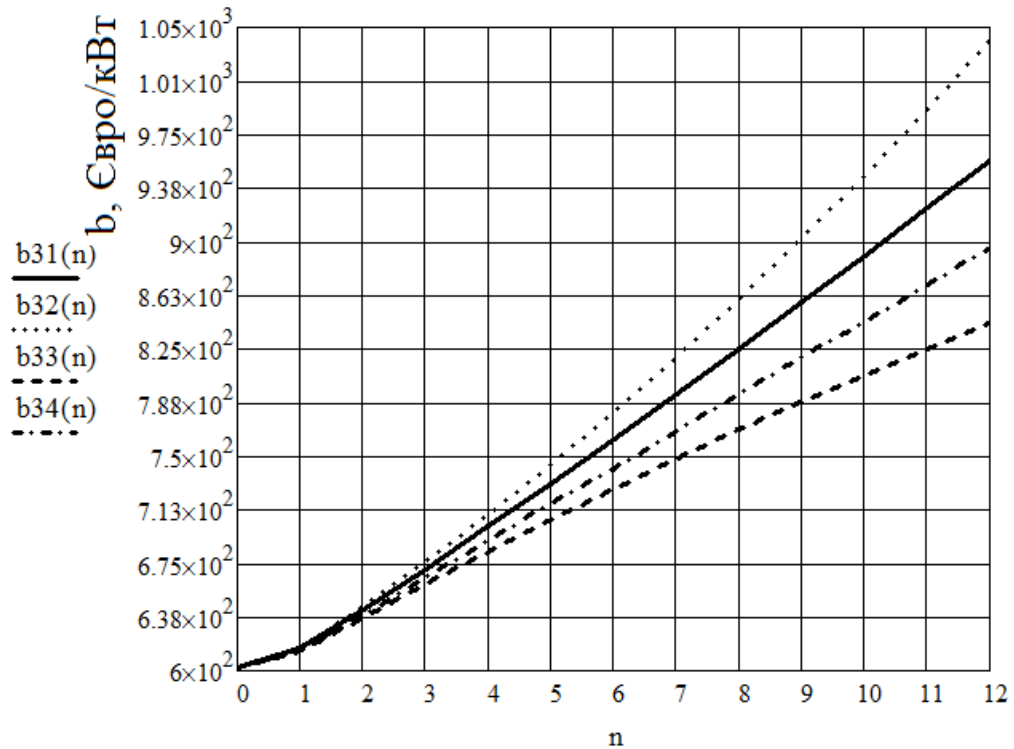
років (який є найпривабливішим для інвесторів) зміна витрат становить 3 % і при збільшенні терміну також збільшується.

Таблиця 3.7 – Термін окупності різних систем опалення

Тип системи опалення	Термін окупності порівняно з	
	Централізованим опаленням	Автономним газовим котлом
Автономний газовий котел	0,5	-
Електричний котел	0,4	-
ТНУ	5	6,8
Кабельне електроопалення	1,4	3



а)



б)

Рис. 3.7 – Графіки руху грошових потоків:

b_1 , b_2 , b_3 , b_4 , b_5 – відповідно інтегральні дисконтовані питомі витрати із застосуванням газового опалення, електроопалення, ТНУ, кабельного обігріву, централізованого теплопостачання, Євро/кВт;

b_{31} , b_{32} , b_{33} , b_{34} – відповідно інтегральні питомі витрати при використанні ТПУ, враховуючи дисконтування та зміну в часі вартості енергоносіїв, тільки дисконтування, тільки зміну в часі вартості енергоносіїв, не враховуючи ні дисконтування ні зміну в часі вартості енергоносіїв, Євро/кВт.

Таблиця 3.8 – Зміна витрат при використанні ТНУ, %

Умови розрахунку	$n=10$ років	$n=5$ років
Без врахування E	6,3	1
Без врахування l	9,4	3
Без врахування E та l	5	2

Таким чином, на прикладі ТНУ показано, що врахування l та E є доцільним, так як термін окупності ТНУ є більшим ніж 5 років (при терміні більшому ніж 5 років зміна витрат при не врахуванні l чи E досягає 10 %).

Враховуючи сучасні тенденції комплексного розгляду теплоізоляційної оболонки будівлі, розрахунок узагальненого коефіцієнту трансмісії до оточуючого середовища необхідно підвищувати термічний опір усіх огорожень, що можливо при застосуванні функції інтегральної вартості. Оптимізація термічного опору теплоізоляційного матеріалу для зовнішньої стіни на базі функції інтегральної вартості представлено нижче.

Вибір оптимального термічного опору ізоляційного матеріалу для зовнішньої стіни

Термін розрахунку прийматимемо 10 років, так як через такий час зазвичай переглядаються норми теплового захисту. На сучасному ринку представлено велике різноманіття ізоляційних матеріалів, для розрахунку оберемо різні варіанти, теплотехнічні та вартісні показники яких занесено у таблицю 3.4. Ціни на ізоляційні матеріали та джерела теплоти можуть змінюватися, однак за допомогою даного прикладу проаналізуємо запропоновану модель. На основі співвідношень (2.1, 2.5, 2.15, 2.16), знаходимо мінімум функції $B(R)$ та значення термічного опору, що відповідає цьому мінімуму (оптимальний термічний опір теплоізоляції), враховуючи те, що теплопостачання може здійснюватися від автономної котельні, електрокотла, кабельного опалення, теплової насосної установки, централізованого теплопостачання. Витрати на систему опалення не враховуються. Для аналізу обрано середньостатистичний сценарій росту цін на енергоносії. Провівши оптимізацію функції (2.1) по $R_{із}$, отримаємо її оптимальну величину для обраної моделі:

$$R_{opt} = \sqrt{\frac{F_1 \cdot (t_b - t_3) \cdot i_0 + \frac{24 \cdot F_1 \cdot D_d \cdot C}{\varepsilon} \cdot \sum_{t=0}^n \frac{(1+l)^t}{(1+E)^t}}{(A_1 + B_1 \cdot F_1) \cdot \lambda_1}} - R_1 \quad (3.3)$$

Отже термічний опір теплоізоляції залежить від вартості опалювального обладнання та його енергоефективності, вартості енергоносіїв та тенденції її

зміни в часі, від вартості та теплопровідності ізоляційного матеріалу, від площі огорожувальної конструкції, а також від характеристики погодних умов для моделі дослідження за опалювальний період. Отриманий вираз є дещо подібним до формули (2.2), однак тут конкретизовано, як саме розраховувати капітальні та експлуатаційні затрати, крім того враховане дисконтування, зміна вартості в часі енергоносіїв та зміна вартості джерела теплоти при зміні захисних властивостей огорожувальних конструкцій. На рис. 3.8 і 3.9 представлено результати оптимізації, з огляду на які можна стверджувати, що витрати на систему із електрокотлом та ізоляцією типу пінополістирол будуть найменшими. Доцільність використання певного ізоляційного матеріалу з економічної сторони обумовлена його вартістю та теплопровідністю. З розглянутих матеріалів найбільший оптимальний термічний опір має пінополістирол, при чому інтегральні дисконтовані витрати будуть найменшими.

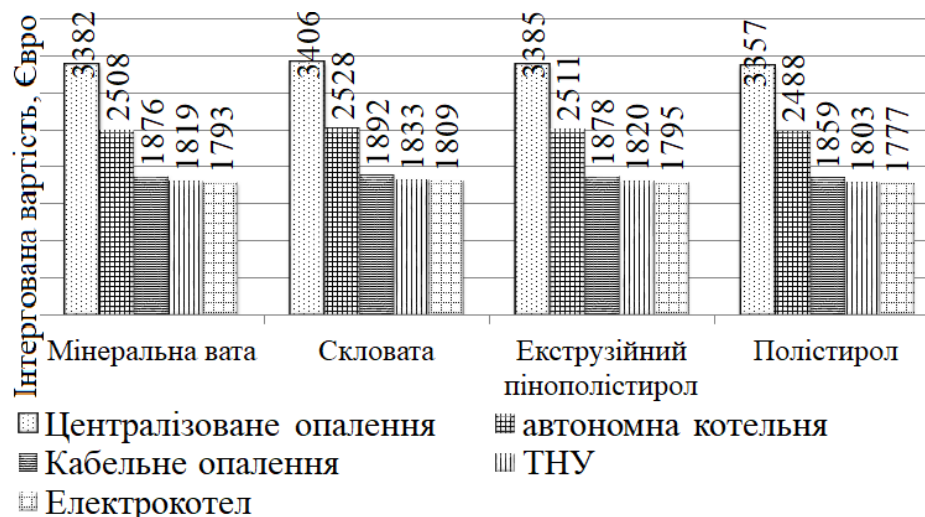


Рис. 3.8 – Залежність інтегральних дисконтованих витрат від типу ізоляційного матеріалу та джерела теплоти

Дана методика, що враховує зміну вартості в часі енергоносіїв, дала можливість отримати оптимальні значення термічного опору для різних джерел теплоти. Слід також відзначити, що згідно з отриманими результатами найвищий термічний опір ізоляційного матеріалу необхідний для централізованого, потім для газового котла, кабельного опалення, ТНУ та електричного котла. Такий

розподіл економічно доцільного термічного опору в залежності від джерела опалення обумовлений взаємодією таких чинників як вартість джерела й енергоносіїв та енергоефективність. Прогнозована ціна на газ через 10 років є приблизно в 1,5 раз вищою за ціну на електричну енергію. Якщо не враховувати зміни в часі вартості енергоносіїв, тоді більші значення термічного опору та інтегральних дисконтованих витрат будуть для джерел, які використовують електричну енергію. Отже при врахуванні зміни в часі вартості енергоносіїв, для ТНУ необхідний найменший термічний опір, а найнижчі інтегральні витрати – для системи із електричним котлом, що пов’язано із незначними тенденціями росту цін на електричну енергію.

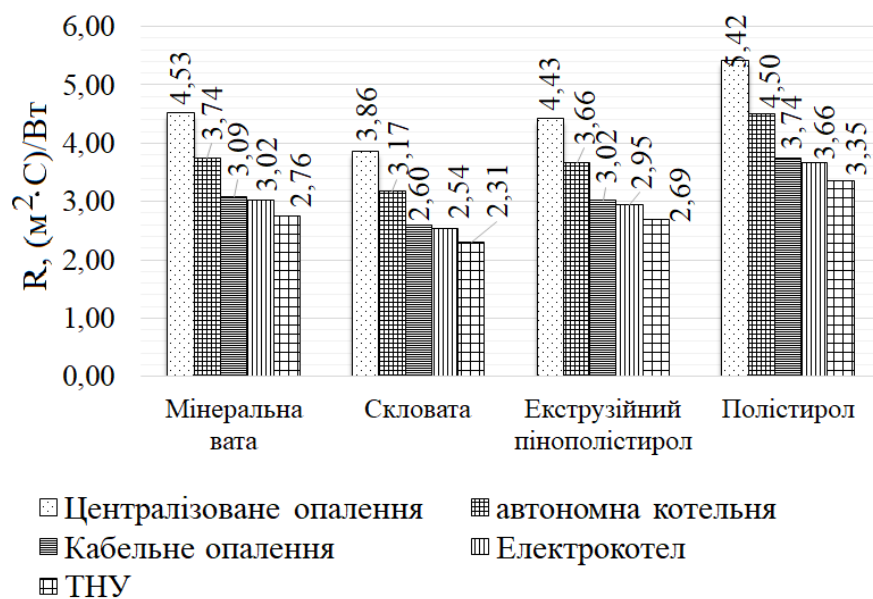


Рис. 3.9 – Залежність оптимального значення додаткового термічного опору ізоляційного матеріалу від типу ізоляційного матеріалу та джерела теплоти

На рис. 3.10 відображена залежність інтегральних витрат від термічного опору теплоізоляційного матеріалу. Спочатку витрати зменшуються стрімко, що обумовлено зменшенням витрат на енергоносії та капітальних на джерело, досягаючи свого мінімуму починають зростати. Це пояснюється зростанням вартості та встановлення теплоізоляційних матеріалів, та обумовлює необхідність покращення теплоізоляційних властивостей не тільки зовнішніх стін, а й теплоізоляційної оболонки вцілому. Для ТНУ екстремум не чіткий та інтегральна

вартість зростає після мінімуму плавно, адже капітальні витрати на придбання джерела теплоти є значними.

Із рис. 3.10 та таблиці 3.9 видно, що врахування обох факторів обумовлює зміну витрат на 7 %, та зміну оптимального термічного опору на 5 %. Отже при оптимальному виборі товщини ізоляції необхідно враховувати як дисконтування, так зміну вартості в часі енергоносіїв. При обґрунтовуванні вибору системи опалення на основі методу руху грошових потоків доцільно враховувати зміну вартості в часі енергоносіїв та дисконтування, оскільки зміна витрат при не врахуванні даних факторів становить до 10 %.

За умови проведення розрахунку оптимальних значень термічного опору зовнішніх стін для різних джерел теплоти та ізоляційних матеріалів найкращу економічну перспективу виявила ТНУ та тепловий захист на основі пінополістиролу. Для обраних розрахункових умов найменші термічний опір ізоляційного матеріалу та інтегральні дисконтовані витрати згідно із запропонованою методикою необхідні для ТНУ, що пов'язано із незначними тенденціями росту цін на електричну енергію. Різниця у значенні інтегральних витрат при не врахуванні дисконтування та зміни вартості в часі енергоносіїв на період 10 років для ТНУ та теплового захисту на основі пінополістиролу становить від 5 до 10%, що обумовлює доцільність запропонованого підходу. Необхідність врахування дисконтування та зміни вартості в часі енергоносіїв підкреслює той факт, що життєвий цикл для джерел може бути більшим, 10 років, а для ізоляції деяких типів і ще більшим.

Таблиця 3.9 – Зміна витрат та оптимальної товщини теплоізоляції зовнішньої стіни для системи з ТНУ для різних умов розрахунку, %

Умови розрахунку	$R_{\text{опт}}, \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$	$B, \text{€},$
Без врахування E	4	5
Без врахування k	8	10
Без врахування E та k	5	7

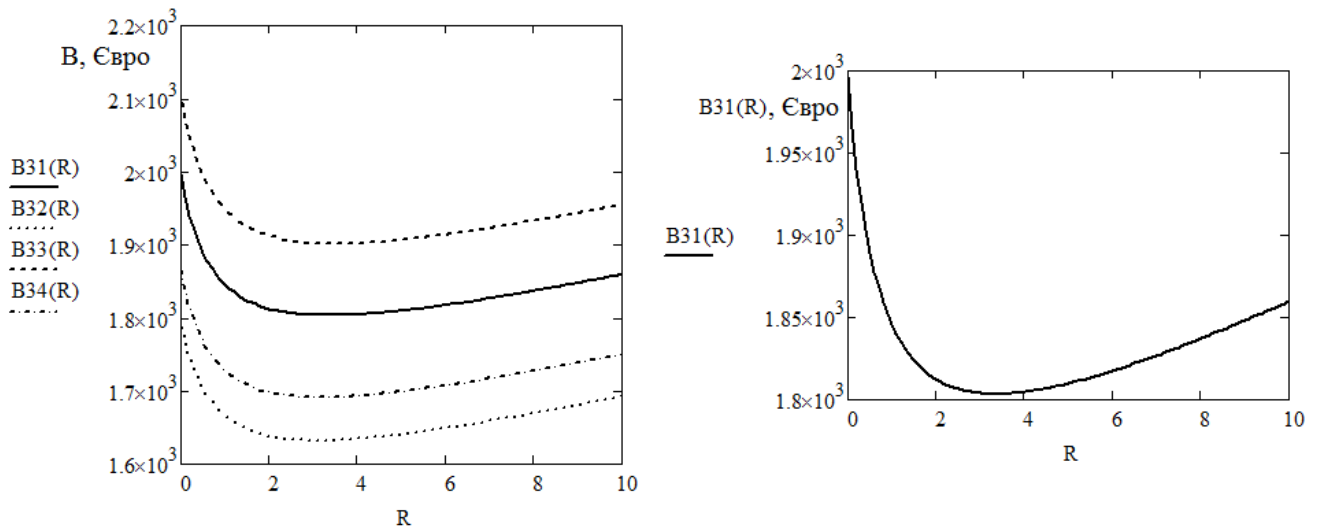


Рис. 3.10 – Залежність витрат від термічного опору для ТНУ та ізоляційного матеріалу типу пінополістирол, для різних умов розрахунку: B_{31} , B_{32} , B_{33} , B_{34} – відповідно інтегральні витрати враховуючи дисконтування та зміну в часі вартості енергоносіїв; тільки дисконтування; тільки зміну в часі вартості енергоносіїв; не враховуючи ні дисконтування, ні зміну в часі вартості енергоносіїв, Євро

Висвітлену схему оптимізації пропонується досліджувати для будівлі в цілому, тобто проводити комплексну оптимізацію теплоізоляційної оболонки, а також враховувати зменшення капітальних витрат на систему опалення при зростанні захисних властивостей огорожувальних конструкцій та відповідному зменшенні потреби тепла на опалення.

3.5. Аналіз впливу глибини розрахунку на сукупні інтегральні витрати теплової ізоляції будівлі та джерела теплоти

Вибір оптимального теплового захисту будівлі є складним питанням, при якому необхідно, крім його вартості та опору теплопередачі, враховувати також дисконтування, ціни на різні енергоресурси, котрі мають тенденцію до стрімкого зростання, енергоефективність та капітальні затрати на джерело теплоти. Вибір параметрів будівлі слід здійснювати комплексно, враховуючи енергетичні та економічні фактори. Однак у роботах [125, 126, 164], при такому комплексному

підході не враховані ще і зміна вартості грошей та енергоносіїв в часі, капіталовкладення в обладнання будівлі та їх зміна при варіюванні теплового захисту, що є ціллю роботи. Глибина, або горизонт, розрахунку при такому комплексному аналізі не є однозначними, оскільки час експлуатації для різних елементів системи є різним. Попри те, будівля – це об’єкт, який передбачає значні інвестиції, а ціллю інвесторів є відносно незначний термін окупності, хоча для теплової ізоляції слід розглядати більші проміжки часу, що пов’язано з різним терміном експлуатації останньої, у порівнянні з джерелом теплоти. Тому необхідно відобразити залежність витрат та економічного доцільного теплового захисту від обраної глибини розрахунку. Розрахунок інтегральних дисконтованих витрат для ТНУ мають свої особливості. Оскільки ТНУ не доцільно вибирати для розрахункової температури на опалення, то потужність ТН обирається для температури зовнішнього повітря -10°C , щоб покрити теплове навантаження додатково використовується електричний нагрівач. Інтегральні витрати визначаються за формулами співвідношень (2.5, 2.6, 2.16, 2.17), однак капітальні витрати та енергоефективність системи тепlopостачання розраховуються наступним чином:

$$I_0 = i_{01} \cdot P_1 + i_{02} \cdot P_2; \quad (3.4)$$

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 \cdot D_{d1} + \varepsilon_{cm} \cdot D_{d2}}{D_{d1} + D_{d2}}, \quad (3.5)$$

де i_{01}, i_{02} – вартість одиниці встановленої потужності ТНУ та електричного нагрівача відповідно, грн/кВт;

P_1, P_2 – встановлена потужність ТНУ та електричного нагрівача відповідно, кВт. Зауважимо, що P_1 визначається для розрахункової температури -10°C , P_2 як додаткова до P_1 для розрахункової температури на опалення [164];

$\varepsilon_1, \varepsilon_{cm}$ – коефіцієнт, що враховує ефективність системи тепlopостачання із ТНУ та при сумісній роботі ТНУ та електричного нагрівача відповідно. ε_{cm} розраховується на основі співвідношення енергоефективностей ТНУ та

електронагрівача і тривалості стояння та значень температур, що вище -10°C [165];

D_{d1} , D_{d2} – значення градусодіб, при яких працює тільки ТНУ та вмикається нагрівач відповідно [165].

Оскільки для усіх інших джерел теплоти розрахунок проводився при середній температурі за опалювальний період, то і для ТНУ вважаємо, що енергоефективність не змінюється при зміні зовнішньої температури, а тільки в результаті комбінування з електричним нагрівачем. На рис. 3.11 представлено залежність економічно доцільного термічного опору ізоляційного матеріалу зовнішньої стіни від обраної глибини розрахунку при використанні матеріалу типу пінополістирол. Оцінка залежності від життєвого циклу є досить актуальною, бо тривалість експлуатації різних компонентів системи є різною. Зрозуміло, що термін експлуатації ізоляції більший ніж 5 років, однак проводиться комплексна оптимізація, враховуючи джерело теплоти на основі інтегральних витрат, тому доцільно прослідкувати їх зміну починаючи із початку життєвого циклу.

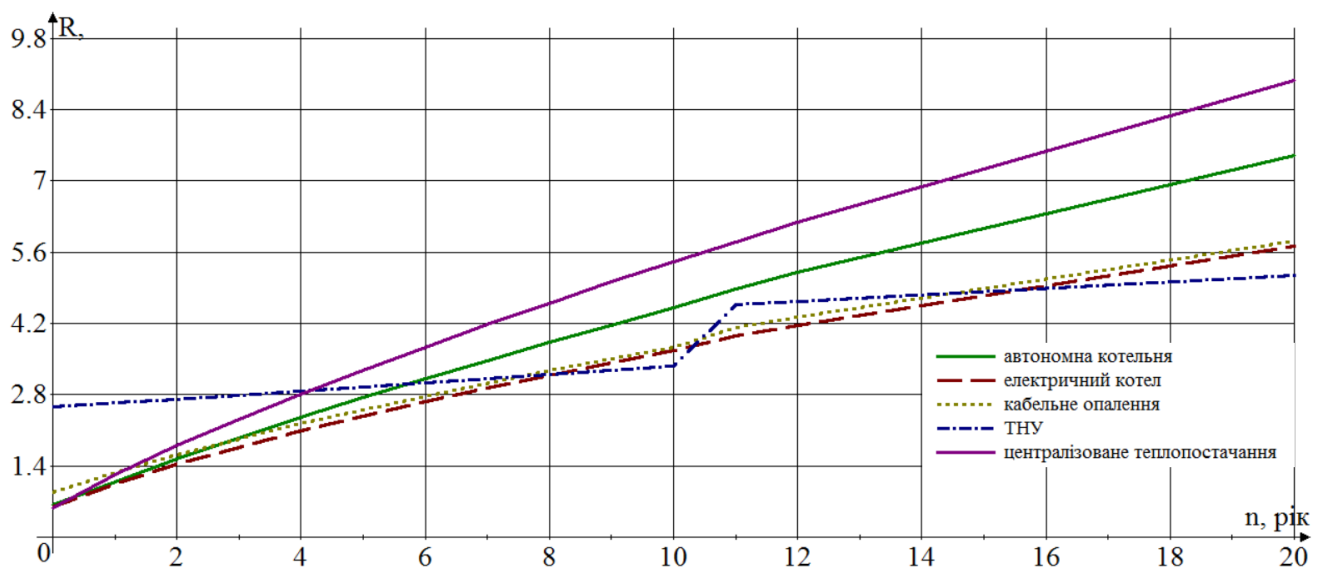


Рис. 3.11 – Залежність економічно доцільного термічного опору ізоляційного матеріалу (полістирол) зовнішньої стіни від обраного горизонту розрахунку

Очевидно, якщо проект розраховувати на 5 років (даний термін є найпривабливішим для інвесторів), то найбільший термічний опір необхідний для будівлі із централізованим теплопостачанням далі ТНУ, автономна газова котельня та кабельне електроопалення і електричний котел. Щодо витрат (рис. 3.12), то для терміну 5 років при оптимальному термічному опорі найбільші витрати характерні для централізованого теплопостачання потім ТНУ, автономного опалення, кабельного електроопалення та електрокотла. Отже для терміну 5 років найменший термічний опір та витрати характерні для будівлі із електричним котлом. Коли життєвий цикл проекту становить 10 років, тоді тенденції змінюються і найвище значення термічного опору характерні для централізованого теплопостачання потім автономної котельні, кабельного опалення, електричного котла та ТНУ. Інтегральні витрати в такому випадку зростають наступним чином: централізоване опалення, автономна котельня, кабельне, ТНУ та електричне опалення.

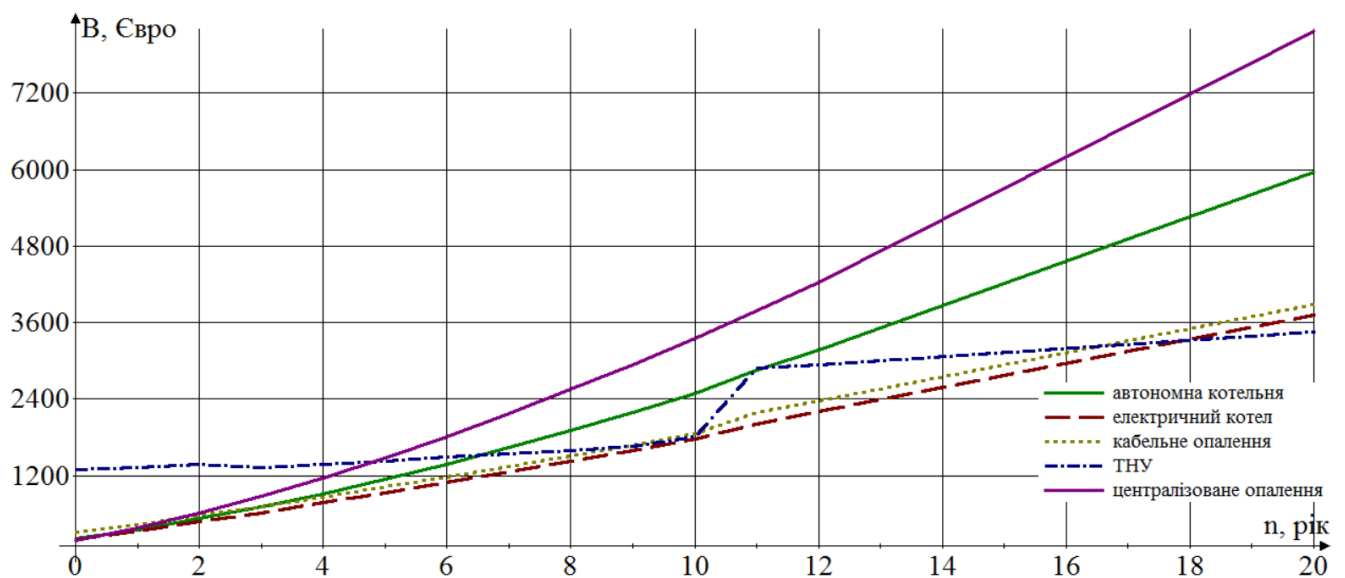


Рис. 3.12 – Значення витрат залежно від терміну розрахунку при економічно доцільному значенні термічного опору

3.6. Вплив приладів опалення на енергоефективність будинків

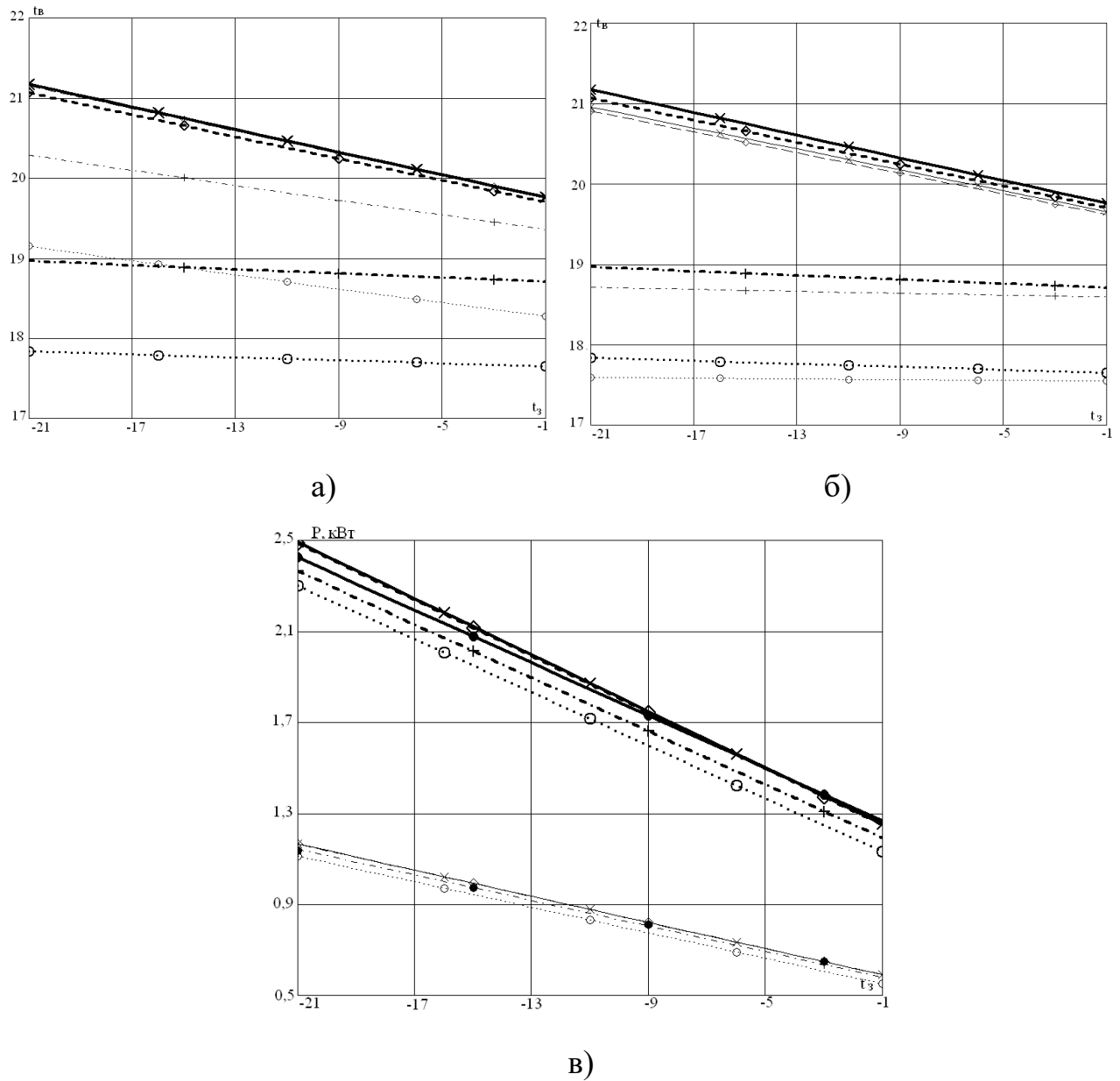
Для підвищення теплової ефективності будівель необхідно проводити комплексний аналіз всіх її елементів. Щоб створити відповідні умови можна використовувати різні прилади опалення, однак основною проблемою є вибір таких, які б задовольняли потребу в комфорті та економії. Для оцінки впливу різних приладів опалення на комфортні умови в приміщенні з різними джерелами теплоти, та зміну функції інтегральних витрат на опалення будівлі при врахуванні витрат на прилади опалення та особливостей комфортних умов, що ними забезпечуються, витрати на систему опалення визначаються відповідно до співвідношення (2.17). Комфортні умови при визначенні сумарних витрат враховуються, як співвідношення сумарної радіаційної температури t_R огорожувальних конструкцій і температури внутрішнього повітря t_e , яке змінюється залежно від інтенсивності трудової діяльності людини [96]. При визначенні середньозваженої радіаційної температури приміщення враховувалася температура всіх поверхонь згідно із співвідношенням (2.86). Що ж до температури приладу опалення, то враховувалася її залежність не тільки від температури зовнішнього повітря, але і від теплового захисту будівлі. Для аналізу приладів опалення вибрані наступні: алюмінієві; сталеві; біметалічні радіатори; низькотемпературні радіатори; водяна тепла підлога; електрична тепла стеля. Зміна температури приладу опалення від температури зовнішнього повітря та теплового захисту будівлі визначається за такими співвідношеннями (при умові, що забезпечується якісне регулювання системи тепlopостачання):

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta\tau'} = \frac{Q(R, t_s)}{Q'}, \quad (3.6)$$

де $\Delta\tau'$, $\Delta\tau$ – температурний напір в приладі опалення при розрахункових умовах та при будь-якому режимі навантаження відповідно, $^{\circ}\text{C}$;

Q' – розрахункове теплове навантаження, при тепловому захисті, що відповідає умовам 80-х років, кВт; $Q(R, t_s)$ – теплове навантаження при різній температурі зовнішнього повітря та тепловому захисті, кВт.

Температура приладу опалення визначається як середня між температурою теплоносія на вході та виході. Результати залежності температури внутрішнього повітря t_v від температури зовнішнього повітря t_3 для різних приладів опалення представлені на рис. 3.13.а. Такі дані отримані на основі комплексу комфортних умов та враховуючи зміну температури приладу опалення від зовнішньої температури та теплового захисту будівлі. Для порівняння наведені дані залежності температури внутрішнього повітря не враховуючи зміну температури приладу опалення від теплового захисту будівлі (рис. 3.13. б) та відносної зміни теплового потоку приладів опалення для цих варіантів (рис. 3.13. в), а також при сталій t_v . Порівнюючи рис. 3.13 а та б можна зробити висновки, що у випадку врахування зміни температури приладу опалення в залежності від теплового захисту t_v слід підтримувати вищою для кімнати із кращим тепловим захистом (це характерне для всіх аналізованих приладів опалення), що пов'язано із зменшенням температури приладу опалення, як наслідок сумарної радіаційної температури приміщення. Найнижчу температуру t_v в приміщенні слід підтримувати при використанні системи опалення тепла стеля, потім для водяної теплої підлоги (це обумовлено тим, що допустима температура для стелі є вищою, ніж для підлоги), далі йде низькотемпературний прилад опалення та прилад опалення із температурним рівнем 95/70 °С. Отже можна стверджувати, що регулювання температури приладу опалення при зростанні теплового захисту не є доречним, оскільки при цьому слід підвищувати температуру внутрішнього повітря t_v . Необхідна t_v зменшується при рості t_3 , це пояснюється ростом температури зовнішніх огорожувальних конструкцій. Що ж до потужності теплового потоку, то тенденції залишаються такими ж як і для температур, очевидно що із ростом теплового захисту тепловий потік зменшується. Коли порівнювати тепловий потік, що забезпечується різними приладами опалення і тепловий потік при сталій t_v , то для підлогового і кабельного опалення потік нижчий, як при сталій t_v , а для інших приладів опалення є вищим до певної температури t_3 .

Рис. 3.13 – Результати впливу t_3 на:

а) t_B ; б) t_B не враховуючи зміну температури приладу опалення від теплового захисту будівлі; в) зміну теплового потоку приладів опалення;

тепловий захист відповідає вимогам 80-х, та сучасним нормам відповідно:

×××, ××× – прилад опалення 95/70 °С;

⊖⊖, ⊖⊖⊖ – система опалення електрична тепла стеля;

◇◇, ◇◇◇ – низькотемпературний прилад опалення 50/40 °С;

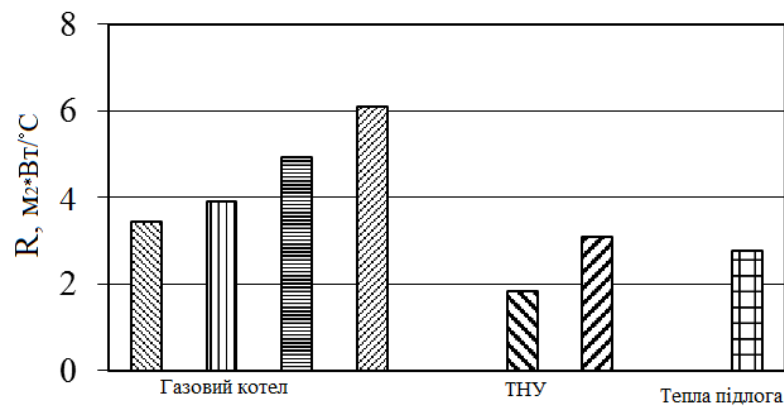
+++, +++ – система опалення водяна тепла підлога;

●●, ●●● – тепловий потік при сталій t_B .

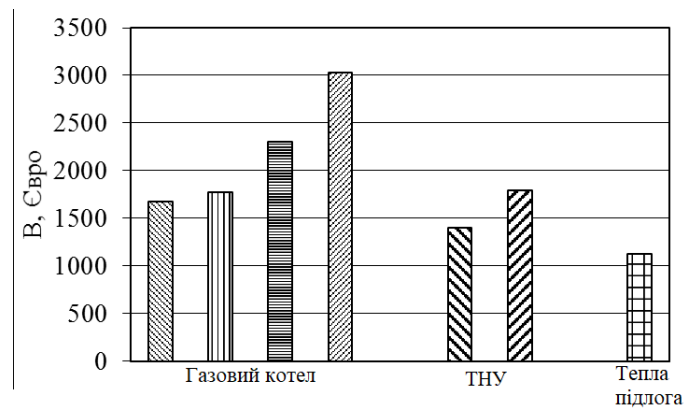
Оптимальні значення термічного опору ізоляції зовнішньої огорожувальної конструкцій визначалися для різних джерел теплоти та приладів опалення із врахуванням комфортних умов та вартості приладів опалення. В якості ізоляційного матеріалу обрано пінополістирол, що обумовлено попередніми дослідженнями [11]. Аналізуються наступні джерела теплоти: автономний газовий котел, тепловий насос та кабельне опалення. При розрахунку не враховувалася залежність температури приладу опалення від теплового захисту, що є предметом подальших досліджень. На рис. 3.14 а представлені значення оптимального термічного опору ізоляції зовнішньої стіни R для різних джерел теплоти із різними приладами опалення, а на 3.14 б – інтегральні витрати, що відповідають цьому опору, для глибини розрахунку 10 років.

Отже найвищі значення термічного опору необхідні для системи із автономним газовим котлом, далі йде ТНУ, та кабельне електроопалення, такі результати обумовлені ще і ростом енергетичної ефективності із ростом теплового захисту. Аналогічні тенденції характерні і для інтегральних витрат. Більші витрати на систему із газовим котлом та тепловим насосом, що пояснюються вищими капітальними витратами та вартістю газу (слід наголосити, що враховується зміна вартості в часі енергоносіїв і при виборі іншого терміну розрахунку витрати для різних джерел теплоти мали б інше співвідношення). При врахуванні витрат на прилади опалення сумарні витрати на систему зростають, що пов'язано із капітальними витратами, разом з тим зростає і R , оскільки при кращому тепловому захисті капітальні витрати зменшуються. Витрати та оптимальний R зростають для такої послідовності приладів опалення: електрична тепла стеля, стальний алюмінієвий, низькотемпературний, біметалічний прилад опалення, що пояснюється вартісними характеристиками.

Визначено, що найнижчу температуру в приміщенні можна підтримувати при використанні систем опалення тепла підлога та тепла стеля, а найвищі, для традиційних приладів опалення.



а)



б)

Рисунок 3.14 – Значення оптимального термічного опору R (а) та інтегральних витрат B (б) для будівлі з різними джерелами теплоти та приладами опалення: , – прилад опалення не враховується; – сталевий прилад опалення; – алюмінієвий прилад опалення; – біметалічний прилад опалення; – низькотемпературний прилад опалення.

3.7. Вибір теплового захисту та джерела теплоти із врахуванням комфортних умов у будівлі

Особливості підходу до комплексного аналізу будівлі полягають у наступному: 1) пропонується обирати джерело теплоти у комплексі із тепловим захистом огорожувальних конструкцій; 2) комплексний вибір здійснюватиметься із врахуванням комфортної температури внутрішнього повітря у приміщенні; 3) вибір того чи іншого варіанту проводитиметься не тільки за зменшенням споживання енергоносіїв, терміном окупності чи чистою приведеною вартістю.

Порівняння альтернатив здійснюватиметься за енергетичними, економічними показниками.

У даному підході перший блок – визначення комфортних умов, рис. 3.15. Комплекс комфортних умов враховує наступні фактори: термічний опір огорожувальних конструкцій, інтенсивність діяльності людини, надходження сонячної радіації. У блоці № 2 обираються можливі варіанти теплового захисту із врахуванням діючих нормативів, існуючого ринку теплоізоляційних матеріалів. Блок № 3 – формуються можливі варіанти джерел теплоти із врахуванням комбінованого теплопостачання. Блок №4 – для множини джерел теплоти аналізуються тарифи на спожиті енергоносії та тенденції їх зміни. Блок № 5 – визначаються наступні показники для оцінки альтернатив і прийняття рішення: простий термін окупності; вартість спожитих енергоносіїв за опалювальний період; споживання первинної енергії; інтегральна вартість опалення – комплексний показник, залежить від обраного горизонту розрахунку, враховує зміну вартості енергоносіїв у часі, капітальні витрати на джерело теплоти та огорожувальні конструкції. Також доцільно враховувати і екологічні показники, та показники, що характеризують комфортні умови. Блок 6 – використання методу експертних оцінок для вибору найкращої альтернативи на основі сукупності отриманих показників.

Параметри моделі дослідження представлені у табл. 3.1 та на рис. 3.1. Вважається, що необхідний мікроклімат в приміщенні може забезпечуватися наступними варіантами: 1) автономний газовий котел; 2) централізоване теплопостачання; 3) електричний котел; 5) ТНУ та електричний нагрівач.

У даній моделі пропонується враховувати комфортні умови для опалювального періоду, як співвідношення температури внутрішнього повітря t_v і радіаційної температури при різній активності людини відповідно до підходу [97].

Середня радіаційна температура визначається в [121] як (метод 1) згідно із співвідношенням (1.25). Температура внутрішньої поверхні зовнішніх огорожувальних конструкцій визначається за (2.88) температура інших огорожувальних конструкцій приймається рівною температурі внутрішнього

повітря. Для порівняння підходів та дослідження можливого впливу відбиття сонячної радіації та теплового випромінювання нами розроблено методику визначення радіаційної температури (метод 2) на базі ефективних потоків внутрішніх поверхонь огорожень (2.85, 2.86). Значення сумарних внутрішніх теплових надходжень та опалення розраховувались для температури приміщення 18°C і зменшувалися при врахуванні надходження сонячної радіації.

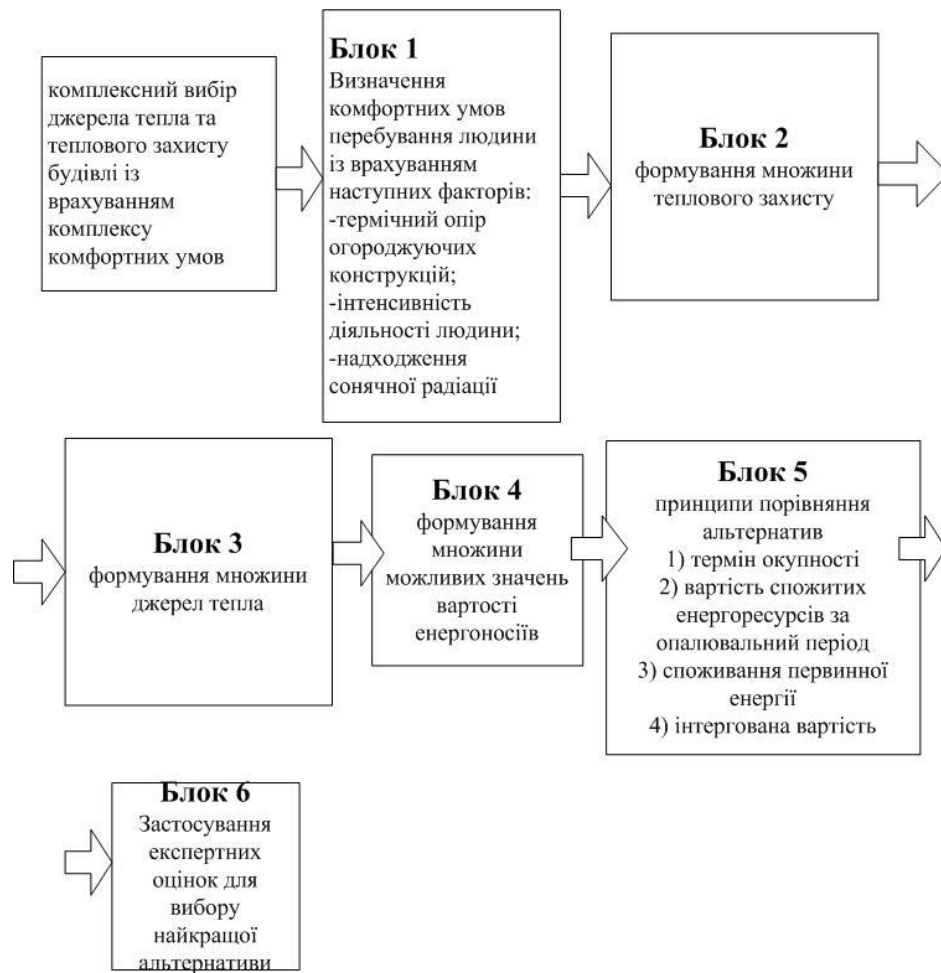


Рис. 3.15 – Блок-схема комплексного підходу до вибору джерела теплоти, термічного опору огорожувальних конструкцій

Результати розрахунку із врахуванням сонячної радіації середньої радіаційної температури представлені на рис. 3.16. Очевидне зростання, при покращенні теплової ізоляції, радіаційної температури від 20 до $20,7^{\circ}\text{C}$ та від

18,7 до 19 °С при застосуванні методу 1 та методу 2 відповідно. Якщо ж надходження сонячної радіації не враховувати то t_R зростає наступним чином 16,8 – 17,6 °С та 17,6 – 17,9 °С. Зростання радіаційної температури спричинене зростанням температури внутрішньої поверхні зовнішніх огорожень при збільшенні опору теплопередачі. Значення t_R є дещо вищим, якщо розрахунок проводити за методом 1 і враховувати надходження сонячної радіації. Отже існує відмінність між середньою радіаційною температурою за першим методом і другим, що пояснюється дещо різними підходами до урахування впливу сонячної радіації, яка потрапляє у приміщення через світлопрозорі конструкції. В методі 1 для поглинання сонячної радіації приймається середнє значення, також враховано певне розміщення людини і напрям випромінювання. В методі 2 зроблено спробу визначення радіаційної температури для приміщення за рахунок використання ефективних потоків сонячної радіації від поверхонь у дифузному наближенні.

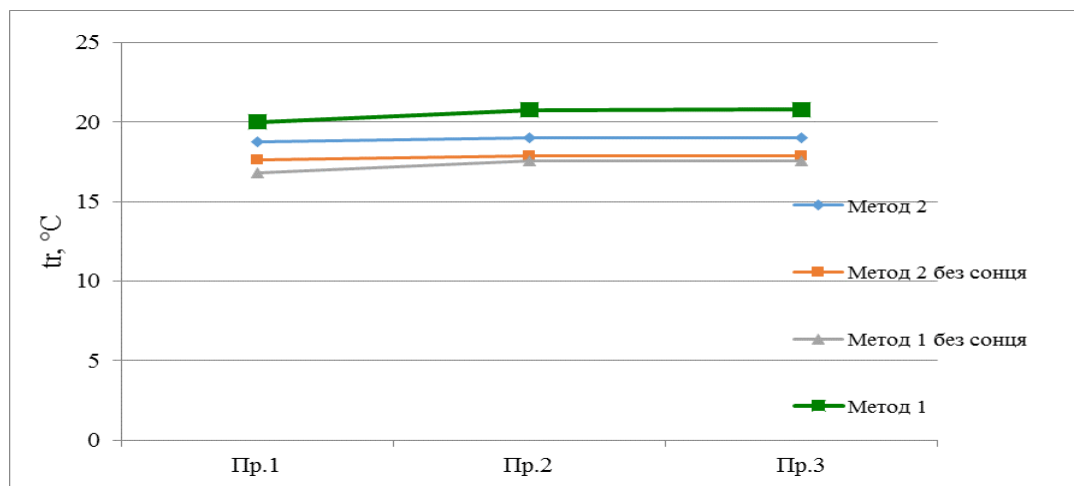


Рис. 3.16 – Середня радіаційна температура:

Пр.1 – Термічний опір відповідає нормам 80-их років, Пр.2 – відповідає нормам 2008, Пр.3 – відповідає сучасним вимогам [33].

На основі співвідношень (1) та методу 2 визначений діапазон температури внутрішнього повітря, що відповідає комфортним відчуттям людини (надалі комфортна температура t_{comf}) у стані спокою, для різних джерел теплоти і для мінімальної та середньої температури зовнішнього повітря для опалювального

періоду, для різного теплового захисту будівлі (Пр.1, Пр.2, Пр. 3), дані представлені на рис. 3.17.

Виходячи із припущення, що $t_R = t_b$ діапазон комфортної температури 22 – 24 °С, використання підходу комфортних умов спричиняє зростання споживання енергії. Уточнення t_R за методом 2 дає зменшення комфортної температури, тому приводить до зменшення витрат енергії на опалення приміщень. Для перевірки відповідності комплексу комфортних умов сучасним європейським та українським стандартам, для кожної точки на рис. 3.17 визначені показники *PMV/PPD* [6]. Значення показників *PMV/PPD* для найменшого значення t_b із комфортного діапазону знаходиться в межах 5,1 %/0,05 – 5,3%/0,11, а для найбільшого – 9,7%/0,48 – 10,7%/0,52. Отже забезпечення нижчого значення комфортної t_b відповідно до [97] спричиняє кращі відчуття комфорту, ніж вищі значення t_b . Для зменшення витрат енергії на опалення приміщень в умовах відчуття комфорту приймається найменше значення t_b із допустимого діапазону.

Розрахунок потужності джерела теплоти проводиться для комфортної температури повітря, що відповідає $t_3 = -22^\circ\text{C}$ і змінюється у наступному ряді 23, 22, 22 °С, для теплового захисту Пр.1, Пр.2, Пр.3 відповідно. Комфортна температура при визначенні енергоспоживання за опалювальний період представлена наступним рядом 22, 21, 21 °С для Пр.1, Пр.2, Пр.3 відповідно. Для розрахунку середнього енергоспоживання та потужності приладів опалення згідно з чинними нормативами t_b приймається рівною 20 °С, проте у даній роботі температура внутрішнього повітря приймається вищою, що відповідає комплексу комфортних умов та спричиняє зростання енергоспоживання. Уточнення комплексу комфортних умов за рахунок визначення t_R за методом 2 спричиняє зменшення споживання енергії у порівнянні із традиційним підходом при визначенні комфортних умов, де $t_R = t_b$, оскільки t_b зменшується в середньому на 1 °С.

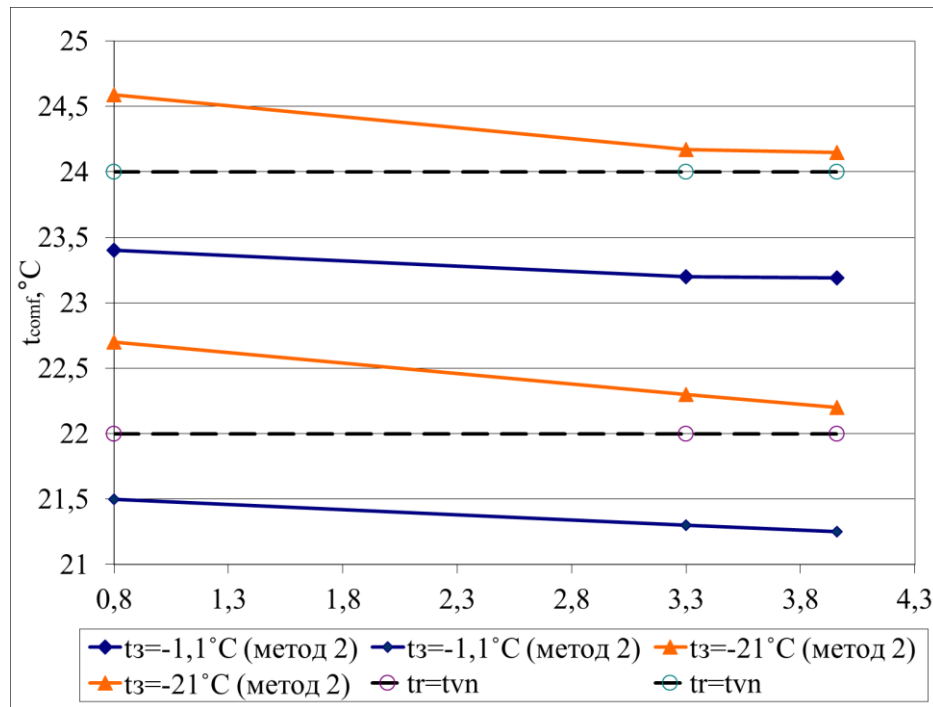


Рис. 3.17 – Діапазон зміни комфортної температури та значення *PMV/PPD*

Інтегральна вартість для моделі дослідження із різними джерелами теплоти визначається відповідно до співвідношень (2.1), енергопотреба розраховується за опалювальний період.

Всі дані щодо аналізу цін на джерело теплоти, вартість енергоносіїв занесені у табл.3.10. Коефіцієнти щодо зміни цін на електричну енергію розраховані відповідно до діючих нормативних документів. Коефіцієнт приросту цін на газ прийнято 1. Значення *l* розраховано на основі даних [20].

Витрати на покращення теплоізоляційних характеристик огорожувальних конструкцій визначаються за наступним співвідношенням (2.16). Для аналізу обрано екструдований полістирол, характеристики якого наступні:

$$\lambda = 0,039 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}, \quad A_1 = 30 \frac{\text{грн}}{\text{м}^3}, \quad B_1 = 300 \frac{\text{грн}}{\text{м}^3}. \quad \text{Для вікон:} \quad A_2 = 80 \frac{\text{грн}}{\text{м}^2},$$

$$B_2 = 1700 \frac{\text{грн} \cdot \text{Вт}}{\text{м}^4 \cdot ^\circ\text{C}}.$$

На основі даних із табл. 3.10 для різних альтернатив розраховано споживання первинної енергії за опалювальний період. Коефіцієнти для розрахунку споживання первинного палива взяті із [23]. Результати розрахунків представлені на рис. 3.18. Отже найвище споживання первинного палива характерне для

системи із електричним котлом, а найнижче – для системи з автономним газовим котлом, зростання опору теплопередачі огорожувальних конструкцій зменшує споживання первинного палива.

На рис. 3.19 показана інтегральна вартість опалення для різних джерел теплоти при різних варіантах термічного опору огорожувальних конструкцій, глибина розрахунку 10 років. Інтегральна вартість найнижча для системи із ТНУ, а найвища для централізованого тепlopостачання та автономного газового котла, що обумовлено вищими тенденціями росту цін на газ у порівнянні із електричною енергією.

Відносне зростання споживання первинного палива системи ДК для забезпечення комфортних умов рівне 4,52, 3,41, 3,72 для Пр.1, Пр.2 та Пр.3 відповідно та для різних джерел теплоти практично не змінюється. Розрахунки проводилися для моделі з базовим варіантом $t_b=20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таблиця 3.10 – Характеристики джерел теплоти

Характеристики	Енергетична ефективність	Вартість встановленої потужності, грн./кВт.	Інші витрати грн.	Коефіцієнт приросту цін на енергоносії	Вартість енергоносія станом на 1.10.2015
Джерело теплоти					
Централізоване тепlopостачання				1	$537,2 \frac{\text{грн}}{\text{Гкал}}$
Автономний газовий котел	0,85	600	40	1	$3,66 \frac{\text{грн}}{\text{м}^3}$
Електричний котел	0,97	580	30	0,54	$0,456 \frac{\text{грн}}{\text{кВт}\cdot\text{год}}$
Тепловий насос	2	7800	20		

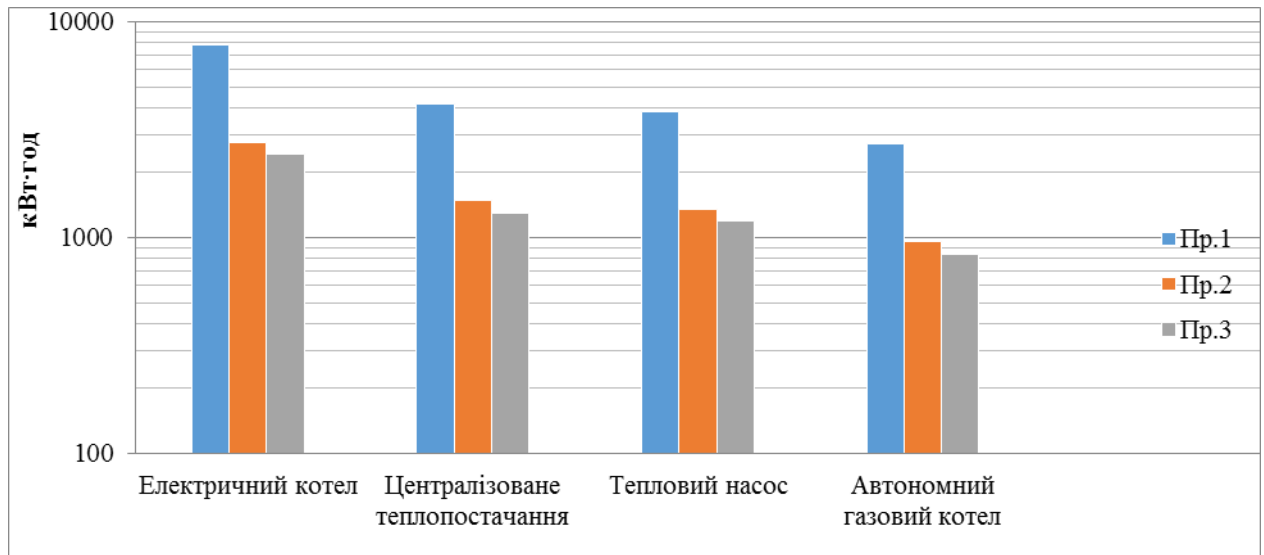


Рис. 3.18 – Споживання первинного палива різними джерелами теплоти при різних варіантах термічного опору огорожувальних конструкцій:
 Пр.1 – Термічний опір відповідає нормам 80-их років, Пр.2 – відповідає нормам 2008 року, Пр.3 – сучасним вимогам [33].

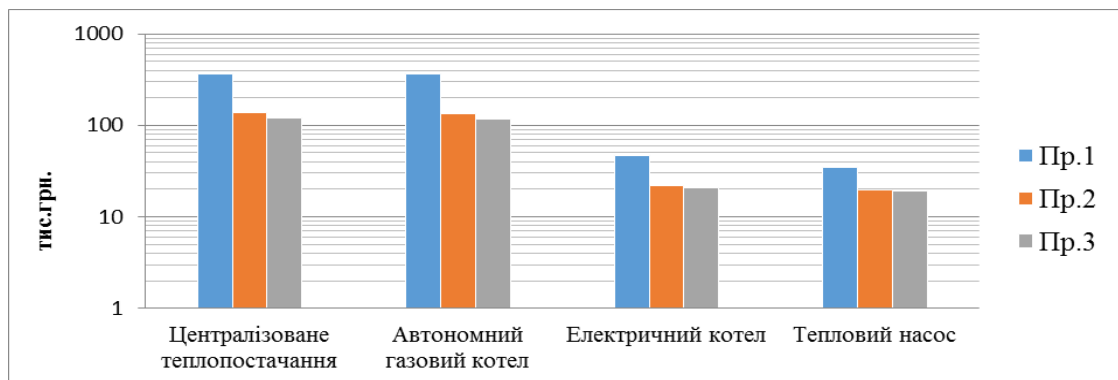


Рис. 3.19 – Інтегральна вартість опалення для різних джерел теплоти при різних варіантах термічного опору огорожувальних конструкцій, глибина розрахунку 10 років

Чутливість функції інтегральних витрат до параметрів моделі представлена у таблиці 3.11. Для розрахунку чутливості базовою моделлю є будівля тепловий захист якої відповідає нормативам 80-х років, а інші параметри приймаємо на рівні: $n=10$ років, $l=1$ для автономного газового котла та централізованого теплопостачання, та $l=0,54$ для систем, що споживають електричну енергію, $E=0,22$, $R=1,91$ (сумарний термічний опір зовнішніх огорожувальних конструкцій).

Отже найвищий вплив на інтегральну вартість системи має коефіцієнт приросту цін на енергоносії. Вплив l на B є вищим для тих систем, що споживають газ у порівнянні з електричними, це обумовлено вищими тенденціями росту цін на газ. Зменшення впливу показників на B представлено наступним рядом $n, t_{в1}, E, R$.

Таблиця 3.11 – Чутливість функції інтегральних витрат до параметрів моделі

Джерело	n	l	E	$t_{в}$	R
Автономний газовий котел	6,4	36,9	-1,056	1,54	-0,2
Електричний котел	2,8	33,6	-0,895	1,52	-0,17
Тепловий насос	1,9	22,5	-0,703	1,19	-0,13
Централізоване тепло-постачання	6,4	37,1	-1,059	1,55	-0,2

Запропонований алгоритм вибору джерела теплоти та огорожувальних конструкцій будівлі із врахуванням комплексу комфортних умов дозволить проектувати будівлі із належною якістю мікроклімату. У моделі враховується середня радіаційна температура приміщення, що залежить від теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій та середнє надходження сонячної радіації; дана модель дозволяє врахувати зміну вартості енергоносіїв у часі; енергоефективність різноманітних джерел теплоти. Врахування комплексу комфортних умов забезпечує створення будівель із належними умовами перебування людини, і обумовлює відносне зростання споживання первинного палива та інтегральної вартості системи ДК. Для визначення комфортних умов перебування людини розроблено методику розрахунку радіаційної температури на базі ефективних потоків внутрішніх поверхонь огорожень. Уточнення моделі комфортних умов за рахунок радіаційної температури спричиняє зменшення споживання енергії у порівнянні із традиційним підходом при визначенні комфортних умов. Проаналізовано споживання первинного палива та інтегральну вартість системи ДК. Найвище споживання первинного палива характерне для системи із електричним котлом, а найнижче – для системи з газовим котлом. Інтегральна вартість найнижча для системи із ТНУ, а найвища для

централізованого теплопостачання та автономного газового котла, що обумовлено вищими тенденціями росту цін на газ у порівнянні із електричною енергією.

Висновки до розділу

1. Показано, що розроблена методика що враховує зміну вартості в часі енергоносіїв, дала можливість отримати оптимальні значення термічного опору для різних джерел теплоти. Згідно з отриманими результатами найвищий термічний опір ізоляційного матеріалу необхідний для централізованого потім для газового котла, кабельного опалення, електричного котла та ТНУ. Такий розподіл економічно доцільного термічного опору в залежності від джерела опалення обумовлений взаємодією таких чинників як зміна вартості в часі енергоносіїв, енергоефективність та вартість джерела. Прогнозована ціна на газ через 10 років є приблизно в 1,5 раз вищою за ціну на електричну енергію. Якщо не враховувати зміни в часі вартості енергоносіїв, тоді більші значення термічного опору та інтегральних дисконтованих витрат будуть для джерел, які використовують електричну енергію.

2. Розроблена методика дозволяє проводити розрахунки для різних сценаріїв зміни цін на енергоносії: 1) оптимістичний – ціни на енергоносії не змінюються; 2) середньостатистичний – коефіцієнт приросту цін на енергоносії дорівнює середньостатистичному значенню; 3) песимістичний – коефіцієнти приросту цін на енергоносії рівні максимальному значенню із вибірки, що дозволить виключити необґрунтоване зростання ступеню невизначеності даних у процесі вибору джерела теплоти у комплексі з огорожувальними конструкціями.

3. Показано вплив глибини розрахунку на інтегральну вартість системи ДК та на оптимальний термічний опір тепло ізолюючого матеріалу. Встановлено, що для $t=5$ років найбільший оптимальний термічний опір необхідний для будівлі із централізованим теплопостачанням далі ТНУ, автономна газова котельня та кабельне електроопалення і електричний котел. Щодо витрат при оптимальному термічному опорі найбільші витрати характерні для централізованого теплопостачання потім ТНУ, автономного опалення, кабельного електроопалення

та електрокотла. Отже для терміну 5 років найменший термічний опір та витрати характерні для будівлі із електричним котлом. Коли життєвий цикл проекту становить 10 років, тоді тенденції змінюються і найвище значення термічного опору характерні для централізованого теплопостачання потім автономної котельні, кабельного опалення, електричного котла та ТНУ. Інтегральні витрати в такому випадку зростають наступним чином: централізоване опалення, автономна котельня, кабельне, ТНУ та електричне опалення.

4. Встановлено, що при врахуванні приладів опалення витрати та оптимальний R зростають для такої послідовності приладів опалення: електрична тепла стеля сталевий алюмінієвий, низькотемпературний, біметалічний прилад опалення, що пояснюється вартісними характеристиками. Визначено, що найнижчу температуру в приміщенні можна підтримувати при використанні систем опалення тепла підлога та тепла стеля, а найвищі, для традиційних приладів опалення.

5. За допомогою методики визначення радіаційної температури на базі ефективних потоків внутрішніх поверхонь огорожень і приладу опалення проведено уточнення, що дозволяє знизити комфортну температуру в приміщенні в середньому на $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, а сумарну потужність теплових втрат моделі на 2 – 3%. Урахування втрат тепла огорожувальною конструкцією за приладом опалення зумовлює зростання сумарної потужності теплових втрат на 3 – 4%.

Основні наукові результати розділу опубліковано у працях [9, 11, 12, 13, 14, 16, 17].

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ СКЛАДНОЇ СИСТЕМИ «ДЖЕРЕЛО ТЕПЛОТИ – ЛЮДИНА – ОГОРОДЖУВАЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ»

4.1. Опис віртуальної моделі людини та параметрів довкілля

Для аналізу енергетичної та ексергетичної моделі людини визначимо параметри, що залежать від людини, а для ексергетичного аналізу – параметри довкілля, що занесені у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри системи дослідження

Параметр	Значення	
Середовище	літо	зима
Температура повітря оточуючого середовища T_0, K	301	273
Відносна вологість оточуючого середовища $\varphi_o, \%$	40	
Відносна вологість повітря в кімнаті, $\varphi_v, \%$	40	
Атмосферний тиск, Па	101325	
Людина		
Теплоізоляція одягу, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	0,124	0,155
Метаболізм $\text{Вт}/\text{м}^2$	58	
Механічна робота $\text{Вт}/\text{м}^2$	0	

Потоки енергії та ексергії досліджувалися для складної системи рис. 4.1. ДЛК. У даній роботі аналізується та визначається потреба на опалення Q_2 . Споживання первинного палива Q_1 системою може розраховуватися за допомогою перевідних коефіцієнтів, що є різними для різних джерел теплоти та у різних країнах та місцевостях приймаються різними. Дані коефіцієнти залежать від ефективності джерела теплоти, системи розподілу енергії та інженерних систем будівлі.

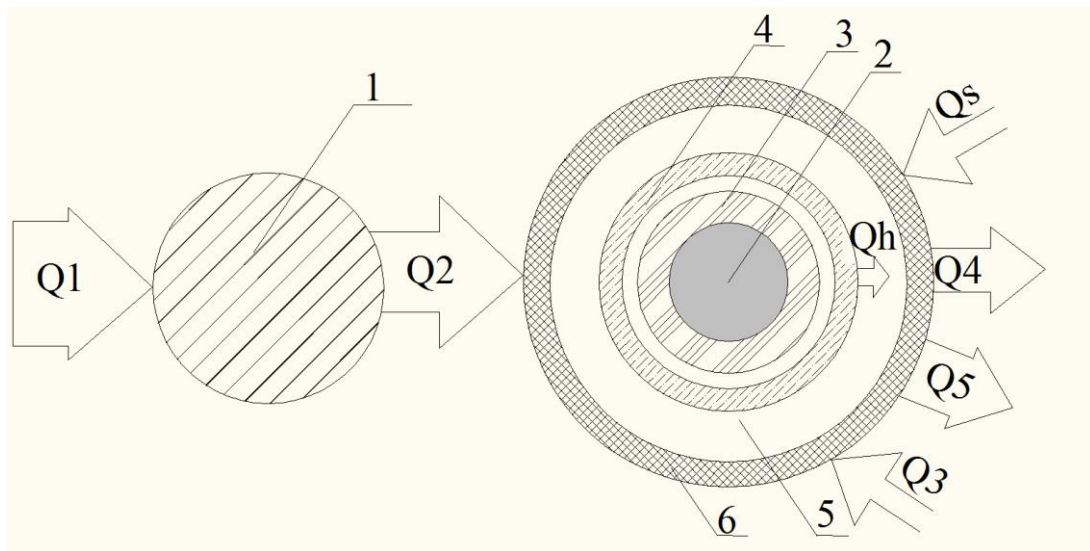


Рис. 4.1. Модель дослідження «джерело теплоти – людина – огорожувальні конструкції»:

1 – генерація; 2 – ядро; 3 – оболонка; 4 – одяг; 5 – повітря в кімнаті; 6 – огороження будівлі; Q_1 – енергія первинного палива; Q_2 – кількість теплоти, що надходить у будівлю, Q_h – надходження теплоти від людини, Q_s – теплонадходження від сонця; Q_3 – інші тепло надходження; Q_4 – кількість теплоти, що втрачається через огорожувальні конструкції; Q_5 – втрати тепла на вентиляцію.

4.2. Вплив теплового захисту будівлі на показники теплового комфорту

Використання високоефективних та сучасних джерел теплоти не є достатньо ефективним у будівлях із низьким тепловим захистом, тому вибір джерела теплоти, покращення чи вибір теплового захисту будівель та забезпечення комфортних умов повинен здійснюватися комплексно. У зв'язку із впровадженням нормативних документів, що стосуються енергоефективності та теплового комфорту [5–7], що відповідають європейським стандартам, важливим є врахування комплексу комфортних умов для будівель на стадії проектування та реновації. Теплові умови комфортності в будівлі визначаються параметрами оточуючого середовища (температура повітря, середня радіаційна температура, відносна швидкість повітря і тиск пари в навколишньому повітрі) та людськими факторами (рівень активності й термічний опір одягу) [96]. Системному розгляду впливу рівня теплового захисту як огорожувальних конструкцій будівлі, так і

одягу та активності людини на показники комфортності приділяється мало уваги, хоча суттєве зниження рівня витрат на опалення, навіть із погіршенням комфортності, розглядається як вкрай необхідний захід за обмежених умов енергозабезпечення в Україні. Отже існує необхідність визначити в комплексі вплив різних факторів зі сторони людини та будівлі на тепловий комфорт людини.

Метою дослідження є визначення показників теплового комфорту, а саме прогнозованого проценту незадоволених температурним середовищем (*PPD*) для будівлі із різними характеристиками теплового захисту та для людини, вдягненої у літній та зимовий одяг.

Для визначення та дослідження показників комфорту обрано два варіанти одягу – зимовий і літній. Класичним літнім одягом є легкі штани, сорочка на короткий рукав і світла білизна (термічний опір $0,5 \text{ clo}$), а зимовим – бізнес костюм (термічний опір 1 clo) [96].

Тепловий комфорт оцінюється за наступними показниками *PMV* та *PDD*, згідно із співвідношенням (2.31). Для обраної моделі кімнати рис.3.1 та табл. 3.1 за допомогою співвідношень (2.88) та (2.86) визначена радіаційна температура у приміщенні t_R (надходження сонячного випромінювання не враховується). Потім за допомогою інтернет розробки [134] та даних із табл. 4.1, розраховано прогнозований процент незадоволених температурним середовищем *PPD*. Результати розрахунків представлені на рис. 4.2. Оскільки для усіх варіантів огорожувальних конструкцій $PDD > 15$, то обрану віртуальну модель кімнати можна віднести до *IV* категорії за якістю теплового середовища [5]. Тому потрібно підвищувати температуру внутрішнього повітря, середню радіаційну температуру для покращення умов перебування. Зростання термічного опору огорожувальних конструкцій зменшує відсоток незадоволених температурним середовищем від 29% до 23 % – при одній зовнішній стіні і від 31,4 % до 23,4 % – при двох зовнішніх стінах.

Оскільки найвищий процент незадоволених температурним середовищем у кімнаті із тепловим захистом 80-х років, з двома зовнішніми стінами та термічним опором одягу людини, що відповідає $0,5 \text{ clo}$ (для таких умов $PDD=97,3 \text{ \%}$).

Зростання теплового захисту огорожувальних конструкцій та підвищення термічного опору одягу зменшує *PPD*. Тому доцільно визначити чутливість функції *PPD* до зазначених факторів.

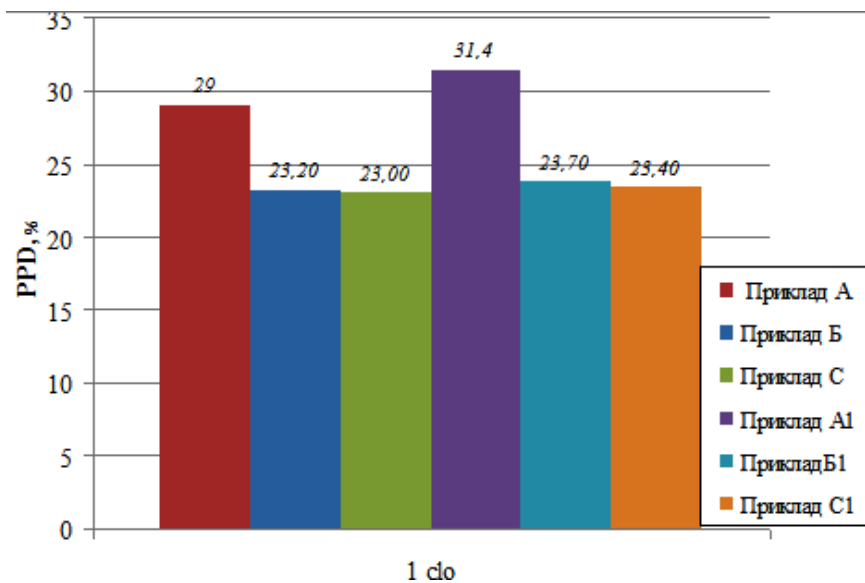


Рис. 4.2 – Значення для віртуальної моделі кімнати

	Віртуальна модель кімнати з однією зовнішньою стіною	Термічний опір огорожувальних конструкцій відповідає вимогам: 80-х років		Віртуальна модель кімнати із двома зовнішніми стінами
	зовнішньою стіною	нормам 2006 року		
		нормам 2016 року		

Чутливість *PPD* до теплового захисту огорожувальних конструкцій та до термічного опору одягу людини визначалась так:

$$\Omega = \frac{x_0}{y_0} \cdot \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (4.1)$$

де Ω – чутливість функції;

y – функція, чутливість якої визначається;

x – параметр, до якого визначається чутливість функції;

x_0 – початкове значення аргументу;

y_0 – початкове значення функції.

Значення чутливостей функції *PPD* (проценту незадоволених температурним середовищем) представлені у таблиці 4.2. Для таких базових параметрів моделі: 1) тепловий захист будівлі відповідає нормам 80-х; 2) температура зовнішнього повітря рівна середній температурі за опалювальний період для Києва відповідно до нормативів [141]; 3) температура внутрішнього повітря $t_{\text{вн}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$; 4) швидкість обміну речовин $M = 58 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$. Отже найвища чутливість функції до температури внутрішнього повітря: від -6,2 до -6,8. Значний вплив на *PPD* має і радіаційна температура від -3,29 до -3,46, далі – обмін речовин від -3,14 до -3,42. Чутливість до теплоізоляції одягу є меншою від -0,68 до -0,74 і зі зростанням теплового захисту огорожувальних конструкцій чутливість зростає. Ще менший вплив має тепловий захист будівлі від -0,08 – -0,11, та температура зовнішнього повітря -0,011 – -0,013. Від’ємне значення чутливості означає, що підвищення значення всіх показників, приводить до зниження відсотка незадоволених температурним середовищем, а отже і до покращення відчуття теплового комфорту людиною.

Таблиця 4.2.– Значення чутливості *PPD*

Фактор	Коефіцієнт теплоізоляції одягу			Тепловий захист будівлі	$t_{\text{вн}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$			$t_z, \text{ }^{\circ}\text{C}$	Обмін речовин $M, \text{ Вт/м}^2$	$t_r, \text{ }^{\circ}\text{C}$
Чутливість <i>PPD</i> моделі	Пр. А	Пр. Б	Пр. С		Пр. А	Пр. Б	Пр. С			
З однією зовнішньою стіною	-0,69	-0,74	-0,74	-0,08	-6,41	-6,79	-6,8	-0,014	-3,14	-3,46
З двома зовнішніми стінами	-0,68	-0,73	-0,74	-0,11	-6,2	-6,73	-6,78	-0,011	-3,42	-3,29

Показано, що для розглянутих умов ступінь чутливості умов комфортності до різних параметрів моделі послідовно зменшується в ряду: температура внутрішнього повітря, середня радіаційна температура, швидкість обміну речовин, теплоізоляція одягу, тепловий захист будівлі, температура зовнішнього повітря. При цьому треба враховувати можливий діапазон зміни цих величин. За низького рівня теплового захисту огорожень вплив його зміни на умови комфортності зростає.

Отже для забезпечення необхідних умов комфортності потрібно підвищувати температуру внутрішнього повітря, або підвищувати середньозважену радіаційну температуру, використовуючи відповідні системи опалення.

4.3. Комфортні умови у приміщенні з урахуванням впливу надходження сонячної радіації

Сучасні європейські та українські норми [5–7] аналізують комфортні умови перебування людини, виходячи із припущення, що середня радіаційна температура дорівнює температурі повітря в кімнаті. Такі спрощення погіршують якість розрахунків. Розвиваються різні підходи до визначення середньої радіаційної температури, які дозволяють урахувати розміщення людини у кімнаті [117]. Вплив ефективного теплового потоку від приладу опалення на комфортну температуру у приміщенні раніше не досліджувався. Тому до складу моделі включено опалювальний прилад. Завдання полягає в оцінюванні впливу опалювального приладу на комфортну температуру повітря та на сумарне енергоспоживання у сукупності з впливом сонячної та теплової радіації. В основі математичної моделі приміщення – стаціонарний тепловий баланс для кімнати з однією зовнішньою стіною та вікном. Приймається, що сонячна радіація, яка потрапила у приміщення, має дифузний характер і температура внутрішніх огорожувальних конструкцій дорівнює температурі повітря у приміщенні.

Параметри моделі дослідження відповідають кімнатам будинку в м. Києві, побудованому у 80-х роках ХХ ст, з орієнтацією на південь (Пд) з однією зовнішньою стіною та вікном табл.3.1. Комфортні умови в приміщенні

розраховуються на основі підходу [97] для людини, що знаходиться у стані спокою. Моделювалися три варіанти огорожувальних конструкцій: Пр.1 – термічний опір відповідає нормам 80-х років ХХ ст; Пр. 2 – відповідає нормам 2006 р.; Пр. 3 – відповідає сучасним вимогам. Параметри зовнішнього середовища в табл.3.2. Характеристики сталюого панельного приладу опалення: $A_{o1}=0,8$; $A_{o2}=0,2$; $\alpha_0 = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C}}$.

На рис. 4.3 наведено зміну середньої радіаційної температури для Пр.1, Пр. 2 та Пр. 3, $t_{\text{вн}}=22^\circ \text{C}$ для моделі, яка враховує власний теплообмін огорожувальних конструкцій тепловим випромінюванням та сонячною радіацією, та для моделі, у котрій враховано ще й власний теплообмін приладу опалення тепловим випромінюванням та сонячною радіацією. Із включенням приладу опалення до складу моделі середня радіаційна температура приміщення зростає незначним чином на 0,39; 0,21 та на 0,19 $^\circ \text{C}$ для Пр.1, Пр. 2 та Пр. 3 відповідно. Середня радіаційна температура приміщення є дещо вищою від $t_{\text{вн}}$, що пояснюється врахуванням ефективних потоків сонячної радіації від поверхонь.

На рис. 4.4 наведено значення комфортної температури у приміщенні для моделі із приладом опалення, без приладу опалення та значення $t_{\text{вн}}$, виходячи із припущення, що $t_r = t_{\text{вн}}$. Урахування ефективних потоків внутрішніх поверхонь огорожень дозволяє знизити комфортну температуру повітря порівняно з нормативною $t_{\text{вн}}=22^\circ \text{C}$ на 0,41; 0,6; 0,61 $^\circ \text{C}$ для Пр. 1, Пр. 2 і Пр. 3 відповідно. Врахування приладу опалення в моделі знижує $t_{\text{вн}}$ на 0,24; 0,13; 0,13 $^\circ \text{C}$ для Пр.1, Пр. 2 та Пр. 3 відповідно, а якщо порівнювати з нормованим значенням $t_{\text{вн}}=22^\circ \text{C}$, то на 0,65; 0,73; 0,74 $^\circ \text{C}$ для Пр. 1, Пр. 2 та Пр. 3 відповідно. Аналогічний розрахунок проведений для температури зовнішнього повітря $t_0=-22^\circ \text{C}$, комфортна $t_{\text{вн}}$ зростає на 0,27; 0,1; 0,06 $^\circ \text{C}$ для моделі без приладу опалення та зменшується на 0,14; 0,1; 0,1 $^\circ \text{C}$ для моделі з приладом опалення і для Пр. 1, Пр. 2 та Пр. 3 відповідно. Зменшення комфортної $t_{\text{вн}}$ для моделі з приладом опалення при зменшенні зовнішньої температури обумовлене зростанням середньої

температури приладу опалення, а отже, і середньої радіаційної температури приміщення.

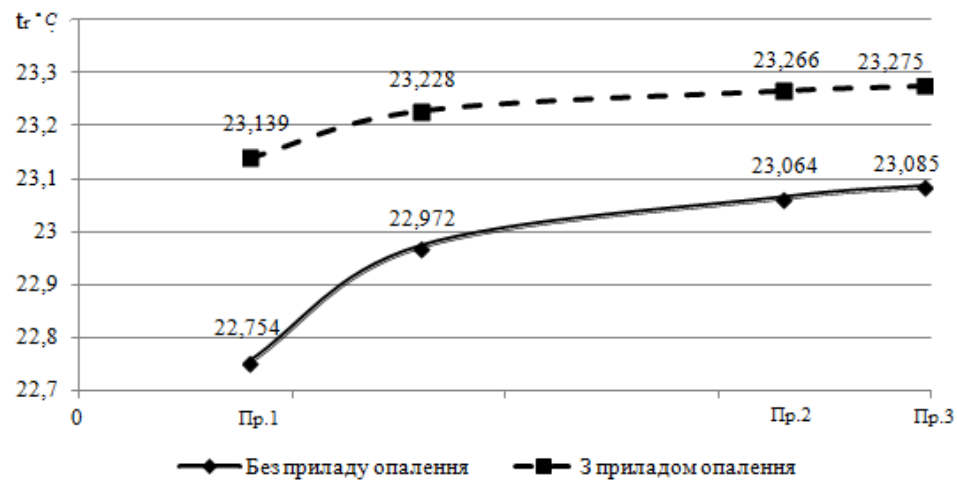


Рис. 4.3 – Значення середньої радіаційної температури приміщення

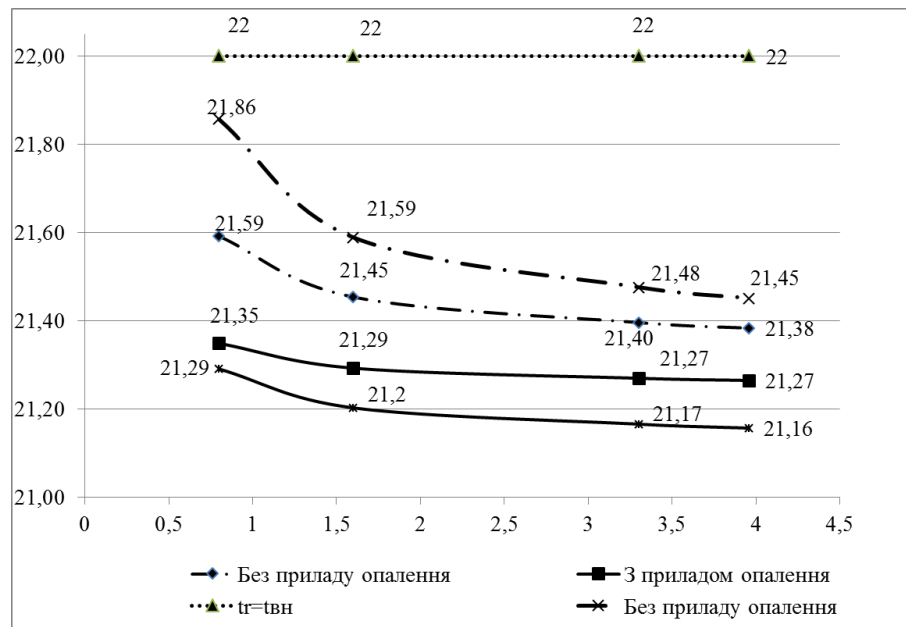


Рис. 4.4 – Значення комфортної температури повітря в приміщенні

На рис. 4.5 наведено сумарну потужність теплових втрат моделі з урахуванням приладу опалення та без нього, а також для комфортної температури й для $t_{\text{вн}} = 22^\circ\text{C}$. Для Пр.1 і $t_{\text{вн}} = 22^\circ\text{C}$ $Q_{0\Sigma}$ зростає на 3,9% при врахуванні приладу опалення, а для комфортної температури – на 3,6%. Урахування комфортних умов дозволяє знизити $Q_{0\Sigma}$ на 2 і на 3% у моделі без та з приладом опалення відповідно.

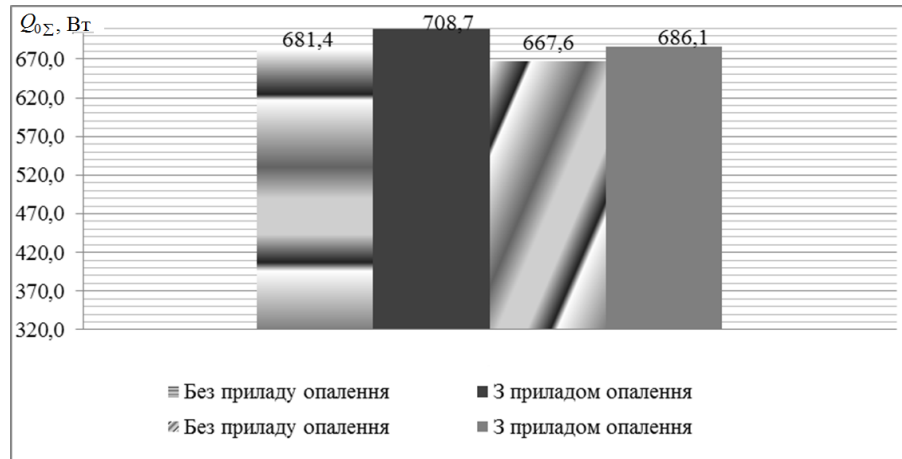


Рис. 4.5 –Значення сумарної потужності теплових втрат моделі

Аналіз чутливості комфортної температури наведено у табл.4.3. Параметри базової моделі: огорожувальні конструкції відповідають $\text{Пр.1}, \alpha_0 = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C}}, t_0 = 60^\circ \text{C}, I_{\text{ins}} = 30 \text{ Вт/м}^2$. Отже, найвищий вплив на температуру комфорту має інтенсивність сонячної радіації. Вплив характеристики приладу опалення, а саме його температури та коефіцієнта тепловіддачі, є значно нижчим і становить 0,0044 та 0,0042 відповідно. Найнижчий вплив огорожувальних конструкцій – 0,0015 і 0,0007 для зовнішньої стіни та вікна відповідно, це обумовлено вузьким діапазоном зміни цих параметрів. Комфортна температура у приміщенні в першу чергу залежить від активності людини, типу одягу [133], при проектуванні будівель потрібно враховувати надходження сонячної радіації, що дозволяє знизити комфортну температуру повітря у приміщенні приблизно на $0,7^\circ \text{C}$, а отже, і сумарне енергоспоживання.

Табл. 4.3 – Чутливість комфортної температури $t_{\text{вн}}$

Фактор	R_z	R_b	α_0	t_0	I_{ins}
Чутливість	0,0007	0,0015	-0,0042	0,0045	0,035

I_{ins} – інсоляційні теплонадходження, Вт/м^2 ; R_g – термічний опір теплопровідності вікна, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C/Вт})$.

Для підвищення якості розрахунків та забезпечення належних умов перебування у приміщенні розроблено методику визначення радіаційної температури на базі ефективних потоків внутрішніх поверхонь огорожень і приладу опалення. Таке уточнення дозволяє знизити комфортну температуру в приміщенні в середньому на $0,7^{\circ}\text{C}$, а сумарну потужність теплових втрат моделі на 2 – 3%. Урахування втрат тепла огорожувальною конструкцією за приладом опалення зумовлює зростання сумарної потужності теплових втрат на 3 – 4%. Подальші дослідження полягатимуть в аналізі впливу різних приладів опалення та визначенні економічних переваг такого зниження комфортної температури.

4.4. Аналіз потоків енергії / ексергії у ланцюгу джерело теплоти – огорожувальні конструкції будівлі

Для моделі, кімнати із однією зовнішньою стіною, технічні характеристики якої представлені у табл. 3.1 та 3.2, а параметри джерел теплоти зазначені у табл. 3.3. На рис. 4.6 представлено кількісні характеристики потоків енергії (а) та ексергії (б) від різних джерел теплоти. Найбільше споживає енергії та первинного палива електричний котел, потім кабельне та централізоване опалення. Низька енергоефективність електричного опалення обумовлена низькою енергоефективністю електростанцій. З енергетичної сторони централізоване теплопостачання менш ефективне за автономну котельню із-за втрат енергії в тепловій мережі та тепловому пункті. Очевидно, що зростання теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій значно зменшує енергетичне навантаження будівлі, та втрати вздовж усього ланцюга. Для кращих теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій споживання первинного палива ТНУ стає меншим, ніж автономним газовим опаленням, що пояснюється зміною термодинамічної ефективності ТНУ. Для обох варіантів огорожувальних конструкцій ТНУ споживають менше ексергії первинного палива, ніж автономне газове опалення. Це обумовлено більшою ексергетичною

цінністю газу, що споживається котлом, у порівнянні з вугіллям для електростанції. Якщо з енергетичної сторони кабелі в будинку є більш ефективними, ніж прилад опалення, то з ексергетичної сторони навпаки, оскільки цінність електричної енергії є більшою, ніж теплового потоку за обраних умов. Рис. 4.6, б показує, що ексергетичне навантаження суттєво не змінюється під час зміни теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій, проте навіть незначні зміни потреби в ексергії, обумовлюють значне зменшення споживання первинного палива. Представлені значні втрати ексергії зі сторони постачання порівняно зі стороною споживання наголошують на необхідності оптимального вибору тих чи інших елементів системи теплопостачання.

У табл. 4.4 продемонстровано, що під час зростання ефективності виробництва і постачання електричної енергії, споживання енергії / ексергії первинного палива при використанні ТНУ зменшується від 298,29/310,23 до 232,01/241,29 кВт·год для теплового захисту, що відповідає нормам 80- років, і при обраних умовах розрахунку становить навіть меншу величину, ніж потреба на опалення 277,44/15,35кВт·год. Проведений ексергетичний аналіз також свідчить про зменшення споживання ексергії первинного палива під час зростання ефективності виробництва і постачання енергії, однак потреба в ексергії первинного палива є більшою, ніж та ексергія, що втрачається в будівлі. Енергетичний та ексергетичний аналізи демонструють зростання ефективності ТНУ при зростанні теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій за рахунок зниження температурного потенціалу системи опалення.

Втрати енергії / ексергії для ланцюга «виробництво – споживання теплової енергії»

На рис. 4.7 представлено втрати енергії та ексергії в різних елементах системи теплопостачання та будівлі. Аналізуючи рис. 4.7 а, де представлено втрати енергії та ексергії для централізованого теплопостачання, можна стверджувати, що з енергетичної точки зору доцільніше оптимізувати огороження будівлі, потім систему вентиляції (слід нагадати, що обрана модель відповідає нормам 80-х років, при зростанні термічного опору огорожень

витрати енергії на вентиляцію стали б більшими за витрати в огорожувальних конструкціях), далі слід звернути увагу на котел (зростання ефективності використання газу характерне для конденсаційних котлів), теплові мережі, тепловий пункт та прилад опалення. Найбільші втрати ексергії характерні для котла, далі в приладі опалення, тепловому пункті, теплових мережах в огороженнях та вентиляції відповідно. Якщо говорити про автономну котельню, то найбільші втрати енергії, як і в попередньому випадку, на вентиляцію та через огорожувальні конструкції. При ексергетичному аналізі особливу увагу слід звернути на котел та прилад опалення. Отже при проектуванні будівлі із низьким споживанням ексергії необхідно сконцентрувати особливу увагу на джерелі теплоти або використовувати низькотемпературні системи опалення.

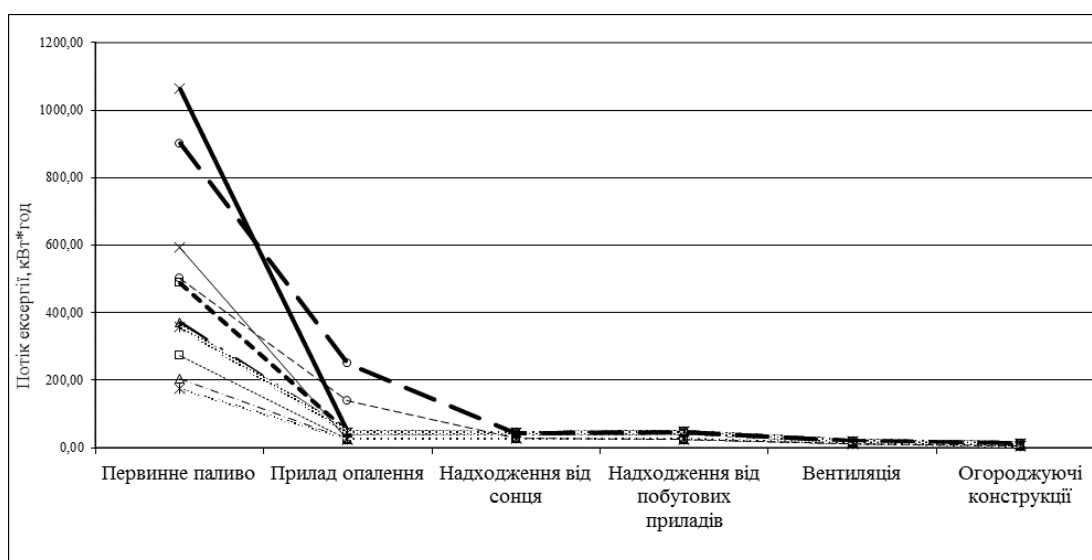
Таблиця 4.4 – Значення енергії / ексергії для ланцюга із ТНУ при різних ефективності виробництва і передачі електричної енергії

Ефективність виробництва і передачі електричної енергії	Енергія / ексергія первинного палива, 14		Енергія/ексергія, що втра- чається будівлею, кВт·год	
	Тепловий захист будівлі відповідає			
	нормам 80-х років	Вимогам 2008	нормам 80- х років	Вимогам 2008
$\eta_0 = 0,35, \eta_1 = 0,82$	345,58/359,41	168,17/175,27	277,44/15,35	168,01/12,1
$\eta_0 = 0,35, \eta_1 = 0,95$	298,29/310,23	145,1/151,28		
$\eta_0 = 0,45, \eta_1 = 0,95$	232,01/241,29	94,25/117,66		

При ексергетичному аналізі ланцюга із електричним котлом визначаємо значні втрати ексергії в електричному котлі, що свідчить про недоцільність переведення високоякісної електричної ексергії в ексергію теплового потоку. Аналогічне пояснення значних втрат ексергії за умови використання кабельного опалення в кабелях.



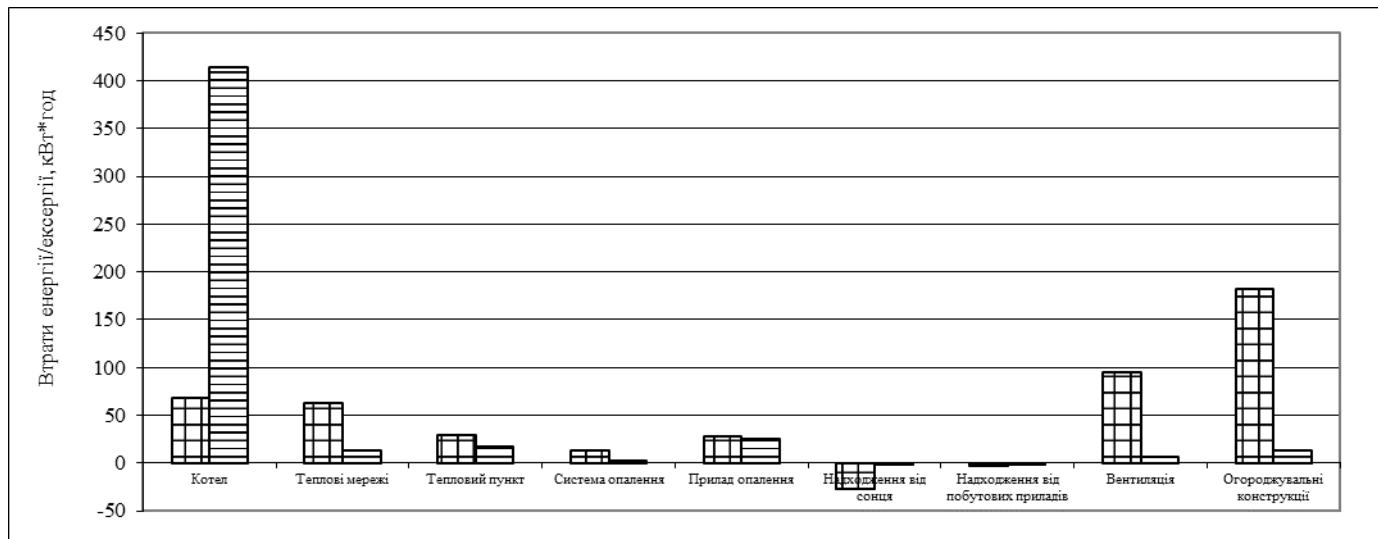
а)



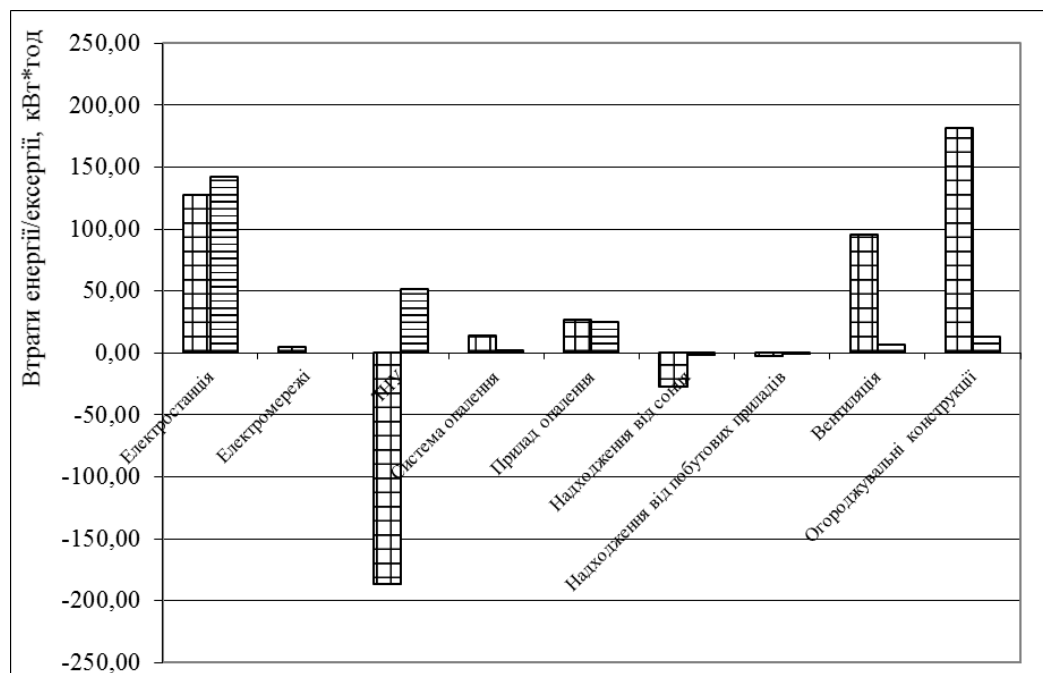
б)

Тепловий захист будівлі відповідає нормам 80-х років		Тепловий захист будівлі відповідає вимогам 2008 р	
- □ -	Централізоване теплопостачання	 □	Централізоване теплопостачання
— △ —	Газовий котел	--- △ ---	Газовий котел
— × —	Електричний котел	— × —	Електричний котел
..... *	ТНУ	 *	ТНУ
— ○ —	Кабельне опалення	— ○ —	Кабельне опалення

Рис. 4.6 – Потоки енергії / ексергії для різних джерел теплоти



а)



б)

Рис. 4.7 –Втрати енергії, ексергії для різних джерел теплоти:

а) централізоване тепlopостачання; б) ТНУ



втрати енергії



втрати ексергії

У системі із ТНУ (рис. 4.7 б) значні втрати існують в електричній станції, існують втрати ексергії і в ТНУ, вони є більшими, ніж втрати в огорожувальних конструкціях і на вентиляцію.

Отже проведений енергетичний і ексергетичний аналіз різних джерел тепlopостачання демонструє різний розподіл втрат вздовж ланцюга виробництва

– споживання теплової енергії. Найбільші втрати енергії характерні для огорожувальних конструкцій та системи вентиляції, а ексергетичні втрати є максимальними на початку ланцюга, що свідчить про використання високоякісних енергетичних ресурсів для задоволення низькоякісних енергетичних потреб. Впливає необхідність застосування систем опалення і джерел теплоти, що споживають низькоякісну енергію. Якщо говорити про перспективність систем опалення то радіаторне опалення з ексергетичної сторони є вигіднішим, ніж кабельний обігрів, в подальшому слід проаналізувати ефективність використання теплої підлоги та конвекторних систем, де температурні рівні є нижчими.

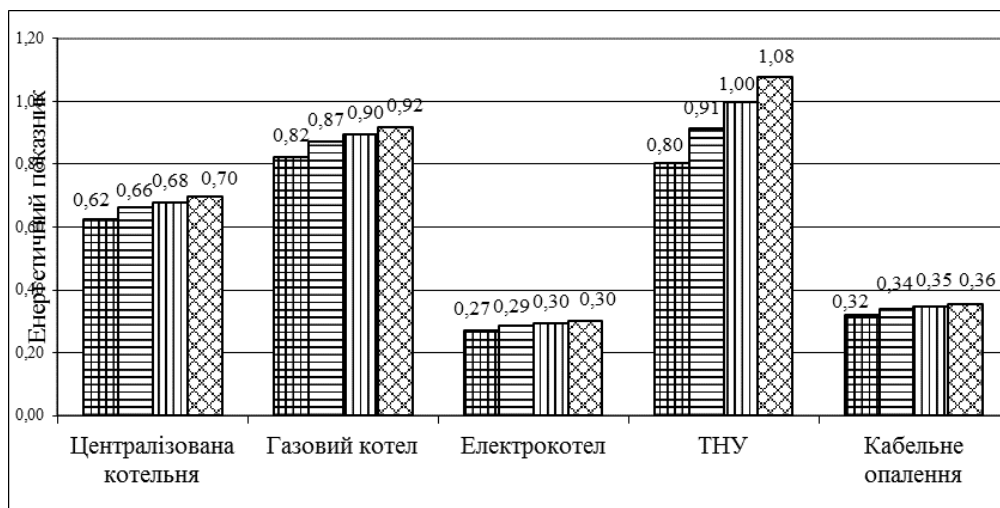
Отже із наведених діаграм можна стверджувати, що для створення будівлі із низьким споживанням ексергії, слід особливу увагу звернути на джерело теплоти, використовувати вторинні енергоносії, низькотемпературні системи опалення і збільшувати термічний опір огорожувальних конструкцій. Перспективними будівельними системами, для яких визначена достатньо висока ексергетична ефективність є система опалення «тепла підлога» із температурними рівнями $45/30^{\circ}\text{C}$, конвектори $65/55^{\circ}\text{C}$ та конденсаційні котли $45/30^{\circ}\text{C}$ або $65/55^{\circ}\text{C}$ [166].

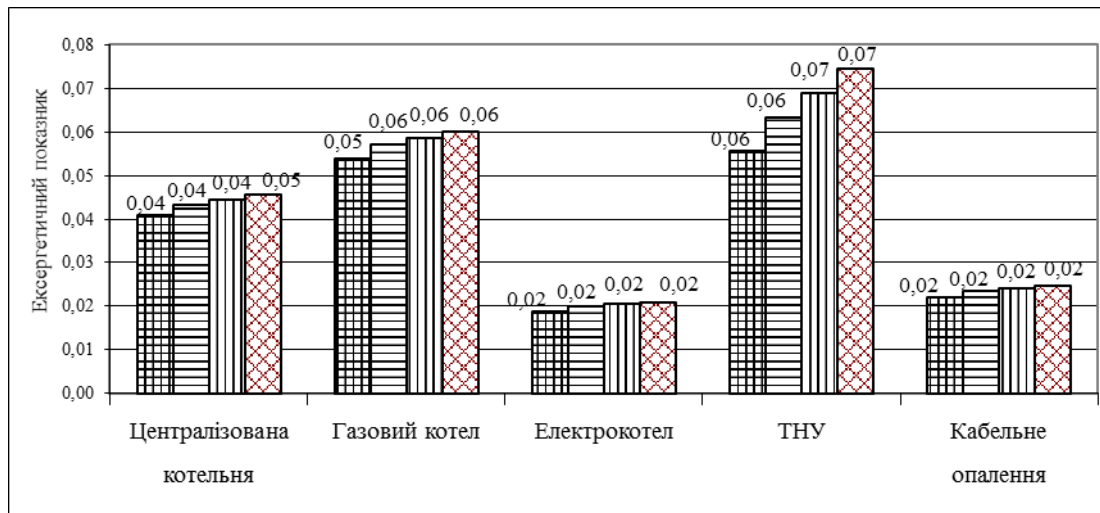
Енергетичні та ексергетичні показники розраховується за опалювальний період, згідно із співвідношеннями (2.29) та (2.30) для чотирьох варіантів огорожувальних конструкцій: 1) термічний опір огорожувальних конструкцій відповідає нормам 80-х років; 2) термічний опір огорожувальних конструкцій відповідає нормам 90-х років; 3) термічний опір огорожувальних конструкцій відповідає нормам 2006 року; 4) термічний опір огорожувальних відповідає сучасним вимогам.

На рис. 4.8 а представлено запропоновані показники ефективності використання первинного палива для різних джерел теплоти. Очевидно, що найменшу кількість первинного палива споживають ТНУ, потім автономне опалення, централізоване, кабельне та електричне. Більші тенденції росту енергоефективності ТНУ при зростанні теплового захисту обумовлені

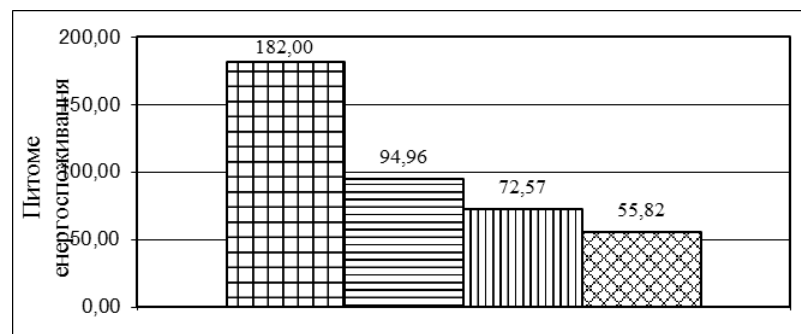
збільшенням енергоефективності ТНУ. При найнижчому тепловому захисті енергетична ефективність ТНУ (0,8) є нижчою ніж газового котла (0,82). Це наголошує на необхідності підвищення термічного опору огорожувальних конструкцій при застосуванні системи із джерелом теплоти ТНУ. Ексергетичні показники (рис. 4.8б) для ТНУ є вищими, ніж для автономної котельні при всіх розглянутих варіантах огорожувальних конструкцій, це обумовлено більшою цінністю природного газу, ніж кам'яного вугілля, що використовується для виробництва електроенергії. Порівняння запропонованого енергетичного показника та питомого споживання теплоти за опалувальний період показують, що останній не залежить від джерела теплоти, а змінюється тільки при зміні теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій. Це обґрунтовує доцільність використання η_e для порівняння ефективності різних будівель, оскільки він залежить від теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій та від обраного джерела теплоти.

Для ексергетичного показника ефективності використання первинного палива характерні ті ж тенденції, що і для енергетичного. Однак необхідність використання таких критеріїв пояснюється можливістю враховувати взаємозв'язки енергій різної фізичної природи в системі теплопостачання та дисипативні втрати потужності в елементах цієї системи, чим обумовлено подальший розвиток ексергетичного аналізу для оптимізації систем та концепцій теплопостачання.





б)



в)

Рис. 4.8 – Показники енергоефективності будівель

а) енергетичні; б) ексергетичні; в) питоме енергоспоживання:

Термічний опір огорожувальних конструкцій			
	відповідає нормам 80-х років		відповідає нормам 2006 року
	відповідає нормам 90-х років		відповідає сучасним вимогам

4.5. Порівняння енергетичної та ексергетичної моделей теплового комфорту людини та апробація ексергетичної моделі теплового комфорту

На основі емпіричних співвідношень (2.40)–(2.69) розроблена математична модель людини в середовищі Mathcad у додатку 2А. Дана модель дозволяє визначити мінімальне споживання ексергії людським тілом, температуру повітря, що йому відповідає, та прогнозовану середню оцінку тепловідчуттів (*PMV*) людини відповідно до міжнародного стандарту EN ISO 7730. Вхідні параметри моделі дослідження представлені у табл.4.1. Вони необхідні для того, щоб порівняти структуру ексергетичного балансу людського тіла для зимових та літніх

умов. Для оцінки роботи моделі порівняємо результати розрахунку складових ексергетичного балансу людського тіла, з результатами [108].

На рис. 4.9, *а* представлена частка вхідних потоків ексергії, а на рис. 4.9, *б* – для вихідних, наведених в [108] для таких умов: $t_a=t_r=24\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_0=28\text{ }^{\circ}\text{C}$, відносна вологість =40 %, активність людини = 58 Вт/м², термічний опір одягу =0,124 м²·°C/Вт (що відповідає 0,8 *clo*), швидкість руху повітря =0,15 м/с. Очевидно, що накопичення ексергії у ядрі та оболонці є незначним – 0,006 та 0,009 % відповідно, тому при розрахунках його не враховуватимемо.

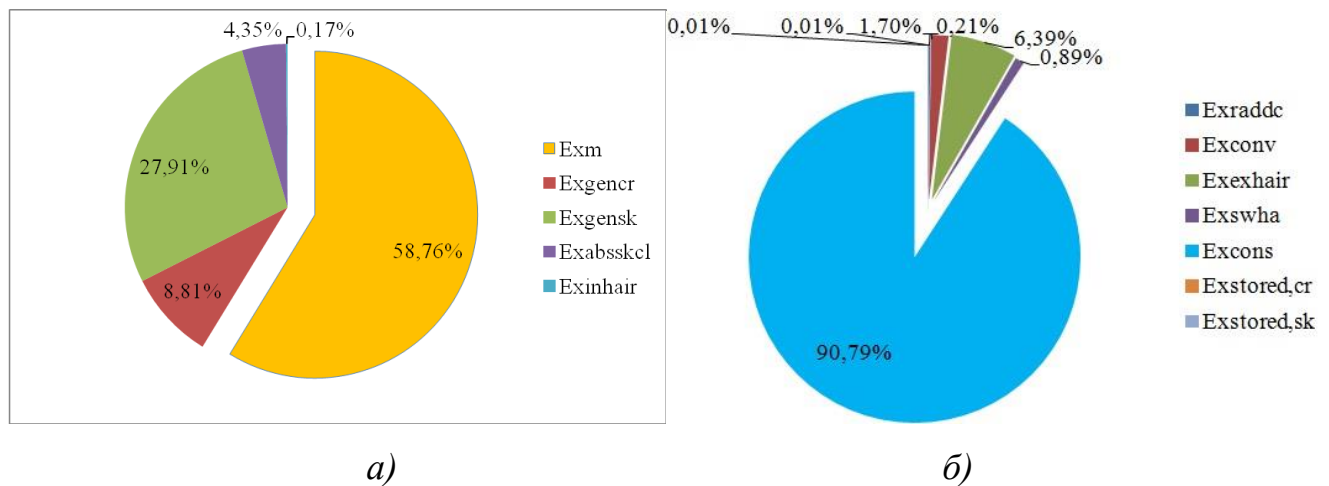


Рис. 4.9 – Структура ексергетичного балансу людського тіла [106]

На рис. 4.10, *а*, *б* представлена частка вхідних і вихідних потоків ексергії для розробленої стаціонарної моделі людини без врахування накопичення ексергії та енергії у ядрі та оболонці для умов аналогічних [108]. Баланс вхідних потоків отриманий за допомогою розробленої моделі, аналогічний прикладу, представленою автором в [108], рис. 4.9. Баланс вихідних потоків ексергії відмінний, наприклад споживання ексергії людським тілом та ексергія повітря, що видихається, відрізняються на 4 % порівняно з моделлю [108]. Похибка результатів становить в середньому 4 %. Отже дану модель доцільно використовувати у подальшому дослідженні. На рис. 4.11 зображений баланс ексергії людського тіла для зимового періоду. Відповідні параметри моделі дослідження представлені у табл. 4.1: $t_a=t_r=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_0=0^{\circ}\text{C}$, відносна вологість =40 %, активність людини =58 Вт/м², термічний опір одягу = 0,155 м²·°C/Вт (що відповідає 1 *clo*), швидкість руху повітря =0,15 м/с. Структура вихідних потоків

ексергії змінюється при зміні умов оточуючого середовища та параметрів мікроклімату у кімнаті. Якщо для літніх умов основна частка вихідного потоку ексергії припадала на споживання людським тілом – 86 %, то для зимових умов – на ексергію випромінювання – 53 %, а на споживання ексергії людським тілом – лише 16 %. Це пояснюється більшою різницею між температурою поверхні шкіри та оточуючого середовища. Температура повітря у приміщенні приймалася рівною 24 та 20 °С для літніх і зимових умов відповідно, зростання абсолютної величини конвективного та радіаційного теплообміну у балансі обумовлює зменшення частки споживання ексергії людським тілом.

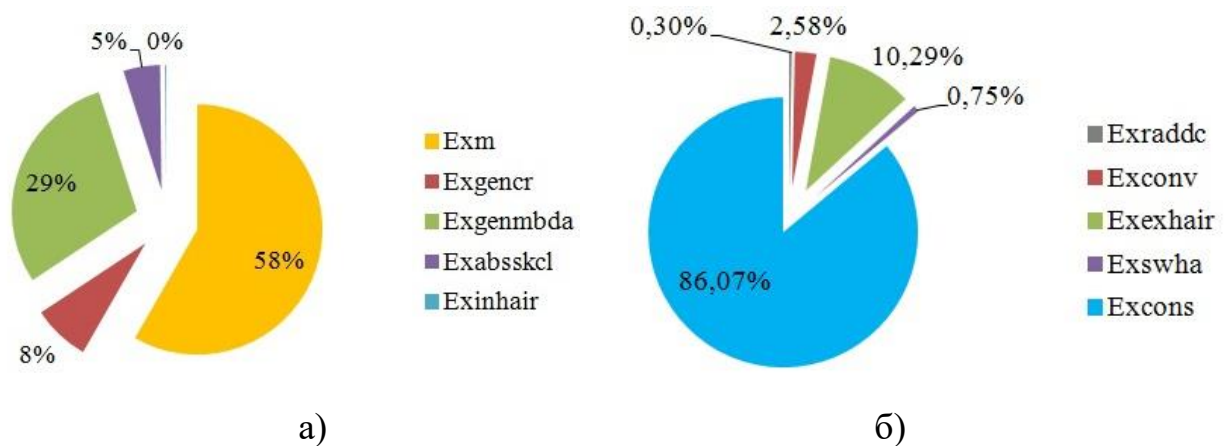


Рис. 4.10 – Структура ексергетичного балансу людського тіла у теплий період року: а – вхідний потік ексергії; б – вихідний потік ексергії

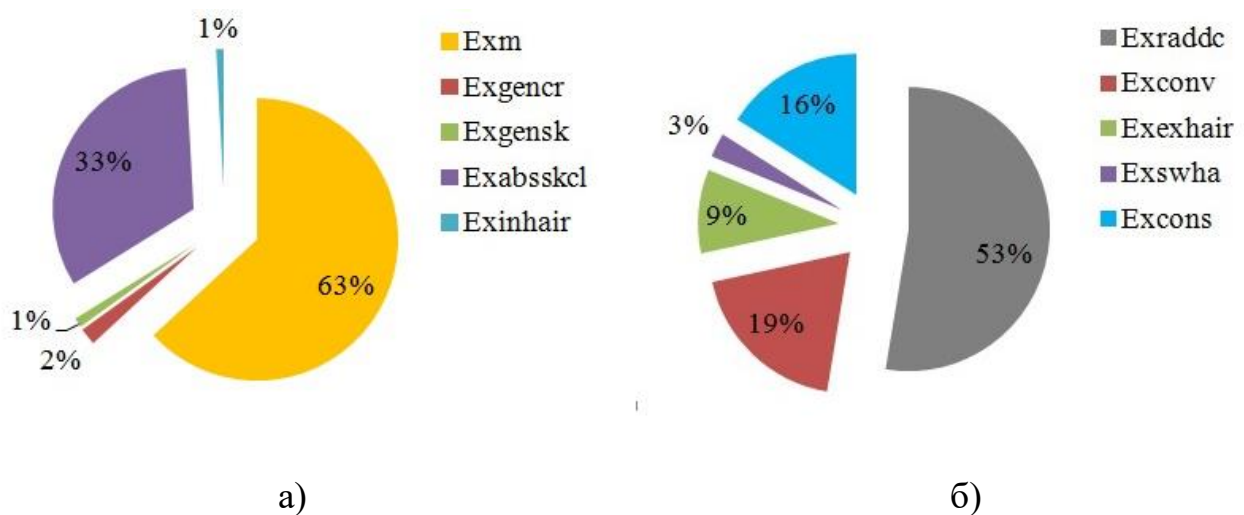


Рис. 4.11 – Структура ексергетичного балансу людського тіла у холодний період року: а – вхідний потік ексергії; б – вихідний потік ексергії

На рис. 4.12, 4.13 представлена залежність споживання ексергії від середньої радіаційної температури та температури повітря у кімнаті для параметрів системи, що представлені у табл. 4. 1. Споживання ексергії людським тілом змінюється залежно від параметрів мікроклімату у кімнаті, від параметрів людини. На рис. 4.12 представлено зміну споживання ексергії людським тілом залежно від температури повітря у кімнаті. Різні криві відповідають різним значенням середньої радіаційної температури приміщення, інші параметри – незмінні. За низької t_a споживання ексергії зростає за рахунок тремтіння людського тіла, при зростанні температури в кімнаті E_{cons} досягає свого мінімуму і зростає за рахунок охолодження поверхні шкіри шляхом випаровування вологи.

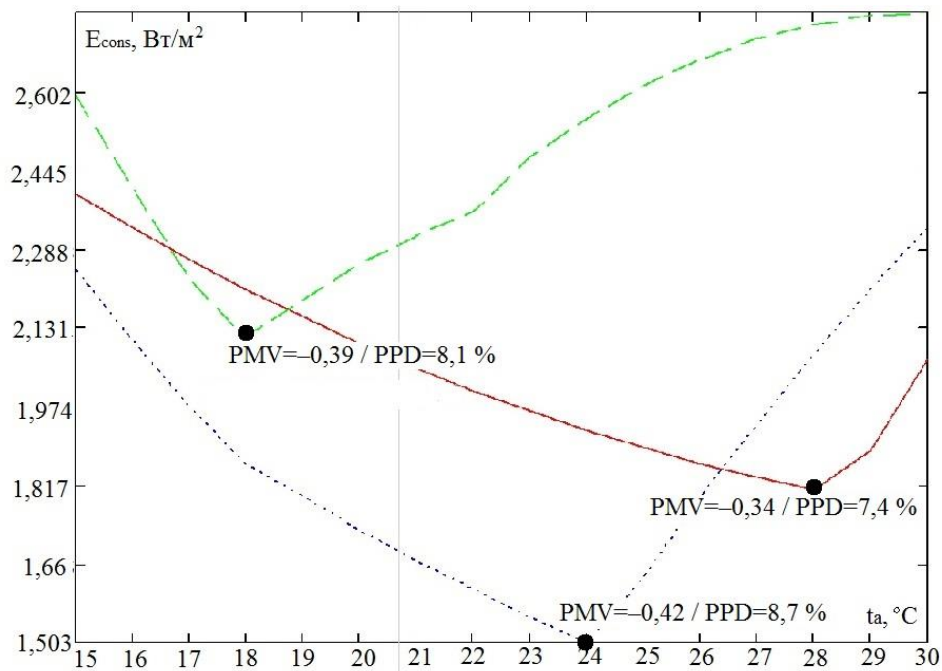


Рис. 4.12 – Графік залежності споживання ексергії людським тілом E_{cons} від температури повітря у кімнаті t_a , для різних значень середньої радіаційної температури:

t_r : — для $t_r=15$ °C; для $t_r=20$ °C; — для $t_r=28$ °C; ● — мінімум споживання ексергії

На графіку 4.12 для точок, що відповідають мінімуму споживання ексергії, оцінено показник PMV та PPD . PPD – це прогнозований процент незадоволених даним середовищем, основні показники тепловідчуттів людини відповідно до міжнародного стандарту EN ISO 7730. Значення PMV знаходиться в межах $-0,34$ –

0,42. У [110] мінімум споживання ексергії відповідає значенню $PMV=-0,611$ (однак там температура відліку ексергії приймалася рівною температурі повітря у кімнаті).

На рис. 4.13 представлена поверхня, що відображає залежність споживання ексергії людським тілом від t_a та t_r в діапазоні змін t_a від 15 до 30 °С, t_r від 15 до 30 °С.

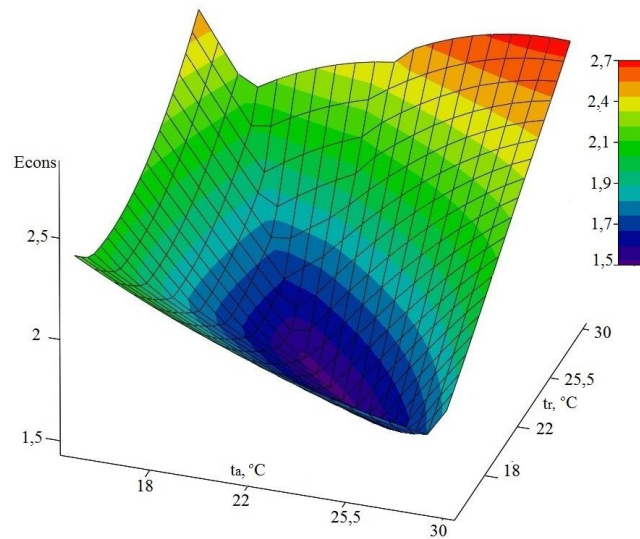


Рис. 4.13 – Поверхня споживання ексергії людським тілом E_{cons} залежно від температури повітря в кімнаті t_a та середньої радіаційної температури t_r

Проведені порівняння залежності $t_a(t_r)$ для різних моделей теплового комфорту представлені на рис. 4.14.

Відмінність між температурою внутрішнього повітря, яка потрібна для забезпечення комфортних умов при ексергетичному підході та при $PMV=0$, лежить у діапазоні 0,8–1,4 °С при різних значення t_r . З метою порівняння результатів для різних моделей теплового комфорту визначено середньоквадратичне відхилення комфортної температури повітря у кімнаті у порівнянні із комфортною температурою, за якої прогнозовані тепловідчуття людини відповідатимуть індексу $PMV=0$ (тепловідчуття – «комфортно»). Енергетична модель людського тіла, для якої $PMV=0$, обрана базовою, оскільки є найпоширенішою і лежить в основі міжнародного стандарту EN ISO 7730. Найвище значення середньоквадратичного відхилення комфортної температури

повітря характерне для моделі з $PMV=1$ та -1 і становить $7,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $7,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ відповідно. Середньоквадратичне відхилення для моделі Богословського дорівнює $5,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $5,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, для моделі із $PMV=-0,5$ та $0,5-3,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ відповідно. Найнижче значення середньоквадратичного відхилення відповідає ексергетичній моделі теплового комфорту і рівне $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

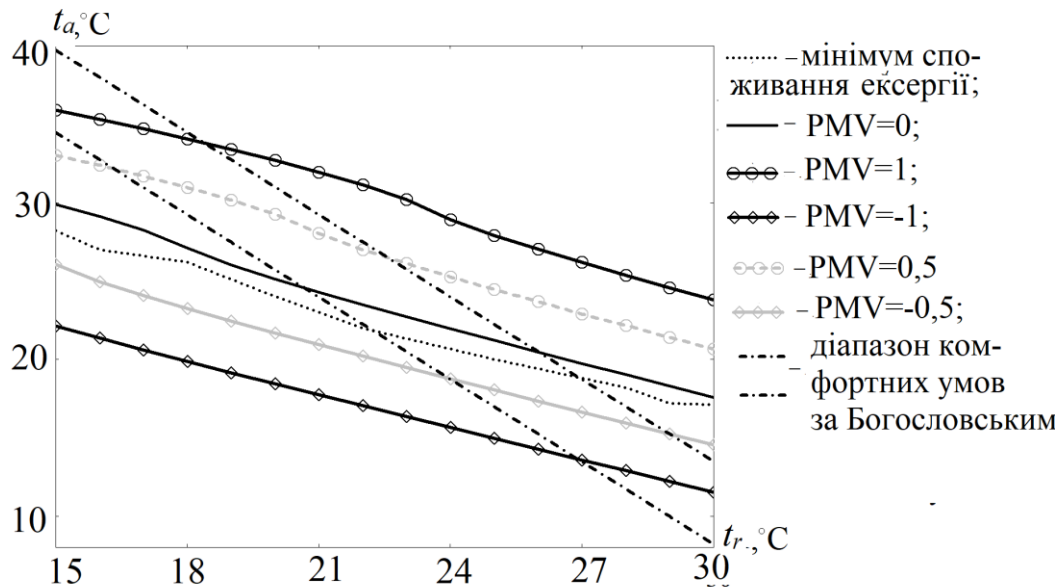


Рис. 4.14 – Залежність середньої радіаційної температури t_r повітря від температури повітря у кімнаті t_a для різних моделей теплового комфорту

У літній період конвективний та радіаційний теплообмін з поверхні людського тіла є незначним порівняно з іншими складовими, що пов'язано з малою різницею між температурою поверхні шкіри та повітря в кімнаті. У зв'язку з цим частка споживання ексергії людським тілом у загальному балансі зростає порівняно із зимовими умовами.

З наукової точки зору показник мінімуму споживання ексергії є більш прийнятним, ніж показник прогнозованої середньої оцінки тепловідчуттів людини, розрахований відповідно до EN ISO 7730. Дослідження показали, що мінімум споживання ексергії при температурі оточуючого середовища 0°C , яка відповідає зимовим умовам (інші дослідники проводили моделювання, виходячи з припущення, що температура повітря у кімнаті дорівнює температурі зовнішнього середовища), відповідає значенню $PMV=-0,34$ до $-0,42$ (це відчуття

легкої прохолоди). Для умов: $t_o=t_a=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, для мінімуму споживання ексергії – $PMV=-0,611$ [111].

Умови дослідження для порівняння різних моделей комфорту відповідають параметрам, наведеним у табл. 4.1. (зима). Модель Богословського – найпростіша і представлена відповідним діапазоном $t_a(t_r)$, її рекомендовано використовувати при застосуванні систем опалення, що значно підвищують радіаційну температуру приміщення. Із рис. 4.14 можна зробити висновки, що при середній радіаційній температурі приміщення $=27\text{ }^{\circ}\text{C}$ верхня межа діапазону комфортної температури відповідає PMV , близькому до нейтральних умов, а нижня межа $PMV=-1$ (тепловідчуття «холодно»). Якщо середню радіаційну температуру прийняти $=18\text{ }^{\circ}\text{C}$, то верхня межа комфортної температури відповідає $PMV=1$, а нижня – близька до комфортних умов. Отже при високій середній радіаційній температурі у моделі Богословського доцільно обирати найвище значення із температурного діапазону, а при низькій – найнижче. Однак при залученні сучасних засобів комп'ютерної техніки при проектуванні та дослідженні складної системи ДЛК слід використовувати модель Фангера. Це пояснюється тим, що така модель дозволяє враховувати фактори, що залежать від людини, оточуючого середовища та забезпечити необхідний рівень комфорту за допомогою показника прогнозованої середньої оцінки. Відмінність між розробленою моделлю та моделлю [96], що лежить в основі міжнародного стандарту [7] полягає у тому, що прогнозована середня оцінка тепловідчуттів людини визначається на основі емпіричної моделі, а в основах визначення мінімуму споживання ексергії лежить підхід, що ґрунтується на другому законі термодинаміки і полягає у мінімізації деструкцій ексергії. Порівняння значень середньоквадратичного відхилення комфортної температури від базової для різних моделей теплового комфорту людини показали найнижче значення середньоквадратичного відхилення відповідає ексергетичній моделі теплового комфорту і рівне $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отже можна допустити, що забезпечення комфортних умов відповідно до ексергетичного підходу дозволяє знизити температуру повітря у кімнаті, в середньому на $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, а отже – зекономити споживання енергоресурсів.

4.6. Чисельний експеримент та створення регресійної моделі для визначення комфортної температури відповідно до енергетичного та ексергетичного підходів

Аналізуючи запропонований алгоритм на рис. 2.6 можна зробити висновки, що розрахунок комфортної температури повітря у кімнаті є складним завданням. Тому для спрощення розробимо регресійну модель для обчислення комфортної температури повітря у кімнаті відповідно до енергетичного та ексергетичного підходів, що значно спростить розрахунки, а також, дозволить оцінити вплив факторів на комфортну температуру. У табл. 4.5 представлені значення рівнів та інтервалів варіювання факторів для енергетичного підходу щодо вибору комфортної температури у приміщенні, а у табл. 4.6 для ексергетичного.

Для отримання регресійної моделі проведемо повний факторний експеримент типу p^k , де число факторів $k=5$, число рівнів $p=2$, число дослідів $N=2^5=32$ [167,168]. Матриця планування експерименту представлена у табл. 4.12 для енергетичного та ексергетичного аналізів. Кодування даних проводиться за наступним співвідношенням:

$$\bar{X}_i = \frac{X_i - X_i^0}{\Delta X_i}, \quad (4.1)$$

де X_i^0 – основний рівень фактору;

ΔX_i – інтервал варіювання.

Таблиця 4.5 – Варіювання факторів для енергетичного аналізу

Параметр	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	-1	0	1	
t_r, X_1	15	22,5	30	7,5
PMV, X_2	-1	0	1	1
M, X_3	50	60	70	10
I_{clo}, X_4	0,0775	0,155	0,2325	0,075
φ, X_5	40	50	60	10

Таблиця 4.6 – Варіювання факторів для ексергетичного аналізу

Параметр	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	-1	0	1	1
t_r, X_1	15	22,5	30	7,5
T_0, X_2	263	273	283	10
M, X_3	50	60	70	10
I_{clo}, X_4	0,075	0,155	0,2325	0,075
φ, X_5	40	50	60	10

Матриця планування експерименту для визначення залежності $t_{comf}(t_r, PMV, M, I_{clo})$ представлена у табл.4.7, аналогічною, вона буде для ексергетичної моделі, де замість показника PMV , використовується параметр t_0 . Для побудови матриці планування 5-и факторного експерименту застосовується метод чергування знаків. А саме у першому стовпці знаки змінюються по чергово, у другому – через два, третьому через чотири, у четвертому – через вісім символів і т.д.

Таблиця 4.7 – Основна матриця планування експерименту

№ експерименту	t_r	$PMV (T_0)$	M	I_{clo}	φ
1	-1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1	-1
4	1	1	-1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1	-1
6	1	-1	1	-1	-1
7	-1	1	1	-1	-1
8	1	1	1	-1	-1
32	1	1	1	1	1

Для оцінки адекватності моделі визначено такі коефіцієнти та критерії: коефіцієнт множинної кореляції та коефіцієнт детермінації, критерій Фішера. Для оцінки статичної значимості коефіцієнтів регресії використовувався критерій Стюдента.

Рівняння регресії, для енергетичної моделі без врахування сумісного впливу факторів, на основі результатів експерименту, для кодованих значень факторів матиме наступний вигляд:

$$t_{comf} = -5,81 \cdot \bar{X}_1 + 6,4 \cdot \bar{X}_2 - 2,53 \cdot \bar{X}_3 - 4,96 \cdot \bar{X}_4 - 0,48 \cdot \bar{X}_5 + 23,68 \quad (4.2)$$

Статистичні критерії [169]: коефіцієнт кореляції: $R=0,977$; коефіцієнт детермінації: $R^2=0,954$; нормований коефіцієнт детермінації: $R^2_{adjusted}=0,945$; критерій Фішера: $F_{спост}=108,24$ $F_{кр}=2,69$. Оскільки $F_{спост} > F_{кр}$, то рівняння регресії є статистично значущим.

Критерії Стюдента: $t_{b_0}=53,43$; $t_{b_1}=-13,11$; $t_{b_2}=14,51$; $t_{b_3}=-5,71$; $t_{b_4}=-11,18$; $t_{b_5}=-1,07$ $t_{табл}=0,69$. Оскільки всі критерії Стюдента більші за величину $t_{табл}$, тому всі коефіцієнти є статистично значущими. Використовуючи рівняння регресії можна зробити наступні висновки. Вплив факторів на комфортну температуру повітря у кімнаті зростає у наступному ряді φ , M , I_{clo} , t_r , PMV . Отже найвищий вплив на комфортну температуру повітря у приміщенні має обраний рівень комфорту, потім середня радіаційна температура приміщення, термічний опір одягу, рівень метаболізму та відносна вологість внутрішнього повітря. Отримана регресійна модель дала змогу оцінити вплив обраних факторів на комфортну температуру. Для підвищення точності розрахунків розроблена регресійна модель для $PMV=0$, яка представлена наступним співвідношенням:

$$t_{comf} = -6,01 \cdot \bar{X}_1 - 2,51 \cdot \bar{X}_3 - 4,96 \cdot \bar{X}_4 - 0,42 \cdot \bar{X}_5 + 23,82, \quad (4.3)$$

Статистичні показники: $R=0,995$; $R^2=0,99$; $R^2_{adjusted}=0,986$; $F_{спост}=255$; $F_{кр}=3,06$. Оскільки $F_{спост} > F_{кр}$, то рівняння регресії є статично значущим. Критерії Стюдента: $t_{b_0}=92,637$; $t_{b_1}=-23,45$; $t_{b_3}=9,78$; $t_{b_4}=20,61$; $t_{b_5}=1,65$, $t_{табл}=0,7$.

Оскільки всі критерії Стюдента більші за величину $t_{\text{табл}}$, тому всі коефіцієнти є статистично значущими. Регресійна модель (4.3) дозволить підвищити точність визначення комфортної температури у порівнянні із моделлю (4.2), оскільки нормований коефіцієнт детермінації зростає від 0,95 до 0,99.

Рівняння регресії для ексергетичної моделі без врахування сумісного впливу факторів, на основі результатів експерименту, для кодованих значень факторів матиме наступний вигляд:

$$t_{\text{conf}} = -4,58 \cdot \bar{X}_1 - 0,57 \cdot \bar{X}_2 - 4,43 \cdot \bar{X}_3 - 5,92 \cdot \bar{X}_4 - 0,397 \cdot \bar{X}_5 + 21,44 \quad (4.4)$$

Коефіцієнт кореляції: $R = 0,96$. Коефіцієнт детермінації: $R^2 = 0,92$. Нормований $R^2_{\text{adjusted}} = 0,9$. Критерій Фішера: $F_{\text{спост}} = 85,36$, $F_{\text{кр}} = 3,35$. Оскільки $F_{\text{спост}} > F_{\text{кр}}$, то рівняння регресії є статистично значущим.

Критерії Стюдента: $t_{b_0} = 56,29$, $t_{b_1} = -11,04$, $t_{b_2} = -1,27$, $t_{b_3} = -10,48$, $t_{b_4} = -14,19$, $t_{b_5} = -0,8$, $t_{\text{табл}} = 0,69$. Оскільки всі критерії Стюдента більші за величину $t_{\text{табл}}$, тому всі коефіцієнти є статистично значущими.

Використання рівняння регресії (4.4) значно спростить розрахунки потреби на опалення. Така модель показує, що вплив факторів на комфортну температуру повітря, відповідно до ексергетичного підходу зростає у наступному ряді: відносна вологість повітря, температура зовнішнього повітря, вид діяльності людини, середня радіаційна температура, тип одягу людини відповідно.

На рис. 4.15 представлено умови комфортності відповідно до комплексу значень температури повітря та радіаційної у кімнаті відповідно до енергетичної та ексергетичної моделі. Згідно з енергетичним підходом комфортні умови відповідають $PMV=0$, а з ексергетичним – мінімуму споживання ексергії людським тілом. Очевидно, що за абсолютним значенням комфортна температура відповідно до ексергетичного підходу є нижчою у порівнянні з енергетичним. Середньоквадратичне відхилення комфортної температури відповідно до енергетичного підходу від комфортної температури відповідно до ексергетичного підходу для t_r , що змінюється від 15 до 30 °C (інші параметри є

базовими) становить $2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Середньоквадратичне відхилення розраховувалося для регресійної моделі у порівнянні з математичною, для середньої радіаційної температури у діапазоні $15 - 30^{\circ}\text{C}$ та базових інших параметрів моделі. Отже середньоквадратичне відхилення для енергетичної моделі $= 0,5^{\circ}\text{C}$, для ексергетичної моделі становить $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тому для визначення потреби на опалення, враховуючи енергетичний підхід можна використовувати регресійну модель, а використання регресійної моделі (4.4), суттєво спростить розрахунки комфортної температури відповідно до ексергетичного підходу, оскільки дозволяє оминати пошук мінімуму складної функції.

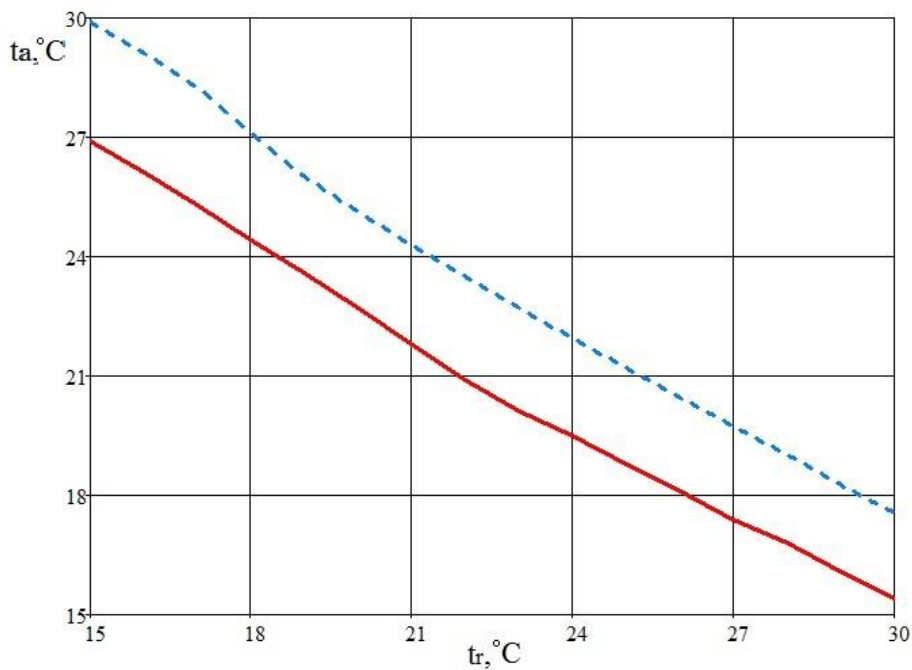


Рис. 4.15 – Умови комфортності відповідно до енергетичного та ексергетичного підходів:

— ексергетична модель; - - - енергетична модель

Показано на базі рівняння регресії, що ексергетична концепція забезпечення комфортних умов дає значення комфортної температури, що є нижчими від комфортної температури відповідно до енергетичного підходу в центрі матриці планування експерименту на $2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, тому розроблено модель для аналізу показників енергоефективності системи ДЛК, що дозволяє оцінити вплив параметрів людини та параметрів, що залежать від будівлі на потребу на опалення.

4.7. Аналізування впливу термомодернізації будівлі на зміну умов комфортності, параметрів мікроклімату та потреби на опалення будівлі

Для аналізу впливу термомодернізації на рівень теплового комфорту, а також на середню радіаційну температуру приміщення для віртуальної моделі приміщення рис.3.1 визначено зміну середньої радіаційної температури приміщення t_r , а також температури на внутрішній поверхні зовнішньої стіни t_{zs} для різних значень температури довкілля, а саме мінімальної та середньої за опалювальний період рис.4.16. Показано, що при зміні термічного опору огорожувальних конструкцій для віртуальної моделі кімнати від встановлених у 80-х роках до сучасних вимог [17], середня радіаційна температура приміщення зростає на 0,5 °C (для температури зовнішнього повітря $t_0=-1$ °C) та на 1,2 °C (для температури зовнішнього повітря $t_0=-21$ °C), температура внутрішнього повітря приймається рівною 20°C. Що обумовлено зростанням температури на внутрішній поверхні зовнішньої стіни на 1 та 3,7 °C відповідно. Для таких параметрів людини: $M=70$ Вт/м² та $I_{cl}=1$ clo оцінено зміну PMV та PPD при термомодернізації. Встановлено, що для $t_0=-1$ °C PMV змінюється від -0,26 до -0,19, а PPD від 6,4 до 5,8 %, а для $t_0=-21$ °C PMV – від -0,36 до -0,24, а PPD від 7,6 до 6,1 %.

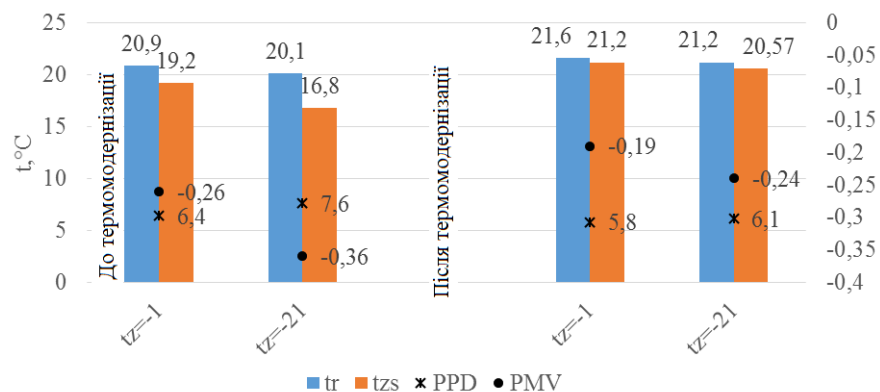


Рис.4.16 – Зміна середньої радіаційної температури та рівня забезпечення комфортних умов при термомодернізації

Для аналізу впливу термомодернізації на можливе зниження температури повітря у приміщенні, що відповідає комфортним умовам відповідно до енергетичного та ексергетичного підходів визначено зміну температури повітря у

приміщенні після термомодернізації для різних геометричних характеристик віртуальної кімнати рис.4.17.

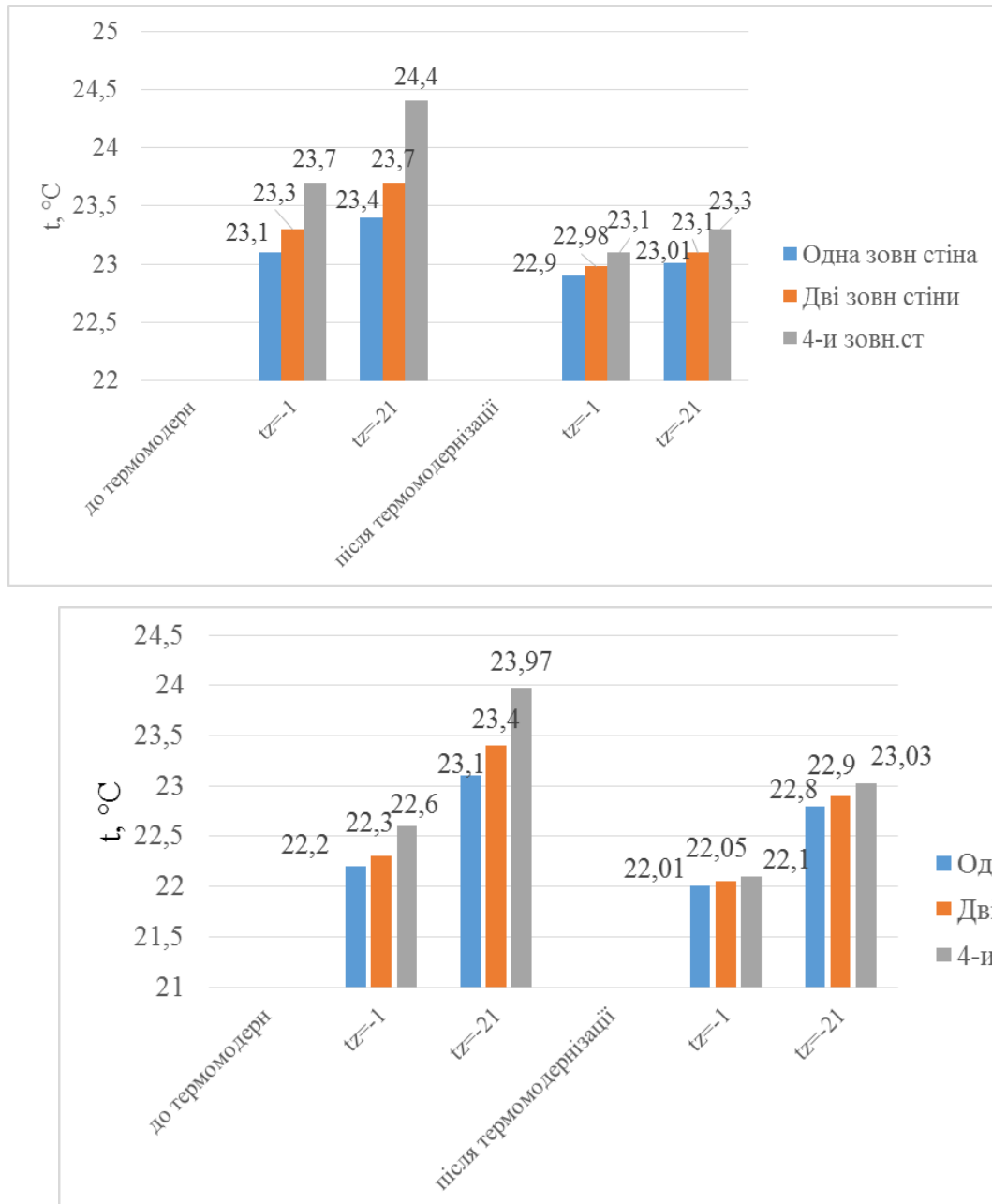


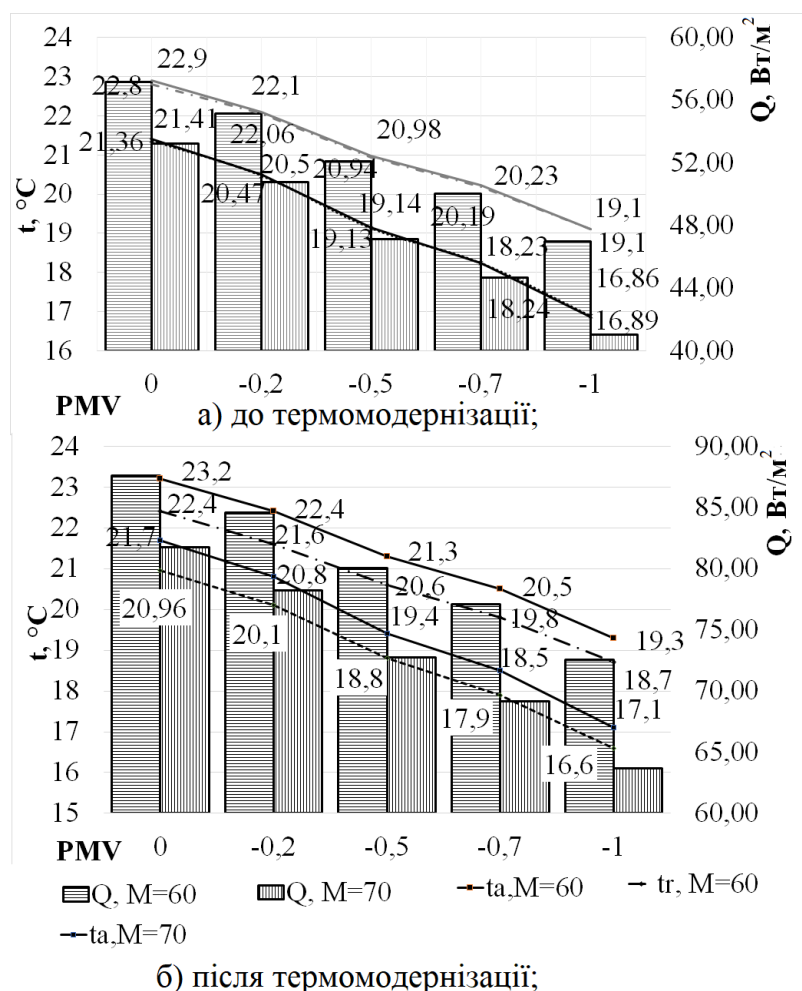
Рис.4.17 – Значення комфортної температури повітря у приміщенні до та після термомодернізації для різної геометрії кімнати:

а) енергетичний підхід до комфортних умов; б) ексергетичний

Аналізування зниження комфортної температури при термомодернізації, що обумовлено підвищенням середньої радіаційної температури показано на рис. 4.17. Встановлено, що при зростанні середньої радіаційної температури при термомодернізації можна знизити комфортну температуру повітря у приміщенні

на $0,3 - 0,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Це обумовлено тим, що зниження температури повітря у кімнаті обумовлює і зниження середньої радіаційної температури

Залежність потреби на опалення від категорії будівлі щодо забезпечення комфортних умов, а також від активності людини до та після термомодернізації представлено на рис.4.18 а та б відповідно. Аналізуючи рис.4.18 можна стверджувати, що термомодернізація знижує потребу на опалення на 53 %, зниження теплового комфорту до II-ої категорії будівлі обумовлює зниження потреби на опалення на 9 %, а сумісні термомодернізація та зниження рівня теплового комфорту обумовлюють зниження енергоспоживання на 68 %.



б)

Рис.4.18 – Залежність потреби на опалення від категорії будівлі щодо забезпечення комфортних умов: а) до термомодернізації; б) після термомодернізації

Застосування ексергетичного підходу до забезпечення ком-фортних умов у порівнянні з енергетичним дасть середньорічну економію для 9-и поверхового житлового багатоквартирного будинку (спорудженого у 2016 році) у розмірі 60 тис.грн., а зміна категорії будівлі з I-ої до II-ої – 120 тис.грн за умови використання тарифів централізованого опалення у м. Києві 2017р.

4.8. Алгоритм інтегрування розрахунків моделі людини у складну модель «джерело теплоти – огорожувальні конструкції»

На основі потокової діаграми для проведення енергетичного та ексергетичного аналізу потоків енергії та ексергії для системи «людина» запропонованої авторами [108] розроблено алгоритм, що дозволяє інтегрувати ексергетичну модель людини у складну систему ДК (рис. 4.20), тобто створити модель ДЛК.

Особливість даного алгоритму полягає у тому, що вперше ексергетична модель людини включена у складну систему ДЛК, шляхом визначення комфортної температури повітря, що у свою чергу відповідатиме рівню комфорту не нижчому за необхідний рівень очікувань PMV_n , що визначається відповідно до категорії будівлі [5]. Кожна категорія характеризується діапазоном PMV та сферою застосування. Оскільки всі розрахунки проводяться для зимового періоду, тому для PMV_n приймається нижня межа із діапазону, що відповідає категорії будівлі. Якщо комфортна температура відповідно до ексергетичного підходу забезпечує $PMV < PMV_n$, тоді розрахунок комфортних умов відбуватиметься згідно з енергетичним підходом.

Вхідними даними блоку «параметри оточуючого середовища» є: t_0 , P_s , φ_0 ; блоку «параметри людського тіла»: M , I_{clo} ; параметри будівлі: F_v , F_z , R_v , R_z . Вхідні дані використовуються для розрахунку комфортної температури відповідно до ексергетичного та енергетичного підходів. Для розрахунку комфортної температури відповідно до ексергетичного підходу використовується регресійна залежність (4.4), а відповідно до енергетичного модель (2.31–2.39). Оскільки t_{comf} , відповідно до ексергетичного підходу є нижчим за комфортну температуру

відповідно до енергетичного, тому робимо перевірку відповідності комфортних умов міжнародним вимогам за показником PMV . Далі на основі вхідних даних та отриманої t_{comf} визначається потреба на опалення.



Рис. 4.20 – Блок-схема інтегрування розрахунків моделі людини у складну модель ДК

4.9. Моделювання факторів впливу на потребу на опалення при застосуванні енергетичної та ексергетичної концепції щодо забезпечення комфортних умов

Для оцінки впливу різних факторів на потребу на опалення з ціллю її зменшення без шкоди здоров'ю людини на рис. 4.21 представлено дерево впливу факторів, діапазон зміни яких представлений у табл. 4.10 та табл. 4.11. Термічний опір зовнішньої стіни змінюється від 0,8 – 4 $\text{м}^2/(\text{К}\cdot\text{Вт})$, а площа огорожень – незмінна і відповідає даним табл. 3.1, надходження прямої сонячної радіації на вертикальну поверхню варіюється від 0 до 120 $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Результати впливу на потребу на опалення обраної методики розрахунку комфортних умов у приміщенні представлені на рис. 4.22. Потреба на опалення визначалася трьома способами: 1) із врахуванням енергетичної моделі теплового комфорту; 2) із врахуванням ексергетичної моделі теплового комфорту, що представлена співвідношенням (4.4); 3) температура повітря у кімнаті приймалася рівною 22 °С. Результати вказують, що найвища потреба на опалення для енергетичної моделі, для нормованої температури 22 °С – потреба на опалення є дещо нижчою. Для кількісної оцінки визначено середньоквадратичне відхилення потреби на опалення для t_r , що змінюється у діапазоні 15 – 30 °С, для ексергетичної моделі теплового комфорту у порівнянні з енергетичною. У даному випадку середньоквадратичне відхилення становить 47,69 Вт, в той час різниця між енергетичною та ексергетичною комфортною температурою становить 1 °С.

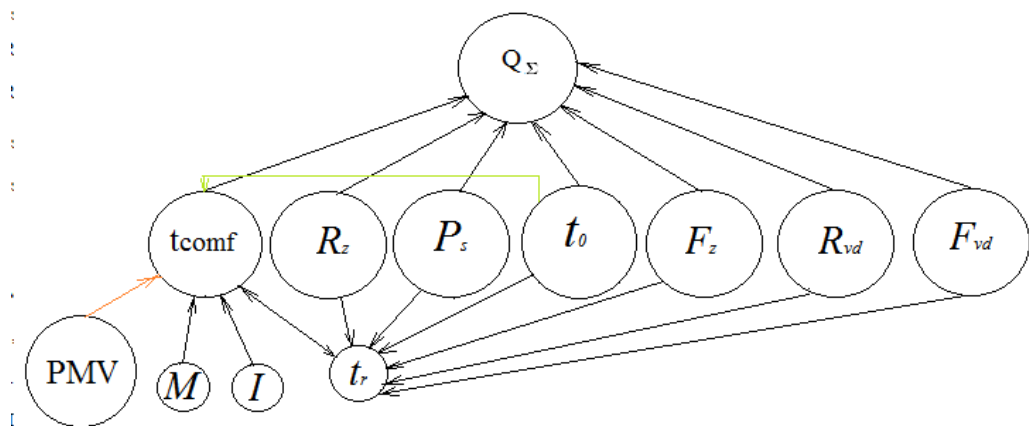


Рис. 4.21 – Дерево впливу факторів на комфортну температуру повітря у приміщенні та на потребу на опалення:

— даний зв'язок існує при використанні енергетичного підходу до комфортних умов; — даний зв'язок існує при використанні ексергетичного підходу до комфортних умов (оскільки t_0 – точка відліку ексергії)

На рис. 4.23 відображено моделювання впливу факторів, що залежать від людини, параметрів будівлі та зовнішнього середовища на потребу на опалення. Яка визначалася для мінімального та максимального значення параметра, при базових інших факторах. Суттєво знижують потребу на опалення параметри

оточуючого середовища, а саме температура зовнішнього повітря та надходження сонячної радіації.

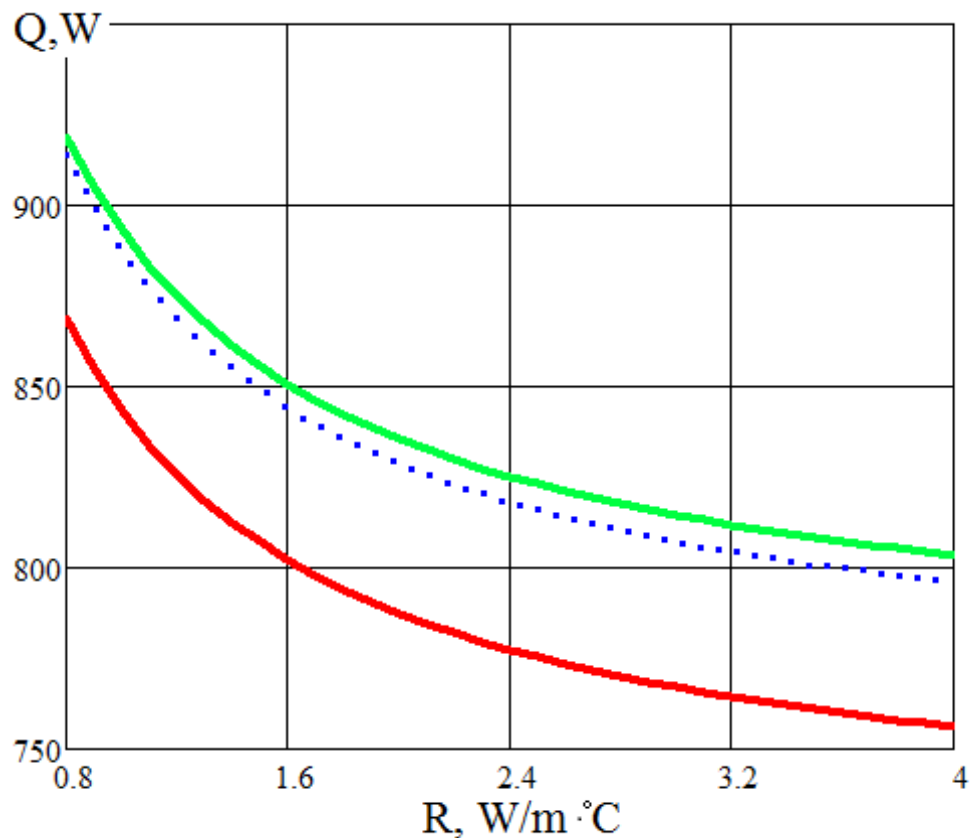


Рис. 4.22 – Залежність потреби на опалення від теплового захисту будівлі та від обраної моделі теплового комфорту:

— потреба на опалення, за умови що комфортні умови визначаються відповідно до ексергетичного підходу; — потреба на опалення, за умови що комфортні умови визначаються відповідно до енергетичного підходу; ····— потреба на опалення, за умови що температура внутрішнього повітря = 22 °C

Результати розрахунку чутливості потреби на опалення до впливу різних факторів за умови, що значення інших факторів є базовими представлено на рис. 4.24. Чутливість визначалася відповідно до наступного співвідношення:

$$\Omega = \frac{X_{\text{ср}}}{Q_{\text{ср}}} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta X}, \quad (4.5)$$

де Ω – дугова чутливість потреби на опалення;

$X_{\text{ср}}$ – середнє значення фактору;

$Q_{\text{ср}}$ – середнє значення потреби на опалення;

ΔQ – кількісна зміна потреби на опалення;

ΔX – кількісна зміна фактору.

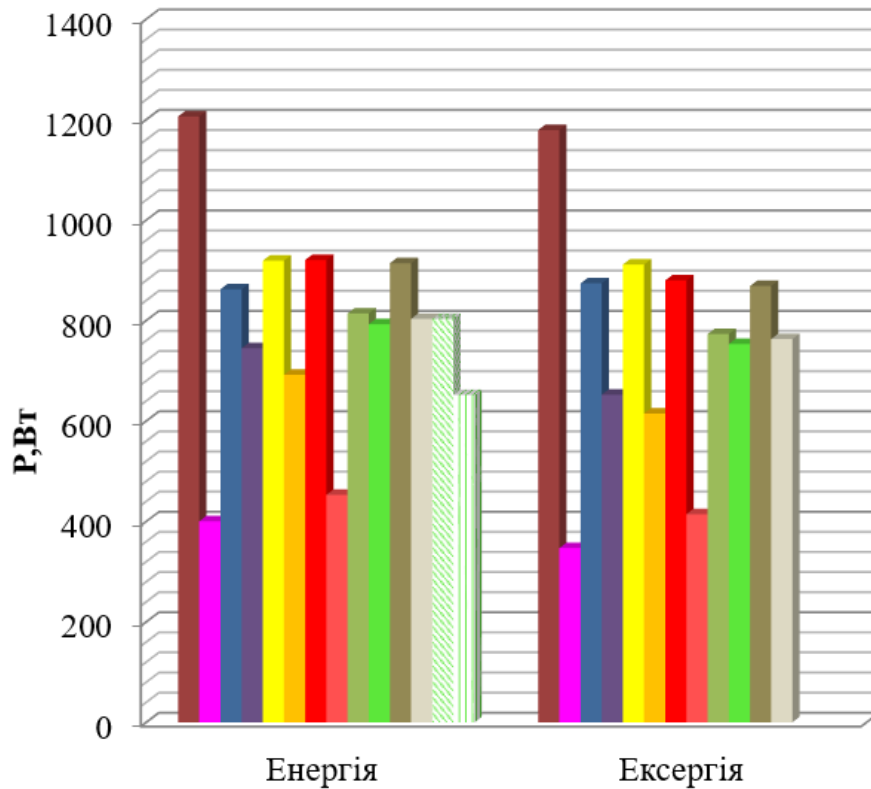


Рис. 4.23 – Вплив діапазону зміни факторів на потребу на опалення для енергетичного та ексергетичного підходу, щодо забезпечення комфортних умов:

■ – температура зовнішнього повітря = 263 К; ■ – температура зовнішнього повітря = 283 К; ■ – $M=50 \text{ Вт/м}^2$; ■ – $M=70 \text{ Вт/м}^2$; ■ – $I_{clo}=0,0775 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}$; ■ – $I_{clo}=0,2325 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}$; ■ – $P_s=0$; ■ – $P_s=120 \text{ Вт/м}^2$; ■ – відносна вологість 40 %; ■ – відносна вологість 60 %; ■ – $R_z=0,8 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}$; ■ – $R_z=3,3 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}$; ■ – $PMV=0$; ■ – $PMV=-1$

Встановлено, що вплив на потребу на опалення для ексергетичної моделі теплового комфорту спадає у наступному ряді факторів: температура зовнішнього повітря, рівень метаболізму, тип одягу людини, надходження сонячної радіації, термічний опір огорожувальних конструкцій та відносна вологість повітря відповідно. Вплив на потребу на опалення спадає у наступному ряді факторів для енергетичної моделі: температура зовнішнього повітря, вид діяльності,

надходження сонячної радіації, тип одягу людини, термічний опір огорожувальних конструкцій, PMV та відносна вологість у приміщенні відповідно.

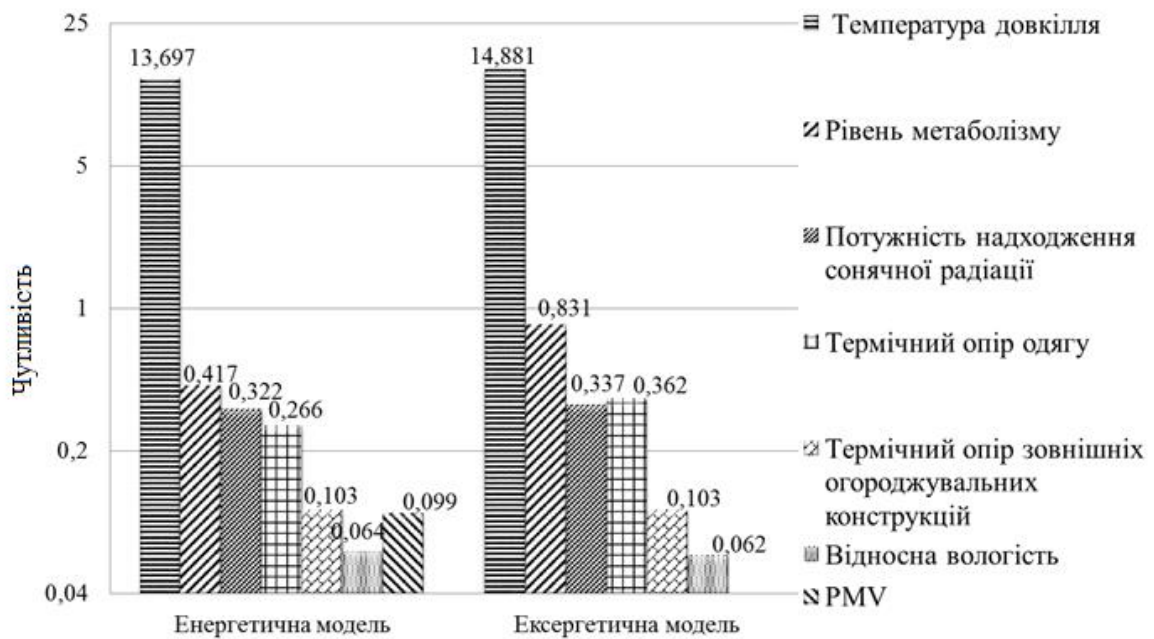


Рис. 4.24 – Аналіз чутливості потреби на опалення до факторів, що залежать від людини та параметрів будівлі

Запропонований розрахунок потреби на опалення, із врахуванням моделі теплового комфорту людини дозволить визначити за допомогою перевідних коефіцієнтів для різних джерел теплоти споживання первинного палива системою ДЛК, із врахуванням сучасних вимог до мікроклімату у приміщеннях.

4.10. Оцінка впливу параметрів теплового комфорту на споживання первинного палива

Для оцінки впливу параметрів мікроклімату на споживання ексергії первинного палива проведено дослідження для системи із централізованим опаленням, де джерелом теплоти є газовий котел для моделі, де термічний опір огорожень відповідає сучасним вимогам. Варіювання суб'єктивних параметрів мікроклімату наступні: $M=60 - 70 \text{ Вт/м}^2$; $I_{cl}=0,5 - 1 \text{ clo}$. Об'єктивні параметри мікроклімату такі як середня радіаційна температура визначається із врахуванням теплотехнічних характеристик огорожень та надходження сонячного випромінювання та температура повітря у кімнаті, визначення якої обумовлено

моделлю теплового комфорту (розглядається ексергетична та енергетична моделі). Результати розрахунку споживання первинного палива системою представлені на рис. 4.25.

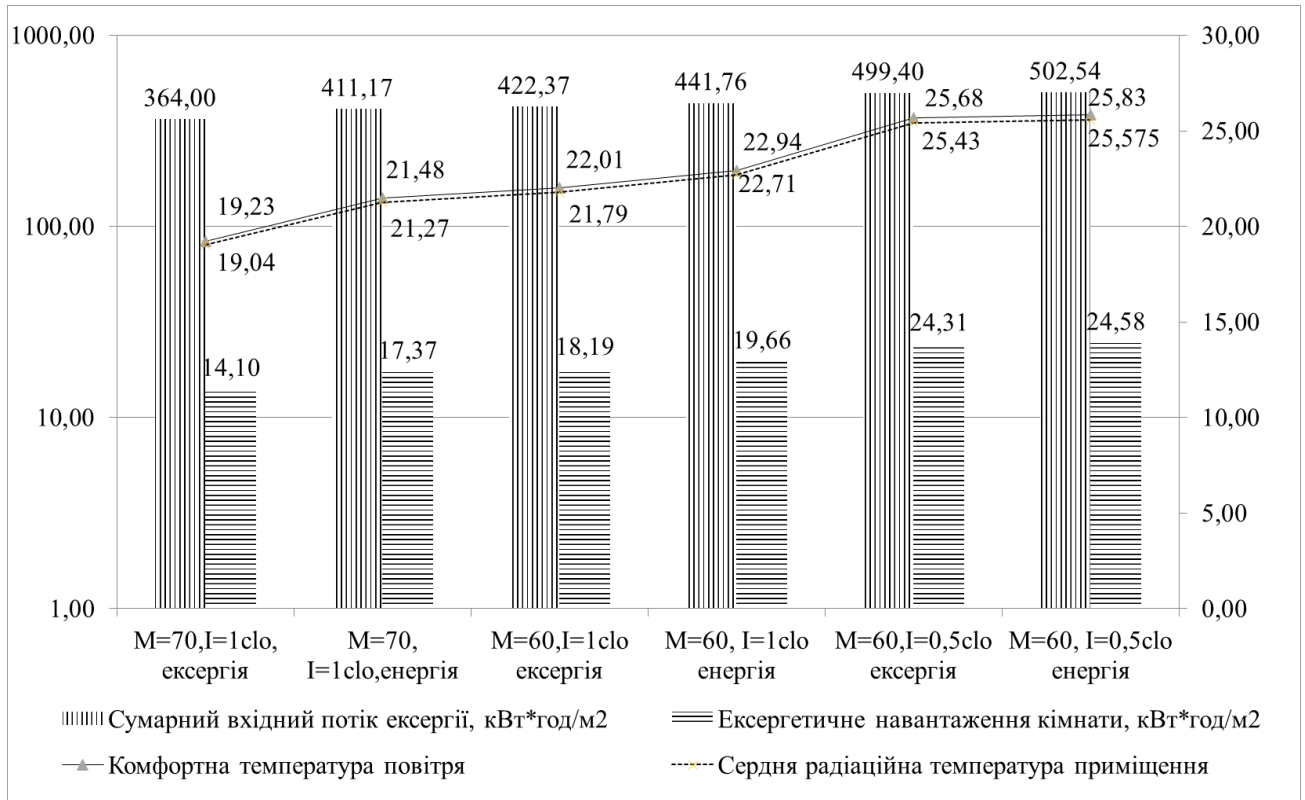


Рис. 4.25. Залежність споживання ексергії первинного палива від суб'єктивних параметрів теплового комфорту

Встановлено, що споживання ексергії первинного палива при зміні суб'єктивних параметрів мікроклімату від точки 1 ($M=60 \text{ Вт/м}^2$, $I_{cl}=0,5 \text{ clo}$) до точки 2 ($M=70 \text{ Вт/м}^2$, $I_{cl}=1 \text{ clo}$) змінюється на 27 % та на 18 %, при цьому комфортна температура повітря змінюється на 25% та на 16 % при застосуванні ексергетичного та енергетичного підходів до забезпечення комфортних умов відповідно. Отже врахування вимог до теплового комфорту, що встановлює людина дозволить у певних випадках знизити енергоспоживання від 25 до 27 %, а у певних випадках підвищити, з ціллю забезпечення належного рівня теплового комфорту.

4.11. Ексергоекономічні критерії для комплексного вибору джерела теплоти та огорожувальних конструкцій будівлі

Для того щоб проаналізувати вартість потоків ексергії, що втрачається будівлею з різними джерелами теплоти, припустимо, що модель кімнати вже оснащена системою та приладами опалення і капітальні витрати на них не враховуватимуться. Отже ексергетичні та термoeкономічні показники визначатимуться при вдосконаленні теплового захисту та зміні джерела теплоти. Розглянемо чотири варіанти теплового захисту: 1) відповідає нормам 80-х років; 2) нормам 90-х; 3) нормам 2008 р; 4) нормам 2016 р. Для порівняння та аналізу обрано наступні джерела теплоти: газовий котел, конденсаційний газовий котел, електричний котел, кабельне електроопалення та тепловий насос. Серед різних видів теплових насосів обрано ТН типу «повітря – вода» та із середнім COP=3. Всі вартісні показники представлені у доларах США, у зв'язку із нестабільністю курсу станом на 29.10.2016 р. Вхідні дані для розрахунку представлено у табл. 4.8–4.9.

Таблиця 4.8. – Параметри джерела теплоти

Джерело теплоти	i_0 , \$/кВт	t , роки*	k		
Газовий котел	35	10	0,063		
Конденсаційний котел	40	10	0,063		
Електричний котел	30	10	0,063		
Тепловий насос	600	10	0,063		
Електричне підлогове опалення	80	10	0,063		
Ізоляція	A_i	B_i	λ	t	k
	3	30	0,05	30	0,006
Вікно	A_j	B_j	t	k	
	8	80	30	0,006	

* t - термін експлуатації елементів системи

Таблиця 4.9. – Вартість енергоносія на 2016 рік

Тип енергоносія	Тариф за одиницю енергії	Тариф за одиницю ексергії
Газ	0,0298 \$/кВт·год	0,0271 \$/кВт·год
Електрика	0,0273\$/кВт·год	0,0273\$/кВт·год

*ціни взяті із врахуванням об'ємів споживання енергоресурсів за місяць.

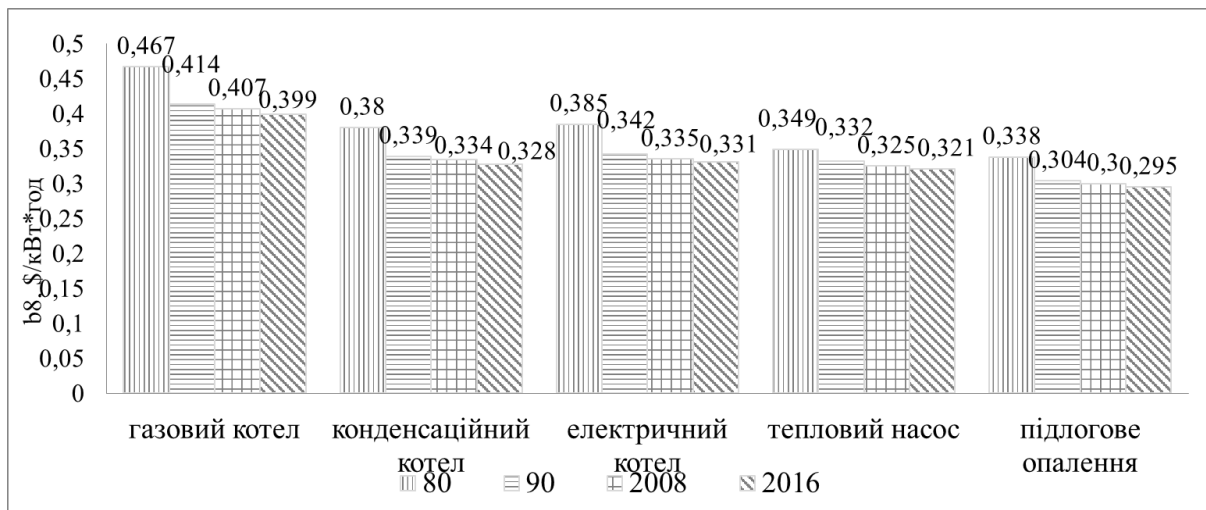
Таблиця 4.10.– Ексергоекономічні показники системи

Ексергетичні показники системи	Ексергетична ефективність системи, ε_k	Питоме споживання ексергії за опалювальний період, $\kappa Bm / m^2$				Капітальні витрати Z_{1j} , \$				Термoeкономічний критерій оптимальності b'_5 , \$/кВт·год			
		Пр.1 *	Пр.2	Пр.3	Пр.4	Пр.1 *	Пр.2	Пр.3	Пр.4	Пр.1 *	Пр.2	Пр.3	Пр.4
Газовий котел	0,193	239,47	138,11	128,39	117,57	48,125	31,78	30,215	28,455	1,031	0,908	0,89	0,868
Конденсаційний котел	0,201	182,65	105,34	97,93	89,67	55	36,32	34,532	32,52	0,835	0,736	0,722	0,705
Електричний котел	0,24	195,73	112,88	104,94	96,09	41,25	27,24	25,899	24,39	0,554	0,49	0,479	0,471
Тепловий насос	0,603	64,13	34,47	30,10	26,14	825	544,8	517,98	487,8	0,405	0,337	0,367	0,359
Електричне підлогове опалення	0,179	161,33	93,04	86,5	79,2	110	72,64	69,064	65,04	0,478	0,426	0,387	0,411

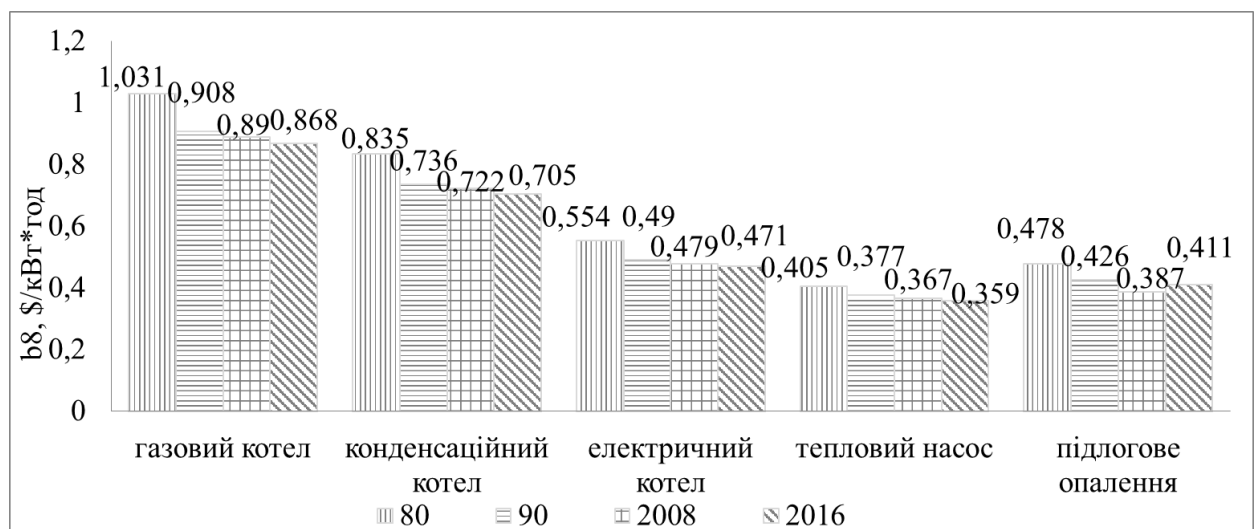
* Пр.1 – термічний опір огорожувальних конструкцій відповідає нормам 80-х років; Пр.2 – нормам 90-х років; Пр.3 – нормам 2008 року; Пр.4 – сучасним вимогам.

Отже використано ексергоекономічний метод для будівлі в цілому та для джерела теплоти зокрема. Результати ексергоекономічного аналізу представлені у рис. 4.26. Найвищий ексергетичний ККД характерний для теплового насоса, найнижчий для кабельного опалення, а значення питомого споживання ексергії будівлею за опалювальний період найнижчі для системи із тепловим насосом і найвищі для системи із газовим котлом. Така різниця обумовлена якісним фактором вихідного теплового потоку, що визначається температурою. Температура вихідного теплового потоку для різних джерел теплоти приймалася відповідно до [23]. У той час вартість теплового насоса є найвищою, а вартість електричного котла – найнижчою.

Для усунення протиріч між ексергетичними та економічними показниками визначено термoeкономічний критерій оптимальності. Результати розрахунку та представлені на рис. 4.26, а) та б) відповідно. З отриманих результатів очевидно, що найменшу повну вартість одиниці ексергії, що втрачається будівлею має система з кабельним електроопаленням, а найвищу – з автономним газовим котлом. Термoeкономічний критерій оптимальності з урахуванням зростання вартості енергоносія за 10 років (рис. 4.26 б) для системи, що споживає газове паливо є вищим у порівнянні із системами, що споживають електричну енергію, що обумовлено вищим приростом ціни на газ.



а)



б)

Рис. 4.26 –Ексергоекономічний розрахунок для системи:

- а) термoeкономічний критерій оптимальності для опалювального періоду; б) термoeкономічний критерій оптимальності для $n = 10$ років

Запропоновані ексергоекономічні критерії дозволяють визначати вартість одиниці ексергії, що втрачається через огорожувальні конструкції, перший – за опалювальний період, другий – за 10 років. Особливість останнього полягає у тому, що вибір джерела теплоти можна проводити у комплексі з огорожувальними конструкціями, враховується зміна вартості енергоносіїв у часі.

Висновки до розділу

1. Отримані дані щодо впливу на прогнозований процент незадоволених (*PPD*), що залежать від параметрів мікроклімату, теплотехнічних параметрів будівлі та від людини. Встановлено, що найвища чутливість функції до температури внутрішнього повітря: від -6,2 до -6,8. Значний вплив на *PPD* має і радіаційна температура від -3,29 до -3,46, далі – обмін речовин від -3,14 до -3,42. Чутливість до теплоізоляції одягу є меншою від -0,68 до -0,74 і зі зростанням теплового захисту огорожувальних конструкцій чутливість зростає. Ще менший вплив має тепловий захист будівлі від -0,08 – -0,11, та температура зовнішнього повітря -0,011 – -0,013.

2. Розроблено стаціонарної модель теплового комфорту людини з урахуванням особливості її використання, як складової у системі ДЛК, на основі енергетичного та ексергетичного підходу, визначено мінімальне споживання ексергії людським тілом і температуру повітря у кімнаті, що йому відповідає, при різних значеннях середньої радіаційної температури для температури зовнішнього повітря, що дорівнює 273 К. Встановлено, що прогнозована середня оцінка тепловідчуттів людини для таких умов при мінімальному споживанні ексергії людським тілом знаходиться в діапазоні -0,34 – -0,42.

3. Представлено порівняння залежності комфортної температури повітря від середньої радіаційної температури для різних моделей теплового комфорту. Дані

параметри є важливими при комплексному аналізі та проектуванні системи ДЛК. Комфортна температура внутрішнього повітря є вихідною величиною для проектування та експлуатації джерела теплоти. А середня радіаційна температура дозволяє врахувати вплив огорожувальних конструкцій. Визначено середньоквадратичне відхилення S комфортної температури повітря у приміщенні при різних значеннях середньої радіаційної температури у порівнянні з моделлю, де $PMV=0$. Для моделі Богословського $S=5,1$ °C та $5,7$ °C, така модель дозволяє врахувати інтенсивність діяльності людини, тому її доцільно враховувати тоді, коли цей фактор – найважливіший. Для розробленої моделі S – найнижче і дорівнює $1,4$ °C, тому використання даного підходу дозволяє знизити температуру повітря у кімнаті на $1,4$ °C. Застосування розробленої моделі для створення комфортних умов у будівлі є науково обґрунтованим на основі другого закону термодинаміки і дозволяє зменшити енергоспоживання за рахунок зниження температури повітря в кімнаті.

4. На основі енергетичної та ексергетичної математичної моделі людини розроблено регресійну модель для визначення комфортної температури повітря у кімнаті, що значним чином спростить розрахунки у подальшому при проектуванні та регулюванні роботи систем опалення.

5. За допомогою регресійної моделі встановлено, що найвищий вплив на комфортну температуру повітря у приміщенні відповідно до енергетичного підходу має обраний рівень комфорту, потім термічний опір одягу, середня радіаційна температура приміщення та рівень метаболізму. Комфортна температура, що визначається відповідно до ексергетичного підходу є нижчою, ніж t_{comf} , що визначається на основі енергетичного. Тому використання ексергетичної концепції при забезпеченні комфортних умов відповідає меншій потребі енергії на опалення.

6. Розроблено алгоритм, що дозволяє інтегрувати ексергетичну модель людини у складну систему ДЛК. Новизна полягає у тому, що вперше ексергетична модель людини включена у складну систему ДЛК, шляхом визначення комфортної температури повітря, що у свою чергу відповідатиме

рівню комфорту не нижчому за необхідний рівень очікувань PMV_n , що визначається відповідно до категорії будівлі.

7. Проведено моделювання впливу факторів, що залежать від людини, параметрів будівлі та зовнішнього середовища на потребу на опалення. Досліджено, що суттєво знижують потребу на опалення параметри оточуючого середовища, а саме температура зовнішнього повітря та надходження сонячної радіації. На базі моделювання впливу факторів що залежать від людини, параметрів будівлі та зовнішнього середовища на потребу на опалення, встановлено, що вплив при застосуванні ексергетичної моделі теплового комфорту спадає у наступному ряді факторів: температура зовнішнього повітря, рівень метаболізму, тип одягу людини, надходження сонячної радіації, термічний опір огорожувальних конструкцій та відносна вологість повітря відповідно. Вплив на потребу на опалення спадає у наступному ряді факторів для енергетичної моделі: температура зовнішнього повітря, вид діяльності, надходження сонячної радіації, тип одягу людини, термічний опір огорожувальних конструкцій, PMV та відносна вологість у приміщенні відповідно.

8. Показано сумісний вплив термомодернізації та зміни категорії будівлі щодо забезпечення комфортних умов на потребу на опалення будівлі, зменшення якої при розглянутих умовах загалом більш ніж 13 % обумовлено зниженням температури повітря у приміщенні за рахунок зниження рівня теплового комфорту та підвищення середньої радіаційної температури.

9. Оцінено вплив параметрів мікроклімату на споживання ексергії первинного палива системою централізованого теплопостачання. Встановлено, що врахування вимог до теплового комфорту, що висуває людина дозволить у певних випадках знизити енергоспоживання від 25 до 27 %, а у певних випадках підвищити, з ціллю забезпечення належного рівня теплового комфорту.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить нові науково обґрунтовані результати вдосконалення і подальшого розвитку методів та засобів аналізу енерго і ексерго ефективності складної системи «джерело теплоти – людина – огорожувальні конструкції» і одночасного забезпечення комфортних умов, шляхом використання моделей теплового комфорту людини. У процесі виконання роботи отримано наступні науково-практичні результати:

1. Запропоновано розглядати будівлю, як енергетичну систему в комплексі з математичною моделлю людини, що дозволить більш точно визначити характеристики ефективності енергоспоживання за умов обмежень, спричинених забезпеченням необхідної якості мікроклімату.

2. Розроблено методику визначення інтегральної вартості та показників енергоефективності будівлі як єдиної енергетичної системи, побудовану на базі енергетичного та ексергоекономічного підходів.

3. Розроблені підходи щодо розрахунку середньої радіаційної температури, які адаптовані до використання при аналізі усієї системи ДЛК.

4. Розроблено математичну модель людини, що дозволяє визначити комфортну температуру повітря у приміщенні відповідно до 2-го закону термодинаміки та алгоритм розрахунку комфортної температури повітря відповідно до ексергетичного підходу, в основі якого лежить метод перебору під час визначення мінімального споживання ексергії людським тілом та на його базі комп'ютерну модель.

5. Створено регресійні моделі для розрахунку комфортної температури повітря у кімнаті відповідно до ексергетичного та енергетичного підходу та запропоновано блок-схему інтегрування розрахунків моделі людини у складну модель «джерело теплоти – людина – огорожувальні конструкції».

6. Показано, що ексергетична концепція забезпечення комфортних умов дає значення комфортної температури, що є нижчими від комфортної температури

відповідно до енергетичного підходу в центрі матриці планування експерименту на 2,4 °C.

7. Показано сумісний вплив термомодернізації та зміни категорії будівлі щодо забезпечення комфортних умов на потребу на опалення будівлі, зменшення якої при розглянутих умовах загалом більш ніж 13 % обумовлено зниженням температури повітря у приміщенні за рахунок зниження рівня теплового комфорту та підвищення середньої радіаційної температури.

8. Оцінено вплив параметрів мікроклімату на споживання ексергії первинного палива системою централізованого теплопостачання. Встановлено, що врахування вимог до теплового комфорту, що висуває людина дозволить у певних випадках знизити енергоспоживання від 25 до 27 %, а у певних випадках підвищити, з ціллю забезпечення належного рівня теплового комфорту.

Подальше використання результатів дисертаційної роботи пропонується здійснювати шляхом розробки норм, щодо ефективного використання енергії в будівлях та для техніко-економічного обґрунтування вибору джерела теплоти в комплексі з огороженнями.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Pearce A. Sustainable Buildings and Infrastructure: Paths to the Future. Routledge, 2013.
2. EN 13790:2008. Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling. CEN: European Committee for Standardization, 2008. 53p.
3. EN 15217:2007. Energy performance of buildings – Methods for expressing energy performance and for energy certification of buildings. CEN: European Committee for Standardization, 2007. 31p.
4. EN 15603:2008. Energy performance of buildings – overall energy use and definition of energy ratings. CEN: European Committee for Standardization, 2008. 43p.
5. ДСТУ Б EN 15251: 2011. Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики будівель. [Чинний від 2013-07-01]. Київ: Мінрегіон України, 2012. 71 с.
6. ДСТУ Б EN 15261: 2012. Розрахунок параметрів мікроклімату. [Чинний від 2013-01-01]. Київ: Мінрегіон України, 2012. 81 с.
7. ДСТУ Б EN ISO 7730: 2011. Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового комфорту. [Чинний від 2013-01-01]. Київ: Мінрегіон України, 2012. 74 с.
8. ДСТУ Б EN 15603: 2013. Енергоефективність будівель. Загальне енергоспоживання та визначення енергетичних показників. [Чинний від 2014-01-01]. Київ: Мінрегіон України, 2014. – 63 с.
9. Дешко В. І., Буяк Н. А., Білоус І. Ю. Вибір теплового захисту та джерела тепла із врахуванням комфортних умов у будівлі. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. Серія: Технічні науки, 2015. № 5. С. 71–80.

10. Deshko V.I, Buyak N. A. A model of human thermal comfort for analyzing the energy performance of buildings. *Eastern European journal of enterprise technologies*, 2016. V. 4/8 (82). P. 42–47.
11. Дешко В. І., Буяк Н. А. Економічно доцільний тепловий захист будівлі з різними джерелами теплоти. *Наукові вісті Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”*, 2009. №3. С. 74–81.
12. Свідectво про реєстрацію авторського права на твір «Економічно доцільний тепловий захист будівлі з різними джерелами теплоти» / В. І. Дешко, Н. А. Буяк, М. М. Шовкалюк. № 69784; заявл. 11.11.2016; зареєстр. 16.01.2017.
13. Дешко В. І., Буяк Н. А. Вплив приладів опалення на енергоефективність будинків. *Вісник Харківського національного університету сільського господарства імені Петра Василенка*, 2009. №87. С. 10 – 12.
14. Дешко В. І., Буяк Н. А. Вплив теплового захисту будівлі на показники теплового комфорту. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2015. №153. С.121–128.
15. Буяк Н. Вплив характеристик теплового захисту та джерела тепла на функцію інтегрованих витрат. *Матеріали II Всеукраїнської студентської науково-технічної конференції „Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання“*, 23-24 квітня 2009 р. Тернопіль : ТДТУ, 2009. Т. 1. С. 220.
16. Дешко В. І., Буяк Н. А. Вплив приладів опалення на енергоефективність будинків. Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми енергозабезпечення в АПК України» (8 – 9 жовтня 2009 року). Харків: ХНТУСГ, 2009 р.
17. Дешко В. І., Буяк Н.А. Вплив життєвого циклу проекту на економічно доцільний тепловий захист будівлі з різними джерелами теплоти: матеріали V Міжнародної ювілейної науково-практичної конференції «Екологія. Економіка. Енергозбереження», Суми: Вид-во СумДУ, 2009. С. – 76–77.
18. Практичний посібник з енергозбереження для об’єктів промисловості, будівництва та житлово-комунального господарства / А. В. Праховник,

В. І. Дешко, О. М. Закладний, М. М. Шовкалюк, Н. А. Буяк та ін. Луганськ: «Місячне сяйво», 2010, 696 с.

19. Дешко В. І., Буяк Н. А. Комфортні умови у приміщенні з урахуванням впливу сонячної радіації. *Збірник наукових праць: галузеве машинобудування, будівництво*, 2016. №1. С. 197 – 204.

20. Дешко В. І., Буяк Н. А. Опалення будівель і температурні умови комфортності. *Промышленная теплотехника*, 2010. №1(32). С. 66–70.

21. Дешко В. И., Буяк Н. А. Влияние комфортных условий на интегрированную стоимость отопления. *Промышленная теплотехника*, 2009 (31). №7. С. 63–64.

22. Дешко В. І., Буяк Н. А. Моделювання впливу сонячної та теплової радіації на комфортну температуру у приміщенні. *Проблеми і перспективи розвитку академічної та університетської науки: збірник наукових праць за матеріалами VII Всеукраїнської науково-практичної конференції (8 – 11 груд. 2015 р. м. Полтава)*. Полтава: ПолтНТУ, 2015. С. 3–6.

23. Дешко В. І., Буяк Н. А., Долгополов І. С, Тучин В. Т. Енерго- і ексергоефективність систем теплопостачання будівлі. *Енергетика економіка, технології, екологія*, 2009. №2. С.32 – 41.

24. Дешко В. І., Буяк Н. А., Іщенко К. В. Економічно доцільний вибір джерела теплоти для гуртожитка: *матеріали науково-технічної конференції Інституту Енергозбереження та Енергоменеджменту Національного Технічного Університету України «Київський Політехнічний Інститут» ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА*. Київ: НТУУ «КПІ», ІЕЕ, 2012. С. 433 – 442.

25. Буяк Н. А., Іщенко К. *Оцінка енергоефективності гуртожитку на основі ексергетичних показників: матеріали IV Всеукраїнської студентської науково-технічної конференції „Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання“*, 19-20 квітня 2011 р. Тернопіль : ТНТУ, 2011. Т. 1. С. 237. (Електротехніка, електроніка та світлотехніка).

26. Дешко В. І., Буяк Н. А. Ексергетична модель теплового комфорту людини в зимовий період: *матеріали науково-технічної конференції Інституту*

Енергозбереження та Енергоменеджменту Національного Технічного Університету України «Київський Політехнічний Інститут» ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА. Київ: НТУУ «КПІ», ІЕЕ, 2016. С. 89 – 96.

27. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір «Моделі теплового комфорту та енергоспоживання будівлі» / В. І. Дешко, Н. А. Буяк, І. О. Суходуб. № 69785; заявл. 11.11.2016; зареєстр. 16.01.2017.

28. Buyak N.A., Deshko V. I., Sukhodub I.O. Buildings energy use and human thermal comfort according to energy and exergy approach. *Energy and buildings*, 2017. V.146. P. 50–60.

29. Deshko V.I., Buyak N.A. Building heat source choice using exergoeconomic approach. *Energy, energy saving and rational nature use*, 2017. P. 65–75.

30. Текст документу: “Про схвалення Концепції впровадження механізмів стабільного фінансування заходів з енергоефективності (створення Фонду енергоефективності). URL: <http://www.kmu.gov.ua> (дата звернення 26.06.2017).

31. Hepbasli A. Low exergy (LowEx) heating and cooling systems for sustainable buildings and societies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012. V. 16. P. 73–104.

32. База даних Міжнародного енергетичного агентства. URL: <http://www.iea.org/statistics> (дата звернення 26.06.2017).

33. ДБН В.2.6-31: 2016. Теплова ізоляція будівель. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. Київ: Міністерство регіонального розвитку будівництва та житлово-комунального господарства України, 2017. 30 с.

34. Chau C. K., Leung C. K. A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment, Life Cycle Carbon Emission Assessment on buildings. *Applied energy*, 2015. V. 143. P. 395–413.

35. Ramesh T., Prakash R., Shukla K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, 2010. V. 42. P. 1592–1600.

36. Srinivasan R. S., Ingwersen W., Trucco C. and other. Comparison of energy based indicators used in life cycle assessment tools for buildings. *Building and environment*, 2014. V.79. P. 138–151.
37. Табунщиков Ю. А. Основы математического моделирования теплового режима здания как единой теплоэнергетической системы: автореф. дис. . .-д-ра техн. наук. Москва, 1983. 51 с.
38. Табунщиков Ю. А., Хромец Д. Ю., Матросов Ю. А. Тепловая защита ограждающих конструкций зданий и сооружений. Москва: Стройиздат, 1986. 380 с.
39. Мхитарян Н. М. Энергосберегающие технологии в жилищном и гражданском строительстве / отв.ред. И. Н. Карп. Київ: Наукова думка, 2000. 420 с.
40. Табунщиков А. Ю. Энергоэффективные здания и инновационные инженерные системы. *Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика*. 2014. № 1. С. 6–11.
41. Чуприна Х. М. Інтегрована єдина енергетична модель будівлі. *Управління розвитком складних системи*, 2014. №17. С. 125–131.
42. Никитин Е. Е. Оптимизация выбора энергоэффективных проектов модернизации систем теплоснабжения в условиях финансовых ограничений. *Проблеми загальної енергетики*, 2011. № 3. С. 25–31.
43. Малинська Л. В., Малинський С. М. Оптимізація розподілу інвестиційного капіталу за енергоефективними компонентами. *Економіка і регіон*, 2012. №4 (35). С. 172–178.
44. Ратушняк Г. С., Ратушняк О. Г. Управління проектами енергозбереження шляхом термореновації будівель: Навч. Посібник. Вінниця: ВНТУ, 2006. 106 с.
45. Baldi M. G., Leoncini L. Thermal Exergy Analysis of a Building. *Energy Procedia*, 2014. V. 62. P. 723–732.
46. Schmidt D., Ala-Juusela M. Low Exergy Systems for Heating and Cooling of Buildings. *Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Eindhoven, The

Netherlands, 19 - 22 September, 2004. URL: <http://www2.ibp.fraunhofer.de/japan/literatur/p595final.pdf> (дата звернення 26.06.2017).

47. Sangri R., Müller D. Exergy-based approaches for performance evaluation of building energy systems. *Sustainable Cities and Society*, 2016. V.25. P. 25–32.

48. Rant Z. Energy value and pricing. *Journal of Mechanical Engineering*, 1955. V.1. P. 4 – 7.

49. Гохштейн Д. П. Современные методы термодинамического анализа энергетических установок. Москва: Энергия, 1969. 368 с.

50. Бродянский В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа. Москва: «Энергия», 1973. 296 с.

51. Бродянский В. М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения / под общ. ред. В. М. Бродянского. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 288 с.

52. Ковтун В. В. Применение эксергетического метода для оценки эффективности работы теплоэнергетических установок, утилизационного оборудования и схем утилизации вторичных энергоресурсов. Киев: УМК ВО, 1989. 76 с.

53. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия / пер. с пол. под ред. В. М. Бродянского. Москва: «Энергия», 1968. 289 с.

54. Schmidt D. Design of Low Exergy Buildings – Method and Pre-Design Tool. *The International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings*, 2004. V.3. P. 1–47.

55. Oshida I. Lecture on exergy. Tokyo: Research Institute of Solar Energy Tokyo, 1986. – 194 p.

56. Hepbsali A. A study on estimating the energetic and exergetic prices of various residential energy sources. *Energy and buildings*, 2008. V. 40. P. 308–315.

57. Schmidt D. Low Exergy Systems for High-Performance Buildings, Communities. *Energy and Buildings*, 2009. V.41. P. 331–336.

58. Balta T., Kalinci Y, Hepbasli A. Evaluating a low exergy heating system from the power plant through the heat pump to the building envelope. *Energy & Buildings*, 2008. V . 40. P. 141–147.
59. Bi Y., Wang X., Liu Y. and other. Comprehensive exergy analysis of a ground-source heat pump system for both building heating and cooling modes. *Applied Energy*, 2009. V. 86. P. 2560–2565.
60. Goncalves P., Gaspar A., Silva M. Energy and exergy-based indicators for the energy performance assessment of a hotel building. *Energy and buildings*, 2012. V. 52. P. 181–188.
61. Vats K., Tiwari G. Energy and exergy analysis of a building integrated semitransparent photovoltaic thermal (BISPVT) system. *Applied energy*, 2012. V. 96. P. 409–416.
62. Balta M. T., Dincer I., Hepbsali A. Performance and sustainability assesment of energy options for building HVAC applications. *Energy and buildings*, 2010. V. 49. P. 1320–1328.
63. Asada H., Boelman E. Exergy analysis of a low temperature radiant heating system. *Eighth International IBPSA Conference*. Eindhoven, Netherlands August 11-14, 2003.
64. Yan Z., Guangcai G. Exergy analysis of the building heating and cooling system from the power plant to the building envelop with hourly variable reference state. *Energy and Buildings*, 2013. V. 56. P. 94–99.
65. Морозюк Т. В. Новый этап в развитии эксергетического анализа. Холодильна техніка та технологія, 2014. №4. С. 13–17.
66. Açıkkalp E., Yucer C., Hepbasli A., Karakoc T. Advanced low exergy (ADLOWEX) modeling and analysis of a building from the primary energy transformation to the environment. *Energy and Buildings*, 2014. V. 81. P. 281–286.
67. Tsatsaronis G., Park M. H. On avoidable and unavoidable exergy destructions and investment costs in thermal systems. *Energy Conversion and Managemen*, 2002. V.43. P. 1259–1270.

68. Morosuk T., Tsatsaronis G. Splitting the exergy destruction into endogenous and exogenous parts – application to refrigeration machines. *Proceedings of the 19th international conference on efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems*. Greece. V. 1. P. 165–172.
69. Laukkanen T., T. Kohl, M. Järvinen, P. Ahtila. Primary exergy efficiency—Effect of system efficiency environment to benefits of exergy savings. *Energy and Buildings*, 2016. V. 16. P. 248–254.
70. Dincer I. The role of exergy in energy policy making. *Energy policy*, 2002. V.30. P. 137–149.
71. Shenawy A., Zmeureanu R. Exergy-based index for assessing the building sustainability. *Building and Environment*, 2013. V.60. P. 202–210.
72. Mert Y., Saygin Y. Energy efficient building block design: An exergy perspective. *Energy*, 2016. V. 102. P. 465–472.
73. Schmidt D., Shukuya M. Exergy: The Step Beyond the “energy” – Conscious design – a new look at sustainable Building. *Proceedings to the Sustainable Building Conference 2005* (September 27-29, 2005). Tokyo, Japan. P. 87–92.
74. Gopisetty S., Pfafferot J. Optimization of operational strategies for a low exergy office building. *Energy and buildings*, 2013. V. 60. P. 400–409.
75. Эксергетические расчеты технических систем: справ. пособие / Под ред.: А. А. Долинского, В. М. Бродянского. Киев: Наукова думка, 1991. 360 с.
76. Куделя П. П., Соломаха А. С., Очеретянко М. Д. Оцінка ефективності опалювальних теплових насосів з використанням методу циклів. *Відновлювана енергетика*, 2016. № 4. С. 74–85.
77. Куделя, П. П., Соломаха А. С. Низькоексергетичні опалювальні системи: навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 153 с.
78. Маляренко В. А. Основы теплофизики зданий та энергосбережения: учебник. – Харьков: САГА, 2006. – 484 с.
79. Investigation of effective parameters on the human body exergy and energy model. *7-th International Exergy, Energy and Environment Symposium*, 2015. URL: <http://www.researchgate.net/publication/278018763> (дата звернення 26.06.2017).

80. G. Tsatsaronis. Application of termoeconomics to the design and synthesis of energy plants. *Encyclopedia of Life Support Systems*, 2007. URL: <http://www.eolss.net> (дата звернення 26.06.2017).
81. Tsatsaronis G. Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics. *Energy*, 2007. V.32. P. 249–253.
82. Oktay Z. Exergoeconomic analysis of the Gonen geothermal district heating system for building [Text] / Z. Oktay, I. Dincer. // *Energy and Buildings*. – 2009. – V.41. – P. 154–163.
83. Yucer C. T., Hepsali A. Exergoeconomic analysis of an energy supply chain for space heating in a building. *Energy and Buildings*, 2013. V. 62. P. 342–349.
84. Yücer C., Hepbasli A. Exergoeconomic and enviroeconomic analyses of a building heating system using SPECO and Lowex methods. *Energy and Buildings*, 2014. V.73. P. 1–6.
85. Тсатсароннс Дж. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы. Одесса: Студия «Негоциант», 2002. с. 152.
86. Вігужинська С. Ю., Косой Б. В., Туснолобов В. К. Економіка сучасного виробництва. Одеса, 1999. 45 с.
87. Morosuk T., Tsatsaronis G., Boyano A., Gantiva C. Advanced exergy-based analyses applied to a system including LNG regasification and electricity generation. *Energy and enviroment*, 2012. V.3. P. 1–9.
88. Acikkalp. E., Yucer C. T., Hepbasli A., Karakoc T. Advanced low exergoeconomic (ALEXERGO) assesment of a building along with its heating system at various stages. *Energy and Buildings*, 2015. V.87. P. 66–73.
89. Orosa J. Research on General Thermal Comfort Models. *European Journal of Scientific Research*, 2009. V. 27. P. 217–227.
90. Hakan O. Nilsson. Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models. URL: <http://www.arbetslivsinstitutet.se> (дата звернення 26.06.2017).

91. ГОСТ Р ИСО 7730: 2009 Эргономика термальной среды. Аналитическое определение и интерпретация комфортности теплового режима с использованием расчета показателей PMV и PPD и критериев локального теплового комфорта. URL: <http://vsegost.com/Catalog/50/50069.shtml> (дата звернення 26.06.2017).
92. Бабич Н. И. Нечеткая модель оценки комфортных условий при проектировании систем кондиционирования воздуха. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 2013. №64. С. 36–40.
93. Возняк О. Т. Вплив параметрів внутрішнього мікроклімату приміщення на теплообмін людини. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка": Теорія і практика будівництва*, 2010. № 662. С. 84–88.
94. Katic K., Zeiler V., Boxem G. Thermophysiological models: a first comparison. *First German – Austrian IBPSA Conference (RWTH Aachen University)*, 2014. P. 595–602.
95. Gagge A. P., Fobelets A. P., Berglund L. G. A standart predictive index of human response to the thermal enviroment. *ASRAE Transactions*, 1971. V. 77. P. 247–262.
96. Fanger P. O. Assessment of man's thermal comfort in practice. *British Journal of Industrial Medicine*, 1973. V 30. P. 313–324.
97. Богословский В. Н, Сканава А. Н. Отопление. Москва: Стройиздат, 1991. 735 с.
98. Бахинди А. Тепловой микроклимат помещений. Москва: Стройиздат, 1981. 247 с.
99. ANSI/ASHRAE Standard 55: 2010. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. *ASHRAE. – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, 2010. 12 p.
100. Yang L, Yan H., Lam J. Thermal comfort and building energy consumption implications – A review. *Applied Energy*, 2014. V.115. P. 164–173.

101. Attia S., Carlucci S. Impact of different thermal comfort models on zero energy residential buildings in hot climate. *Energy and Buildings*, 2015. V.102. P. 117–128.
102. Zolfagari A. Maerferfat M. A new simplified model for evaluating non-uniform thermal sensation caused by wearing clothing. *Building and Environment*, 2010. V. 45. P. 776–783.
103. Schellen L., Loomans M., Kingma B. and other. The use of a thermophysiological model in the built environment to predict thermal sensation : coupling with the indoor environment and thermal sensation. *Building and Environment*, 2013. V. 59. P. 10–22.
104. Prek M. Exergy analysis of thermal comfort. *International Journal of Exergy*, 2004. V. 1. P. 303–315.
105. Tokunaga K., Shukuya M. Human-body exergy balance calculation under un-steady state conditions. *Building and Environment*. 2011. V.46. P. 2220–2229.
106. Dovjak M., Shukuya M., Krainer A. Connective thinking of building envelope – Human body exergy analysis. *International Journal of Heat and Mass transfer*, 2015. V. 90. P. 1015–1025.
107. Shukuya M. Exergy: Theory and Applications in the Built Environment. Berlin: Springer, 2013. 374 p.
108. Schweiker M., Kolarik J., Dovjak M., Shukuya M.. Unsteady-state human-body exergy consumption rate and its relation to subjective assessment of dynamic thermal environments. *Energy and Buildings*, 2016. V.116. P. 164–180.
109. Caliskan H. Energetic and exergetic comparison of the human body for summer season. *Energy conversion and management*, 2013. V. 76. P. 169–176
110. Juusela M. A., Shukuya M. Human body exergy consumption and thermal comfort of an office worker in typical and extreme weather conditions in Finland [Text]. *Energy and Buildings*, 2014. V. 76. P. 249–257
111. Simone A., Kolarik J., Iwamatsu T. et al. A relation between calculated human body exergy consumption rate and subjectively assessed thermal sensation. *Energy and Buildings*, 2011. V. 43. P. 1–9.

112. Mady C., Ferreira M., Yanagihara J., Oliveira S. Jr. Human body exergy analysis and the assessment of thermal comfort conditions. *International journal of heat and mass transfer*, 2014. V. 77. P. 577–584.
113. Iwamatsu. T., Asada H. A Calculation Tool for Human Body Exergy Balance. *Energy Conservation in Buildings and Community Systems. Annex 49 Newsletter: The International Energy Agency*, 2009. V. 6. P. 4–5.
114. Gennusa M. La, Nucarab A., Rizzo G., Scaccianoce G.. The calculation of the mean radiant temperature of a subject exposed to the solar radiation—a generalised algorithm. *Building and Environment*, 2005. V. 40. P. 367–375.
115. Alfano F., Olesen B., Palella B., Riccio G.. Thermal comfort: Design and assessment for energy saving. *Energy and Buildings*, 2014, V.81. P. 326–336.
116. Walikewitz N., Jänicke B., Langnera M. and other. The difference between the mean radiant temperature and the air temperature within indoor environments: A case study during summer conditions. *Building and Environment*, 2015. V. 84. P. 151–161.
117. ГОСТ 30494: 1996. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. [чинний від 01.03.1999]. Межгосударственный стандарт. Москва: – Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве, 1999. 13 с.
118. BS EN ISO 7726: 2001. Ergonomics of the thermal environment—Instruments for measuring physical quantities: – [Execute Date 2001/11/06]. Adopted International Standard. British Standards, 2001. 62 p.
119. Fanger P. O. Thermal comfort. New-York: Mc Graw Hill book company, 1970. 224 p.
120. Rabadi N. J. Developing a Software to Predict Thermal Comfort of Humans at Work. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 2011. №3. C. 359–368.
121. Wai L. T., Wai L.C. A distributed sensor network for measurement of human thermal comfort feelings. *Sensors and Actuators*, 2008. V. 144. P. 394–402.

122. Atmaca I., Kaynakli O., Yigit A. Effects of radiant temperature on thermal comfort. *Building and environment*, 2007. V. 42. P. 3210–3220.
123. Kang D., Mo P., Choi D. at all. Effect of MRT variation on the energy consumption in a PMV-controlled office. *Building and environment*, 2010. V. 45. P. 1914–1922.
124. Степаненко В., Догадаев С. Замещение природного газа на ночную электроэнергию в бюджетной сфере городов Украины. *Енергетика та електрифікація*, 2008. №8. С 19–22.
125. Нечепорчук А. А. Куда уйдет тепло? Большой секрет. *Нова тема*, 2009. №2. С. 41–43.
126. Семенов Б. А., Щербаков В. В., Гордеев А. Г. Выбор установленной мощности автономных теплоисточников на основе системной оптимизации теплоснабжения здания. *Актуальные вопросы промышленной теплотехники и энергосбережения: межвуз. научн. сб.* Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2004. С. 212 – 223.
127. Фрейдкина Е. М. Методы и критерии оценки эффективности энергосбережения: учебное пособие. Санкт-Петербург: «Санкт-Петербургский Государственный Технологический Университет Растительных Полимеров», 2015. 52 с.
128. Гершкович В. Ф. Энергосберегающие системы жилых зданий. Пособие по проектированию. СОК, 2006. №7. С. 54–62.
129. Шимків А. Англо-український тлумачний словник економічної лексики = English-Ukrainian explanatory dictionary of economic. Київ: "Києво-Могилянська академія", 2004. 429 с.
130. Gürkan K. Madlener R. Evaluation of Economically Optimal Retrofit Investment Options for Energy Savings in Buildings. *Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior Working Paper*, 2011. V. 14. 28 p.
131. ДСТУ-Н Б А.2.2-12: 2015. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні

та гарячому водопостачанні. [Чинний від 2015-07-27]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2015, – 199 с.

132. Pombo O. Rivela B., Neila J. The challenge of sustainable building renovation: assessment of current criteria and future outlook. *Journal of Cleaner Production*, 2016. V. 123. P. 88–100.

133. Дмитрієва О. А., Зайцева О. С. Моделі прийняття рішень на основі теорії нечітких множин. Наукові праці ДонНТУ "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка", 2009. №10. С. 266–273.

134. Горбатюк К. В. Статистичні методи побудови функцій належності нечітких економічних показників. *Вісник Хмельницького національного університету*, 2015. №3. С. 25–31.

135. Теплоснабжение: Учебное пособие для студентов вузов / В.Е. Козин и др. Москва: Высш. Школа, 1980. 408 с.

136. Torío H. Pre-Design Tool Handbook and description of the Excel-based Annex 49 Tool for buildings exergy analysis. URL: <http://www.annex49.info/materials.html>

137. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети. Москва: Энергия, 1975. 376 с.

138. Manuel Carlos Gameiro da Silva. Spreadsheets for the calculation of thermal comfort indices pmv and ppd. URL: http://www.researchgate.net/publication/255971260_SPREADSHEETS_FOR_THE_CALCULATION_OF_THERMAL_COMFORT_INDICES_PMV_AND_PPD (дата звернення 26.06.2017).

139. Calculation of Predicted mean Vote (PMV), and Predicted Percentage Dissatisfied (PPD). URL: http://www.eat.lth.se/fileadmin/eat/Termisk_miljoe/PMV-PPD.html (дата звернення 26.06.2017).

140. CBE Thermal Comfort Tool. URL: <http://comfort.cbe.berkeley.edu> (дата звернення 26.06.2017).

141. Дешко В. І., Білоус І.Ю., Суходуб І. О.. Моделювання сумісного впливу сонячної та теплової радіації на температуру внутрішніх поверхонь

огорожень будівлі. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. Серія: Технічні науки. Київ, 2015. № 5. С. 24–31.

142. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. 3-е изд. Москва: Энергоиздат, 1981. 416 с.

143. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением / перевод с англ., под ред. Б.А Хрусталева. Москва: Мир, 1975. 934 с.

144. Арсеньєв В. М. Теплонасосна технологія енергозбереження: навч. посіб. Суми: СумДУ, 2011. 283 с.

145. Богуславский Л.Д., Ливчак В.И., Титов В.П. и др. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха: Справ. пособие / ред. Л. Д. Богуславский и В. И. Ливчак. Москва: Стройиздат, 1990. 624 с.

146. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. [Чинний від 2012-11-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2011. 123 с.

147. Проектна (інвестиційна) пропозиція з реалізації програми зменшення використання природного газу в побуті. Київ: Публічне акціонерне товариство “Національна акціонерна компанія “Нафтогаз України”, 2015. 27 с.

148. ГОСТ Р 54444-2011. Котлы отопительные. Часть 7. Котлы с газовыми горелками с принудительной подачей воздуха для центрального отопления с тепловой мощностью не более 1000 кВт (ЕН 303-7:2006). Москва: Стандартиформ, 2012. 45 с.

149. Нікітін Є. Є. Повышение энергетической эффективности систем централизованного теплоснабжения: дис. докт. техн. наук : 05.14.01 / Інститут газу НАН України. Київ, 2015. 393 с.

150. Київенерго. URL: <http://kyivenergo.ua/te-home/opalennya> (дата звернення 26.06.2017).

151. Київгаз. URL: <http://energy.kyivgaz.ua/ofitsijna-informatsiya/tsini-ta-tarifi-na-gaz.html> (дата звернення 26.06.2017).

152. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП). URL: <http://www.nerc.gov.ua> (дата звернення 26.06.2017).

153. ДБН В.2.6-31: 2006. Теплова ізоляція будівель. Київ: Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України, 2006. 72 с.
154. Eurostat. URL: <http://ec.europa.eu/eurostat> (дата звернення 26.06.2017).
155. Мармоза А. Т. Теорія статистики. Київ: Центр учбової літератури, 2013. 592 с.
156. Муніципальний енергетичний план Запоріжжя. ЕС3.031.125.01.04.09. Техніко-економічне обґрунтування інвестиційного проекту «Термомодернізація 2 418 житлових будинків». Запоріжжя: ТОВ ЕСКО "Екологічні Системи", 2014. 87 с.
157. Ралко О. С. Методи визначення ставки дисконтування. *Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету*. Одеса, 2015. №11. С. 150–153.
158. Гук О.В., Грищенко А.О. Вітчизняний та зарубіжний досвід удосконалення методик визначення ставки дисконтування. *Економічний простір*. Дніпропетровськ, 2012. №68. С. 173-179.
159. Тормосов Р. Ю. Особливості техніко-економічного обґрунтування інвестиційних енергоефективних проектів в сфері виробництва, транспортування та споживання теплової енергії. *Інвестиції: практика та досвід*. Київ, 2011. №1. С. 6–9.
160. Тормосов Р. Ю. Особливості та зміст техніко-економічного обґрунтування проектів із чистої енергії. *Управління розвитком складних систем*, 2014. №20. С. 137–146.
161. Індекс інфляції в Україні. URL: <https://buhgalter911.com/uk/spravochniki/kursy-stavki-indeksy/indeksy-inflyacii.html> (дата звернення 26.06.2017).
162. Облікова ставка Національного банку України. URL: http://www.bank.gov.ua/control/uk/publish/article?art_id=53647 (дата звернення 26.06.2017).
163. Савченко Ю. Г., Каплун Р.В. Особливості проектування систем енергозабезпечення пасивних будинків. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2012. № 1 (63). С. 55–64.

164. Качан Ю. Г., Баташова Н.А. Об оценке экономической эффективности комбинированной системы отопления. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. Київ: НТУУ “КПІ”, 2007. №1. С. 92–97.
165. Дешко В. І., Шовкалюк М. М., Шевченко та ін. Вплив температурно-погодних факторів на показники проектів з енергозбереження. *Енергетика та електрифікація*, 2007. №3. С. 62–68.
166. Torio H. Exergy analysis of renewable energy-based climatisation systems for buildings: A critical view. *Energy & Buildings*, 2009. Vol. 41. P. 112–122.
167. Кононюк А. Е. Основы научных исследований (общая теория эксперимента). Киев: КНТ, 2011. 452 с.
168. Красовский Г. И. Филаретов Г. Ф., Планирование эксперимента. Воронеж: ВГУ, 1982. 137 с.
169. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика для инженеров и научных работников. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.

Додаток А

Розрахунок комфортної температури повітря у кімнаті відповідно до енергетичного підходу

Вхідні дані

$$M := 60 \quad W := 0 \quad \varphi := 50$$

$$PMV := 0 \quad I_{cl} := 0.155 \quad t_{tr} := 20$$

Вихідні параметри перше наближення

$$H := 66 \quad f_{cl} := 1 \quad t_{cl} := 20 \quad h_c := 9$$

$$E_{res} := 0 \quad E_c := 0 \quad t_{BH} := 20 \quad p_a := 0$$

Given

$$PMV = [0.303 \cdot (e^{-0.036 \cdot M}) + 0.028] \cdot [(M - W) - H - E_c - 0.0014 \cdot M \cdot (34 - t_{BH}) - E_{res}]$$

$$H = 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{tr} + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_{BH})$$

$$t_{cl} = [35.7 - 0.028(M - W)] - I_{cl} \cdot [3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{tr} + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_{BH})]$$

$$f_{cl} = 1.05 + 0.645 \cdot I_{cl}$$

$$h_c = 2.38 \cdot \sqrt[4]{|t_{cl} - t_{BH}|}$$

$$p_a = \varphi \cdot 10 \cdot e^{\left[16.6536 - \frac{4030.183}{(t_{BH} + 235)}\right]}$$

$$E_{res} = 1.7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a)$$

$$E_c = 3.05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6.99 \cdot (M - W) - p_a] + 0.42 \cdot [(M - W) - 58.15]$$

$$\text{Find}(t_{BH}, p_a, H, f_{cl}, h_c, E_{res}, E_c, t_{cl}) = \begin{pmatrix} 25.121 \\ 1.595 \times 10^3 \\ 42.779 \\ 1.15 \\ 2.921 \\ 4.357 \\ 12.118 \\ 27.389 \end{pmatrix}$$

Додаток Б

Розрахунок комфортної температури повітря у кімнаті відповідно до ексергетичного підходу
Вхідні параметри, що залежать від людини:

$$M := 70 \quad I_{cl} := 0.0775 \quad A_{du} := 2 \quad C_{bl} := 1.163 \quad \underline{W} := 0$$

$$f_{cl} := 1.05 + 0.645 \cdot I_{cl} \quad T_{crn} := 309.6 \quad T_{skn} := 307.1$$

Параметри внутрішнього середовища:

$$\underline{t_r} := 30 \quad \nu := 0.1 \quad \varphi_v := 60$$

Параметри зовнішнього середовища:

$$\varphi_o := 78 \quad T_o := 263 \quad p := 101325$$

Константи

$$\underline{R} := 8.314 \quad \sigma := 5.67 \cdot 10^{-8} \quad c_{pv} := 1846 \quad c_{pa} := 1005 \quad c_{pw} := 4186 \quad \rho_w := 1000$$

$$k := 2.2 \quad K_{min} := 5.8$$

$$X_w := 18.05 \cdot 10^{-3} \quad X_{da} := 28.97 \cdot 10^{-3} \quad \underline{\epsilon} := 1 \quad f := 0.7 \quad f_{ef} := 0.7 \quad h_{rb} := 6.3$$

Вихідні параметри із енергетичного балансу перше наближення:

$$DRY := 41 \quad F_{pcl} := 0.5 \quad F_{cle} := 0.4$$

$$t_a := 15 \quad T_{sk} := 300 \quad T_{cr} := 309 \quad t_{cl} := 20 \quad V_{bl} := 6.3$$

$$p_a := 5 \quad p_{sk} := 27 \quad h_c := 3.8 \quad \underline{h_r} := 3 \quad h := 7$$

$$t_o := 15 \quad W_{SIGcr} := -0.027 \quad W_{SIGsk} := -7 \quad w_{rsw} := 0 \quad m_{rsw} := 0$$

$$E_{rsw} := 0 \quad E_{max} := 128 \quad E_{sk} := 7 \quad E_{res} := 5$$

Вихідні параметри із ексергетичного балансу перше наближення:

$$\text{Exm} := 6 \quad \text{Exgencr} := 0.1 \quad \text{Exgenmbda} := 0.038 \quad \text{Exabsskcl} := 2.03$$

$$\text{Exinhair} := 0.055 \quad \text{Exradde} := 3.68 \quad \text{Exconv} := 1.8 \quad \text{Exexhair} := 1$$

$$\text{Exswha} := 0.144 \quad \text{Excons} := 2 \quad \text{Vwcore} := (1.733 \cdot 10)^{-9}$$

$$\text{Vwshell} := (2.923 \cdot 10)^{-9} \quad \text{pvr} := 400 \quad \text{psvTcr} := 10^3 \quad \text{pvo} := 200$$

$$\text{psvTsk} := 10^3 \quad \text{psvTo} := 560$$

Енергетичний баланс

Given

$$\text{tcl} = [(Tsk - 273 - \text{Icl} \cdot \text{DRY})]$$

$$\text{hc} = \begin{cases} \left(2.38 \cdot \sqrt[4]{|\text{tcl} - \text{ta}|} \right) & \text{if } 2.38 \cdot \sqrt[4]{|\text{tcl} - \text{ta}|} \geq 12.1 \sqrt{\nu} \\ 12.1 \sqrt{\nu} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Esk} = \text{Kmin} \cdot (\text{Tcr} - \text{Tsk}) + \text{Cbl} \cdot \text{Vbl} \cdot (\text{Tcr} - \text{Tsk}) - \text{DRY}$$

$$0 = \text{M} - \text{Eres} - \text{Kmin} \cdot (\text{Tcr} - \text{Tsk}) - \text{Cbl} \cdot \text{Vbl} \cdot (\text{Tcr} - \text{Tsk})$$

$$\text{DRY} = \text{h} \cdot \text{Fcle} \cdot (\text{Tsk} - \text{to} - 273)$$

$$\text{h} = \text{hc} + \text{hr}$$

$$\text{Fpcl} = \frac{1}{1 + 0.922 \cdot \text{hc} \cdot \text{Icl}}$$

$$t_o = \frac{(t_a \cdot h_c + t_r \cdot h_r)}{h}$$

$$h_r = 4 \cdot 0.72 \cdot \sigma \cdot 0.97 \cdot \left(273 + \frac{t_{cl} + t_r}{2} \right)^3$$

$$F_{cle} = \frac{1}{1 + h \cdot I_{cl}}$$

$$E_{res} = 0.00234 \cdot M \cdot (44 - p_a)$$

$$E_{sk} = (0.06 + 0.94 \cdot w_{rsw}) \cdot E_{max}$$

$$E_{max} = k \cdot h_c \cdot (p_{sk} - p_a) \cdot F_{pcl}$$

$$p_a = \varphi_v \cdot 0.01 \cdot e^{\left[18.6689 - \frac{4030.183}{(t_a + 235)} \right]}$$

$$p_{sk} = e^{\left[18.6686 - \frac{4030.183}{(T_{sk} + 235 - 273)} \right]}$$

$$w_{rsw} = \frac{E_{rsw}}{E_{max}}$$

$$E_{rsw} = 0.76 \cdot m_{rsw} \cdot 2^{\frac{((T_{sk} - 273 - 34.1))}{3}}$$

$$WSIG_{cr} = T_{cr} - T_{crn}$$

$$WSIG_{sk} = T_{sk} - T_{skn}$$

$$\text{mrsw} = \begin{cases} 0 & \text{if } (\text{WSIGcr} < 0) \vee (\text{WSIGsk} < 0) \\ 0 & \text{if } \text{WSIGcr} < 0 \wedge \text{WSIGsk} < 0 \\ (250 \cdot \text{WSIGcr} + 100 \cdot \text{WSIGcr} \cdot \text{WSIGsk}) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Vbl} = \begin{cases} \frac{6.3 + 75 \cdot \text{WSIGcr}}{(1 - 0.5 \cdot \text{WSIGsk})} & \text{if } \text{WSIGcr} > 0 \vee \text{WSIGsk} < 0 \\ \frac{6.3 + 75 \cdot \text{WSIGcr}}{(1 - 0.5 \cdot \text{WSIGsk})} & \text{if } \text{WSIGcr} > 0 \wedge \text{WSIGsk} < 0 \\ 6.3 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$z(\text{ta}) := \text{Minerr}(\text{hc}, \text{Fpcl}, \text{Vbl}, \text{tcl}, \text{Tcr}, \text{Tsk}, \text{DRY}, \text{hr}, \text{h}, \text{Fcle}, \text{pa}, \text{Eres}, \text{Esk}, \text{Emax}, \text{psk}, \text{wrs}, \text{Ers}, \text{mrsw}, \text{WSIGcr}, \text{WSIGsk}, \text{to})$$

$$\text{Tcr}(\text{ta}) := z(\text{ta})_5$$

$$\text{Esk}(\text{ta}) := z(\text{ta})_{13}$$

$$\text{Tsk}(\text{ta}) := z(\text{ta})_6$$

$$\text{tcl}(\text{ta}) := z(\text{ta})_4$$

Ексергетичний баланс

Given

$$\text{Exm} + \text{Exgencr} + \text{Exgenmbda} + \text{Exinhair} + \text{Exabsskcl} = \text{Exradde} + \text{Exconv} + \text{Exexhair} + \text{Exswha} + \text{Excons}$$

$$\text{Exm} = M \cdot \left(1 - \frac{T_o}{T_{cr}(\text{ta})} \right)$$

$$\text{Exgencr} = V_{wcore} \cdot \rho_w \cdot \left[c_{pw} \cdot \left[(T_{cr}(ta) - T_o) - T_o \cdot \ln\left(\frac{T_{cr}(ta)}{T_o}\right) \right] + \frac{R}{X_w} \cdot T_o \cdot \left(\ln\left(\frac{p_{sv}T_o}{p_{vo}}\right) \right) \right]$$

$$V_{wcore} = 1.2 \cdot 10^{-9} \cdot M \cdot (0.029 - 0.049 \cdot 10^{-4} \cdot p_{vr})$$

$$\text{Exabsskcl} = f_{ef} \cdot f_{cl} \cdot \varepsilon \cdot h_{rb} \cdot \frac{(tr + 273 - T_o)^2}{(tr + 273 + T_o)}$$

$$\text{Exradde} = f_{ef} \cdot f_{cl} \cdot \varepsilon \cdot h_{rb} \cdot \frac{(tcl(ta) + 273 - T_o)^2}{(tcl(ta) + 273 + T_o)}$$

$$\text{Exconv} = f_{cl} \cdot h_c \cdot (tcl(ta) - ta) \cdot \left(1 - \frac{T_o}{tcl(ta) + 273} \right)$$

$$\begin{aligned} \text{Exinhair} = 1.2 \cdot 10^{-6} \cdot M \cdot & \left[\left[c_{pa} \cdot \left[\frac{X_{da}}{R \cdot (ta + 273)} \right] \cdot ((p - p_{vr})) + c_{pv} \cdot \left[\frac{X_w}{R \cdot (ta + 273)} \right] \cdot p_{vr} \right] \cdot \left[(ta + 273 - T_o) - \right. \right. \\ & \left. \left. - T_o \cdot \ln\left(\frac{ta + 273}{T_o}\right) \right] + \frac{T_o}{ta + 273} \cdot \left[(p - p_{vr}) \cdot \ln\left[\frac{(p - p_{vr})}{(p - p_{vo})}\right] + p_{vr} \cdot \ln\left(\frac{p_{vr}}{p_{vo}}\right) \right] \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Exexhair} = 1.2 \cdot 10^{-6} \cdot M \cdot & \left[\left[c_{pa} \cdot \left(\frac{X_{da}}{R \cdot T_{cr}(ta)} \right) \cdot (p - p_{sv}T_{cr}) + c_{pv} \cdot \left(\frac{X_w}{R \cdot T_{cr}(ta)} \right) \cdot p_{sv}T_{cr} \right] \cdot \left[(T_{cr}(ta) - T_o) - \right. \right. \\ & \left. \left. - T_o \cdot \ln\left(\frac{T_{cr}(ta)}{T_o}\right) \right] + \frac{T_o}{T_{cr}(ta)} \cdot \left[(p - p_{sv}T_{cr}) \cdot \ln\left[\frac{(p - p_{sv}T_{cr})}{(p - p_{vo})}\right] + p_{sv}T_{cr} \cdot \ln\left(\frac{p_{sv}T_{cr}}{p_{vo}}\right) \right] \right] \end{aligned}$$

$$\text{Exgenmbda} = V_{wshell} \cdot \rho_w \cdot \left[c_{pw} \cdot \left[(T_{sk}(ta) - T_o) - T_o \cdot \ln\left(\frac{T_{sk}(ta)}{T_o}\right) \right] + \frac{R}{X_w} \cdot T_o \cdot \left[\ln\left(\frac{p_{sv}T_o}{p_{vo}}\right) + \frac{(p - p_{vr})}{p_{vr}} \cdot \ln\left[\frac{(p - p_{vr})}{(p - p_{vo})}\right] \right] \right]$$

$$V_{wshell} = \frac{E_{sk}(ta)}{\rho_w \cdot 2450 \cdot 10^3}$$

$$\text{Exswha} = \text{Vwshell} \cdot \rho_w \cdot \left[\text{cpv} \cdot \left[(\text{tcl}(\text{ta}) + 273 - \text{To}) - \text{To} \cdot \ln \left(\frac{\text{tcl}(\text{ta}) + 273}{\text{To}} \right) \right] + \frac{R}{X_w} \cdot \text{To} \cdot \left[\ln \left(\frac{\text{pvr}}{\text{pvo}} \right) + \frac{(\text{p} - \text{pvr})}{\text{pvr}} \cdot \ln \left(\frac{(\text{p} - \text{pvr})}{(\text{p} - \text{pvo})} \right) \right] \right]$$

$$\text{psvTcr} = \left[e^{\left[25.89 - \frac{5319}{(\text{Tcr}(\text{ta}))} \right]} \right] \quad \text{psvTo} = \left[e^{\left[25.89 - \frac{5319}{(\text{To})} \right]} \right] \quad \text{psvTsk} = \left[e^{\left[25.89 - \frac{5319}{(\text{Tsk}(\text{ta}))} \right]} \right]$$

$$\text{pvo} = \left[\frac{\varphi_o}{100} \cdot e^{\left[25.89 - \frac{5319}{(\text{To})} \right]} \right] \quad \text{pvr} = \left[\frac{\varphi_v}{100} \cdot e^{\left[25.89 - \frac{5319}{(\text{ta} + 273)} \right]} \right]$$

$$f(\text{ta}) := \text{Minerr}(\text{Exm}, \text{Exgencr}, \text{Exgenmbda}, \text{Exabsskcl}, \text{Exinhair}, \text{Exradde},$$

$$\text{Exconv}, \text{Exexhair}, \text{Exswha}, \text{Excons}, \text{Vwcore}, \text{Vwshell}, \text{psvTcr}, \text{psvTo}, \text{psvTsk}, \text{pvo}, \text{pvr})$$

$$\text{Econs}(\text{ta}) := f(\text{ta})_{10^*}$$

$$\text{Econs1}_1 := 3 \quad *$$

$$\text{tamin} := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 2..22 \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{ta}_i \leftarrow 15 + (i - 2) \\ \text{Econs1}_i \leftarrow \text{Econs}(\text{ta}_i) \\ \text{tamin} \leftarrow \text{ta}_i \text{ if } \text{Econs1}_i < \text{Econs1}_{i-1} \end{array} \right. \\ \text{tamin} \end{array} \right|$$

$\vdash$ tamin = ■

tamin1 := $\left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 2..22 \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{ta}_i \leftarrow \text{tamin} - 1 + (i - 2) \cdot 0.1 \\ \text{Econs1}_i \leftarrow \text{Econs}(\text{ta}_i) \\ \text{tamin1} \leftarrow \text{ta}_i \text{ if } \text{Econs1}_i < \text{Econs1}_{i-1} \end{array} \right. \\ \text{tamin1} \end{array} \right. \quad *$

tamin1 = ■

Додаток В

Методика визначення середньої радіаційної температури на базі ефективних потоків внутрішніх поверхонь огорожень і приладу опалення

$$\text{ORIGIN} := 1$$

$$Q_{\Sigma} := 0 \quad I := 30 \quad F_B := 3.75 \quad F_{31} := 6.25 \quad F_i := 62 \quad \underline{F} := 16 \quad \underline{V} := 40$$

$$\underline{A}_1 := 0.9 \quad \sigma := 5.67 \cdot 10^{-8} \quad \underline{D}_2 := 0.8 \quad A_2 := 0.2$$

$$\text{Apr} := 0 \quad A_{11} := 0.8 \quad A_{22} := 0.2 \quad a_1 := 0.9$$

$$f_{iB} := \frac{F_B}{F_i} = 0.06$$

$$t_3 := -1.1 \quad n := 1 \quad \underline{c} := 1005 \quad \rho := 1.225$$

$$R_{\alpha 3} := \frac{1}{23} = 0.043 \quad R_{\alpha B} := \frac{1}{8.7} = 0.115 \quad R_3 := 0.8 \quad R_B := 0.17$$

$$\alpha_o := 10 \quad t_{ro.} := 10$$

$$Q_3 := 0 \quad Q_{31} := 0 \quad Q_{32} := 0 \quad Q_B := 0 \quad Q_{33} := 0 \quad Q_{o1} := 0$$

$$t_{B.B.} := 0 \quad t_{3.B.} := 0 \quad t_{BH} := 22 \quad t_{zo.} := 40 \quad t_{o.} := 60$$

$$Q_{p.B.1} := 0 \quad Q_{p.3.1} := 0 \quad Q_{p.i.1} := 0 \quad Q_{p.o.1} := 0 \quad F_o := 0$$

$$Q_{e\phi.B.1} := 0 \quad Q_{e\phi.3.1} := 0 \quad Q_{e\phi.i.1} := 0 \quad Q_{e\phi.o.1} := 0$$

$$Q_{e\phi.B.2} := 0 \quad Q_{e\phi.3.2} := 0 \quad Q_{e\phi.i.2} := 0 \quad Q_{e\phi.o.2} := 0$$

$$Q_{p.i.2} := 0 \quad Q_{p.3.2} := 0 \quad Q_{p.B.2} := 0 \quad Q_{p.o.2} := 0 \quad F_3 := 1$$

$$Q_{e.B.1} := 0 \quad Q_{e.3.1} := 0 \quad Q_{e.i.1} := 0 \quad Q_{e.o.1} := 0$$

$$tr_B := 0 \quad tr_3 := tr_i := 0 \quad \underline{tr} := 0$$

Given

$$F_3 = F_{31} - F_o$$

$$Q_\Sigma = Q_B + Q_3 - Q_{p.B.2}$$

$$Q_3 = Q_{31} + Q_{32} + Q_{33}$$

$$Q_{31} = F_3 \cdot \frac{t_{3.B.} - t_3}{R_{\alpha 3} + R_3}$$

$$Q_{31} = F_3 \cdot \frac{t_{BH} - t_{3.B.}}{R_{\alpha B}} - Q_{p.3.1} - Q_{p.3.2}$$

$$Q_{32} = F_B \cdot \frac{t_{B.B.} - t_3}{R_{\alpha 3} + R_B}$$

$$Q_{32} = F_B \cdot \frac{t_{BH} - t_{B.B.}}{R_{\alpha B}} - Q_{p.B.1}$$

$$Q_{33} = F_o \cdot \frac{t_{zo.} - t_3}{R_{\alpha 3} + R_3}$$

$$Q_{33} = F_o \cdot \left[\frac{t_{o.} - t_{zo.}}{\frac{2}{\alpha_o}} + Apr \cdot \sigma \cdot \left[(t_{o.} + 273.15)^4 - (t_{zo.} + 273.15)^4 \right] \right]$$

$$Q_\Sigma = Q_{33} + Q_{o1}$$

$$Apr = \frac{1}{\frac{1}{A_{11}} + \frac{1}{a_1}}$$

$$Q_{o1} = F_o \cdot \alpha_o \cdot (t_{o.} - t_{BH}) + Q_{e.o.1}$$

$$Q_{p.3.1} = Q_{e\phi.3.1} - Q_{e\phi.i.1} \cdot \frac{F_3}{F_i}$$

$$Q_{p.B.1} = Q_{e\phi.B.1} - Q_{e\phi.i.1} \cdot f_{iB}$$

$$Q_{p.o.1} = Q_{e\phi.o.1} - Q_{e\phi.i.1} \cdot \frac{F_o}{F_i}$$

$$Q_{p.3.2} = Q_{e\phi.3.2} - Q_{e\phi.i.2} \cdot \frac{F_3}{F_i}$$

$$Q_{p.B.2} = Q_{e\phi.B.2} - Q_{e\phi.i.2} \cdot f_{iB}$$

$$Q_{p.o.2} = Q_{e\phi.o.2} - Q_{e\phi.i.2} \cdot \frac{F_o}{F_i}$$

$$Q_{p.3.1} + Q_{p.B.1} + Q_{p.i.1} + Q_{p.o.1} = 0$$

$$Q_{p.3.2} + Q_{p.B.2} + Q_{p.i.2} + Q_{p.o.2} = 0$$

$$Q_{e\phi.3.1} = Q_{p.3.1} \cdot \left(1 - \frac{1}{a_1}\right) + \frac{Q_{e.3.1}}{a_1}$$

$$Q_{e\phi.3.2} = Q_{p.3.2} \cdot \left(1 - \frac{1}{A_2}\right)$$

$$Q_{e\phi.B.2} = Q_{p.B.2} \cdot \left(1 - \frac{1}{\mathcal{A}_2}\right) + \frac{I \cdot F_B}{\mathcal{A}_2}$$

$$Q_{e\phi.B.1} = Q_{p.B.1} \cdot \left(1 - \frac{1}{a_1}\right) + \frac{Q_{e.B.1}}{a_1}$$

$$Q_{e\phi.o.1} = Q_{p.o.1} \cdot \left(1 - \frac{1}{A_{11}}\right) + \frac{Q_{e.o.1}}{A_{11}}$$

$$Q_{e\phi.o.2} = Q_{p.o.2} \cdot \left(1 - \frac{1}{A_{22}}\right)$$

$$Q_{e.B.1} = F_B \cdot a_1 \cdot \sigma \cdot (t_{B.B.} + 273.15)^4$$

$$Q_{e.3.1} = F_3 \cdot a_1 \cdot \sigma \cdot (t_{3.B.} + 273.15)^4$$

$$Q_{e.o.1} = F_o \cdot A_{11} \cdot \sigma \cdot (t_{o.} + 273.15)^4$$

$$Q_{e\phi.i.1} = Q_{p.i.1} \cdot \left(1 - \frac{1}{A_1}\right) + \frac{Q_{e.i.1}}{A_1}$$

$$Q_{e\phi.i.2} = Q_{p.i.2} \cdot \left(1 - \frac{1}{A_2}\right)$$

$$Q_{e.i.1} = F_i \cdot a_1 \cdot \sigma \cdot (t_{BH} + 273.15)^4$$

$$Q_B = \left[\frac{n \cdot V \cdot c \cdot \rho \cdot (t_{BH} - t_3)}{3600} \right]$$

$$tr_B = \left[\sqrt[4]{(t_{B.B.} + 273)^4 + Q_{e\phi.B.2} \cdot 0.179 \cdot \frac{10^8}{F_B}} - 273 \right]$$

$$tr_3 = \left[\sqrt[4]{(t_{3.B.} + 273)^4 + Q_{e\phi.3.2} \cdot 0.179 \cdot \frac{10^8}{F_3}} - 273 \right]$$

$$tr_i = \left[\sqrt[4]{(t_{BH} + 273)^4 + Q_{e\phi.i.2} \cdot 0.179 \cdot \frac{10^8}{F_i}} - 273 \right]$$

$$t_{ro.} = \left[\sqrt[4]{(t_{o.} + 273)^4 + Q_{e\phi.o.2} \cdot 0.179 \cdot \frac{10^8}{F_i}} - 273 \right]$$

$$tr = \frac{(trB \cdot F_B + tr3 \cdot F_3 + tri \cdot F_i + t_{ro} \cdot Fo)}{F_B + F_3 + F_i + Fo}$$

$$t_{BH} = (63.35 - 1.75 \cdot tr) - 2.63$$

$$Z := \text{Find}(Q_3, t_{B.B.}, t_{3.B.}, Q_{31}, Q_{32}, Q_{p.B.2}, Q_{p.B.1}, Q_{p.3.1}, Q_{p.3.2}, Q_{e\phi.B.1},$$

$$Q_{e\phi.3.1}, Q_{e\phi.i.1}, Q_{e\phi.B.2}, Q_{e\phi.3.2}, Q_{e\phi.i.2}, Q_{e.B.1}, Q_{e.3.1}, Q_{e.i.1},$$

$$Q_{p.i.1}, Q_{p.i.2}, Q_B, t_{BH}, Q_\Sigma, Fo, Q_{33}, Q_{o1}, t_{zo}, Q_{p.o.1}, Q_{p.o.2}, Q_{e\phi.o.1},$$

$$Q_{e\phi.o.2}, Q_{e.o.1}, Apr, F_3, trB, tr3, tri, tr, t_{ro}.$$

$$Q_3 := Z_1 = 474.447$$

$$Q_{e\phi.i.2} := Z_{15} = 353.165$$

$$t_{B.B.} := Z_2 = 15.648$$

$$Q_{e.B.1} := Z_{16} = 1.331 \times 10^3$$

$$t_{3.B.} := Z_3 = 19.655$$

$$Q_{e.a.1} := Z_{17} = 2.089 \times 10^3$$

$$Q_{31} := Z_4 = 137.057$$

$$Q_{e.i.1} := Z_{18} = 2.38 \times 10^4$$

$$Q_{32} := Z_5 = 294.195$$

$$Q_{p.i.1} := Z_{19} = 8.886$$

$$Q_{p.B.2} := Z_6 = 95.411$$

$$Q_{p.i.2} := Z_{20} = -88.291$$

$$Q_{p.B.1} := Z_7 = -108.207$$

$$Q_B := Z_{21} = 307.078$$

$$Q_{p.a.1} := Z_8 = -48.665$$

$$t_{BH} := Z_{22} = 21.349$$

$$Q_{p.a.2} := Z_9 = -6.345$$

$$Q_\Sigma := Z_{23} = 686.113$$

$$Q_{e\phi.B.1} := Z_{10} = 1.491 \times 10^3$$

$$Fo := Z_{24} = 0.68$$

$$Q_{ed\alpha 1} := Z_{11} = 2.327 \times 10^3$$

$$Q_{ed\beta 1} := Z_{12} = 2.644 \times 10^4$$

$$Q_{ed\beta 2} := Z_{13} = 116.772$$

$$Q_{ed\alpha 2} := Z_{14} = 25.382$$

$$Q_{ed\alpha 1} := Z_{30} = 438.05$$

$$Q_{ed\alpha 2} := Z_{31} = 3.099$$

$$Q_{ed\alpha 1} := Z_{32} = 380.037$$

$$t_{ro} := Z_{39} = 60.006$$

$$tr_B := Z_{35} = 21.275$$

$$Q_{e3} := Z_{25} = 43.195$$

$$Q_{o1} := Z_{26} = 642.918$$

$$t_{zo} := Z_{27} = 52.469$$

$$Q_{po1} := Z_{28} = 147.986$$

$$Q_{po2} := Z_{29} = -0.775$$

$$Apr := Z_{33} = 0.424$$

$$F_a := Z_{34} = 5.57$$

$$tr := Z_{38} = 22.498$$

Додаток Д

Орієнтовна величина поправок на ризик неотримання
передбачених проектом прибутків (економії)

Величина ризику	Характеристика та приклад проекту	Величина поправки, %
Низький	Швидкоокупні низьковитратні проекти, що виконуються без залучення позикових коштів. Наприклад, встановлення погодного регулятора в школі.	3–5
Середній	Швидкоокупні, але затратні проекти, що виконуються з залученням позикових коштів. Середньострокові проекти, що виконуються без залучення позикових коштів. Наприклад, проект автоматизації режимів згоряння палива в котлах.	8–10
Високий	Середньострокові затратні проекти, що виконуються з залученням позикових коштів. Довгострокові проекти. Наприклад, проект проведення глибокої термомодернізації житлового багатоквартирного будинку.	12–15
Дуже високий	Довгострокові затратні проекти, що виконуються з залученням позикових коштів. Наприклад, заміна теплових мереж.	18–20

Додаток Е

Довідки й акти впровадження результатів дисертаційної роботи, свідоцтва про
реєстрацію авторського права



УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 69784

Науковий твір "Економічно доцільний тепловий захист будівлі з різними джерелами теплоти"

(вид, назва твору)

Автор(и) Дешко Валерій Іванович, Буюк Надія Андріївна, Шовкалюк Марина Михайлівна

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 16.01.2017



Голова Державної служби інтелектуальної власності України
В.о. Голови А.А. Малиш

*
М.П.



ДИПЛОМ

II – ступеня

VIII ВСЕУКРАЇНСЬКОГО КОНКУРСУ
"МОЛОДЬ – ЕНЕРГЕТИЦІ УКРАЇНИ – 2009:
ВІДКРИТИЙ КОНКУРС МОЛОДИХ ЕНЕРГЕТИКІВ"
НАГОРОДЖУЮТЬСЯ

Буяк Надія Андріївна
Іщенко Катерина Вікторівна

за роботу на тему:

**“Ексергетичні та ексергоекономічні критерії
енергоефективності будівлі”**

в номінації

“ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТ”

Заступник Міністра палива та
енергетики України

Лучников В.А.

Академік-секретар Національної
академії наук України

Стегній Б.С.

Голова правління ОГ Рада
старійших енергетиків України

Чулков Є.І.

Проректор НТУУ „Київський
політехнічний інститут”

Варламов Г.Б.



RESOURCE EFFICIENT AND CLEANER PRODUCTION CENTRE

Kyiv City Innovative Sectoral
Organization of Employers

Supported by:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra



буля №124 від 12 червня 2017 р.

ДОВІДКА

впровадження результатів дисертаційної роботи аспірантки
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

БУЯК НАДІЇ АНДРІЇВНИ

У 2017 році на прохання Центру ресурсоефективного та чистого виробництва (ЦРЕЧВ, далі Центр) була зроблена презентація та були передані для впровадження розроблені Буюк Н.А. методичні рекомендації щодо вибору джерела теплоти в комплексі з огорожувальними конструкціями будівлі, на базі функції інтегрованої вартості, що дозволяє враховувати зміну вартості грошей та енергоносіїв у часі.

Виконані дослідження є актуальними для використання на практиці при проведенні технічних аудитів, які проводить Центр, і можуть застосовуватися, зокрема, для вирішення задач щодо техніко-економічного обґрунтування заходів з енергозбереження у будівлях, а також для вибору оптимального термічного опору утеплювача при термомодернізації. Запропонована методика є оригінальною з точки зору того, що дозволяє враховувати вартість грошей у часі та зміну вартості енергоносіїв.

Не викликає сумнівів, що розроблені Буюк Надією Андріївною методики та комп'ютерні моделі має певний теоретичний і, що важливо, практичний зміст, можуть широко використовуватися на практиці, відповідають сучасним вимогам енергоаудиту і дозволяють приймати обґрунтовані рішення з впровадження технічних заходів з ресурсо-енергозбереження. Передбачається, що результати зазначених наукових досліджень у подальшому будуть використовуватись у практичній діяльності ЦЕРЧВ.

Цей документ не є підставою для фінансових розрахунків

Директор
Київська міська інноваційна
громадська організація роботодавців
Центр ресурсоефективного та
чистого виробництва
(Проект Організації Об'єднаних
націй з промислового розвитку – ЮНІДО)



Шилович І.Л.

МІНІСТЕРСТВО РЕГІОНАЛЬНОГО РОЗВИТКУ, БУДІВНИЦТВА ТА ЖИТЛОВО-КОМУНАЛЬНОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ



**ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
„ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ”
(ДП НДІБК)**



юридична адреса: вул. І.Клименка, 5/2, м. Київ-37, 03680, поштова адреса: вул. Преображенська, 5/2, м. Київ-37, 03037; тел. (044) 249-72-34, факс (044) 248-89-09
www.niisk.com; e-mail: ndibk@ndibk.gov.ua; niisk-office@ndibk.gov.ua; код ЄДРПОУ 02495431

22.06.2017 № 100-1208 На № _____ від _____

Довідка

ДОВІДКА

впровадження результатів дисертаційної роботи аспірантки

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

БУЯК НАДІЇ АНДРІЇВНИ

В дисертаційній роботі Буюк Н.А. розроблено модель для аналізу показників енергоефективності системи «джерело теплоти – людина – огорожувальні конструкції будівлі».

Ця модель та виконані дослідження дозволяють здійснювати комплексну оцінку енергоефективності будівель та рівня енергоспоживання при визначенні якості мікроклімату та параметрів комфортності. Запропонована експертична модель дозволяє враховувати сучасні тенденції розвитку підходів, щодо забезпечення теплового комфорту, ґрунтується на другому законі термодинаміки та надає нові підходи для визначення впливу параметрів комфортності на показники енергоефективності будівель.

Результати зазначених наукових досліджень використовуються ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» при розробленні сучасних норм та стандартів щодо забезпечення та оцінки енергоефективності теплового комфорту у будівлях.

Цей документ не є підставою для фінансових розрахунків

Директор ДП НДІБК
докт.техн.наук



Г.Г. Фаренюк

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор
Національного технічного
університету України

«Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»
акад. НАН України, д.т.н., проф.



Ю.І. Якименко

« 15 жовтня » 2017 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

в навчальний процес результатів дисертаційної роботи аспірантки кафедри
теплотехніки та енергозбереження Буяк Н. А.

Комісія у складі завідувача кафедри теплотехніки та енергозбереження д.т.н., проф. Дешко В.І. та голови методичної комісії ІЕЕ к.т.н., доц. А.Л. Гана склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Буяк Н. А. використані у навчальному процесі кафедри теплотехніки та енергозбереження КПІ ім. Ігоря Сікорського для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика», спеціалізація «Енергетичний менеджмент та інжиніринг».

Зокрема:

- методика оцінки потоків енергії / ексергії та їх втрат у системі «джерело теплоти – огорожувальні конструкції – оточуюче середовище» під час розробки комп'ютерного практикуму з дисципліни «Методи енергомоніторингу та енергоаудиту»;
- методика вибору джерела теплоти в комплексі з огорожувальними конструкціями на базі функції інтегрованої вартості під час розробки практичних занять з дисципліни «Методи енергомоніторингу та енергоаудиту»;
- матеріали лекційного курсу з дисципліни «Методи енергомоніторингу та енергоаудиту» по темі «Системний підхід до енергозбереження в будівлях».

Завідувач кафедри
Теплотехніки та енергозбереження,
д.т.н., проф.

Голова методичної комісії ІЕЕ,
к.т.н., доц.

В.І. Дешко

А.Л. Ган

Додаток Ж

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Праховник А.В., Дешко В.І., Закладний О.М., Шовкалюк М.М., Буяк Н.А. та ін. Практичний посібник з енергозбереження для об'єктів промисловості, будівництва та житлово-комунального господарства. Луганськ: «Місячне сяйво», 2010. 696 с. **(колективна монографія).**

Автор розробила методику вибору джерела теплоти та огорожувальних конструкцій із врахуванням зміни вартості енергоносіїв та грошей у часі.

2. Deshko V.I., Buyak N.A. A model of human thermal comfort for analyzing the energy performance of buildings. *Eastern European journal of enterprise technologies*, 2016. V. 4/8 (82). P. 42–47. ISSN 1813-5420. **(фахове видання, включене до бази даних Scopus, Index Copernicus та ін).**

Автор розробила комп'ютерну модель теплового комфорту людини та порівняла існуючі моделі.

3. Buyak N.A., Deshko V.I., Sukhodub I.O. Buildings energy use and human thermal comfort according to energy and exergy approach. *Energy and buildings*, 2017. Vol.146. P. 172–181. **(іноземне видання).**

Автору належать розробка алгоритму визначення комфортної температури в приміщенні та оцінка чутливості потреби на опалення до параметрів, що залежать від людини та будівлі.

4. Deshko V.I., Buyak N.A. Building heat source choice using exergoeconomic approach. *Energy, energy saving and rational nature use*, 2017. P. 50–60. **(іноземне видання).**

Автору належить розробка методики вибору джерела теплоти в комплексі з огороженнями на базі ексергоекономічного підходу.

5. Дешко В.І., Буяк Н.А. Вплив теплового захисту будівлі на показники теплового комфорту. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2015. №153. С.121–128. ISSN 1994-7852. **(фахове видання, включене до бази даних Index Copernicus).**

Автор провела оцінку впливу термічного опору огорожувальних

конструкцій на показники теплового комфорту.

6. Дешко В.І., Буяк Н.А., Білоус І.Ю. Вибір теплового захисту та джерела тепла із врахуванням комфортних умов у будівлі. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. Серія: Технічні науки, 2015. № 5. С. 71–80. **(фахове видання, включене до бази даних Ulrich's Periodical Directory).**

Автор розробила комп'ютерну модель для вибору джерела теплоти в комплексі з огорожувальними конструкціями, що враховує комфортні умови.

7. Дешко В.І., Буяк Н.А. Комфортні умови у приміщенні з урахуванням впливу сонячної радіації. *Збірник наукових праць: галузеве машинобудування, будівництво*, 2016. №1. С. 197–204. ISSN 2409-9074. **(фахове видання, включене до бази даних Index Copernicus та Ulrich's Periodical Directory).**

Автор розробила моделі розрахунку середньої радіаційної температури.

8. Дешко В.І., Буяк Н.А. Показники опалення будівель і температурні умови комфортності. *Промислова теплотехніка*, 2010. №1(32). С. 66–70. ISSN 0204-3602. **(фахове видання).**

Автором розроблена модель розрахунку середньої радіаційної температури та визначена комфортна температура повітря.

9. Дешко В.І., Буяк Н.А., Долгополов І.С., Тучин В.Т. Енерго- і ексергоефективність систем теплопостачання будівлі. *Енергетика, економіка, технології, екологія*, 2009. №2. С.32–41. ISSN 1813-5420. **(фахове видання).**

Автору належать розробка та аналіз енергетичних та ексергетичних показників енергоефективності ДК.

10. Дешко В.І., Буяк Н.А. Вплив глибини розрахунку на сукупні інтегровані витрати теплової ізоляції будівлі та джерела теплоти. „Вісник СумДУ”. Серія: Технічні науки, 2009. №4. С. 211–217. **(фахове видання).**

Автором оцінено вплив глибини розрахунку на функцію інтегральної вартості.

11. Дешко В.І., Буяк Н.А. Економічно доцільний тепловий захист будівлі з різними джерелами теплоти. *Наукові вісті Національного технічного університету*

України “Київський політехнічний інститут”, 2009. №3. С. 74–81. – ISSN 1810-0546. **(фахове видання).**

Автором запропоновано функцію інтегральної вартості для визначення оптимального термічного опору огорожувальних конструкцій.

12. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір «Економічно доцільний тепловий захист будівлі з різними джерелами теплоти» / В.І. Дешко, Н.А. Буяк, М.М. Шовкалюк. – № 69784; заявл. 11.11.2016; зареєстр. 16.01.2017.

Автору належить розробка методики вибору джерела теплоти в комплексі з огорожувальними конструкціями.

13. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір «Моделі теплового комфорту та енергоспоживання будівлі» / В.І. Дешко, Н.А. Буяк, І.О. Суходуб. – № 69785; заявл. 11.11.2016; зареєстр. 16.01.2017.

Автор розробила модель для аналізу показників енергоефективності системи ДЛК.

14. Дешко В.І., Буяк Н.А. Вплив приладів опалення на енергоефективність будинків. *Вісник Харківського національного університету сільського господарства імені Петра Василенка: праці міжнар. наук.-практ. конф., (8-9 жовтня 2009 р.), 2009. №87. С. 10–12. ISSN 5-7987-0176X.*

Здобувачеві належить оцінка впливу опалювальних приладів на потребу на опалення будівлі.

15. Дешко В.И., Буяк Н.А. Влияние комфортных условий на интегрированную стоимость отопления. *Промышленная теплотехника*, 2009. №7(31). С. 63–64. ISSN 0204-3602.

Автор оцінила вплив опалювальних приладів на інтегральну вартість системи ДК.

16. Дешко В.І., Буяк Н.А. Вплив життєвого циклу проекту на економічно доцільний тепловий захист будівлі з різними джерелами: матеріали V Міжнародної ювілейної науково-практичної конференції «Екологія. Економіка. Енергозбереження». Суми: Вид-во «СумДУ», 2009. С. 76–78.

Автор оцінила вплив життєвого циклу проекту на інтегровану вартість системи ДК.

17. Дешко В.І., Буяк Н.А. Моделювання впливу сонячної та теплової радіації на комфортну температуру у приміщенні. Проблеми і перспективи розвитку академічної та університетської науки: збірник наукових праць за матеріалами VII Всеукраїнської науково-практичної конференції (8 – 11 груд. 2015 р., м. Полтава). Полтава: ПолтНТУ, 2015. С. 3–6.

Автор оцінила вплив надходження сонячного випромінювання на середню радіаційну температуру.

18. Дешко В.І., Буяк Н.А. Аналіз споживання енергії в комплексі джерело тепла-людина-огорожуючі конструкції. IX МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ПРОБЛЕМИ ПРОМИСЛОВОЇ ТЕПЛОТЕХНІКИ» (20 – 23 жовтня 2015 р., м. Київ). Київ: Національна академія наук України, Інститут технічної теплофізики, 2015. С. 109–110.

Автором проаналізовано зміну енергоспоживання будівлі із врахуванням комфортних умов.

19. Дешко В.І., Буяк Н.А., Іщенко К.В. Економічно доцільний вибір джерела теплоти для гуртожитка. Матеріали науково-технічної конференції Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський Політехнічний Інститут» ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА. Київ: НТУУ «КПІ», ІЕЕ, 2012. С. 433–442.

Автор розробила модель та проаналізувала результати щодо економічного доцільного джерела теплоти.

20. Дешко В.І., Буяк Н.А. Ексергетична модель теплового комфорту людини в зимовий період. Матеріали науково-технічної конференції Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський Політехнічний Інститут» ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА. Київ: НТУУ «КПІ», ІЕЕ, 2016. С. 89–96.

Автору належить аналіз та порівняння складових ексергетичного балансу людини для зимового та літнього періоду.

21. Буяк Н.А, Іщенко К. Оцінка енергоефективності гуртожитку на основі ексергетичних показників. Матеріали XII Всеукраїнської студентської науково-технічної конференції „Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання“ (19-20 квітня 2011 року). Тернопіль: ТНТУ, 2011. Том 1. С. 237.

Автор розробила ексергетичні показники та застосувала їх для оцінки енергоефективності гуртожитку.

22. Буяк Н. Вплив характеристик теплового захисту та джерела тепла на функцію інтегрованих витрат. Матеріали X Всеукраїнської студентської науково-технічної конференції „Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання“ (23-24 квітня 2009 року). Тернопіль : ТДТУ, 2009. Том 1. С. 220.

Автором проаналізовано чутливість функції інтегральної вартості до характеристик теплового захисту та джерела теплоти.