

Центральноукраїнський національний технічний університет

ЦЗДО

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедри ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЕСШКОВ
“__” “_____” 20__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти

на тему:

«Дослідження методів підвищення рівня
енергоефективності адміністративних будівель»

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу, групи *ЕНМ-23МЗ*
ОПП «Енергетичний менеджмент»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»,

_____Ірина КОЛОДІЙ
«__» _____ 2024 р.

Керівник роботи к.т.н., доцент
_____Катерина ПЕТРОВА
«__» _____ 2024 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет ЦЗДО

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Енергетичний менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ:

завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

Петро ПЛЕСХОВ

« 02 » 09 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Колодій Ірини Віталіївни

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Дослідження методів підвищення рівня енергоефективності адміністративних будівель

Research of methods for improving the energy efficiency of administrative buildings

2. Керівник роботи Петрова Катерина Григорівна, к.т.н., доцент

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

3. Строк подання роботи до захисту 17.12.2024 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи Метою кваліфікаційної роботи є дослідження та обґрунтування методів підвищення рівня енергоефективності адміністративних будівель. Досягнення поставленої мети було забезпечене вирішенням наступних завдань: 1) виконати огляд проблеми підвищення рівня енергетичної ефективності будівель адміністративного призначення; 2) розглянути методологію досліджень теплофізичних процесів у світлопрозорих конструкціях; 3) виконати оптимізацію термодинамічних характеристик склопакетів для кліматичних умов м. Кропивницький; 4) виконати дослідження ефективності використання склопакетів з енергоощадним покриттям та аргоновим наповненням.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	доц., к.т.н. Савеленко І.В.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	16.09.2024 р.	
2	Огляд проблеми підвищення рівня енергетичної ефективності будівель адміністративного призначення	30.09.2024 р.	
3	Методологія дослідження теплофізичних процесів у світлопрозорих конструкціях	14.10.2024 р.	
4	Оптимізація термодинамічних характеристик склопакетів для кліматичних умов м. Кропивницького	28.10.2024 р.	
5	Дослідження ефективності використання склопакетів з енергоощадним покриттям та аргоновим наповненням	11.11.2024 р.	
6	Висновки, список використаних джерел	25.11.2024 р.	
7	Оформлення додатків	02.12.2024 р.	
8	Оформлення презентаційної частини КР	05.12.2024 р.	

Дата видачі завдання « ____ » _____ 2024 р.

Підпис керівника _____ Катерина ПЕТРОВА

Завдання прийнято до виконання « ____ » _____ 2024 р.

Підпис здобувача _____ Ірина КОЛОДІЙ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 113 с., 37 рис., 16 табл., 59 джерел

Колодій І. В. Дослідження методів підвищення рівня енергоефективності адміністративних будівель. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота за другим (магістерським) рівнем вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньої програми «Енергетичний менеджмент». – Центральноукраїнський національний технічний університет; Кропивницький, 2024 р.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження та обґрунтування методів підвищення рівня енергоефективності адміністративних будівель. Особливу увагу приділено аналізу технічних, організаційних та економічних аспектів впровадження енергоефективних заходів, враховуючи специфіку адміністративних будівель в Україні.

У роботі виконано огляд проблеми підвищення рівня енергетичної ефективності будівель адміністративного призначення, розглянута методологія дослідження теплофізичних процесів у світлопрозорих конструкціях, виконано оптимізацію термодинамічних характеристик склопакетів для кліматичних умов м. Кропивницького, а також здійснено дослідження ефективності використання склопакетів з енергоощадним покриттям та аргоновим наповненням.

Результати досліджень можуть бути використані для розроблення та обґрунтування ітенсифікації впровадження енергоефективних заходів для адміністративних будівель.

**ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ, АДМІНІСТРАТИВНІ БУДІВЛІ,
СВІТЛОПРОЗОРИ ОГОРОДЖУВАЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ, ЕНЕРГООЩАДНЕ
ПОКРИТТЯ**

ABSTRACT

Qualification work: 113 p.; 37 fig.; 16 tables; 59 source

Kolodii I. V. Research of methods for improving the energy efficiency of administrative buildings. - Manuscript.

Qualification thesis second (master's) level of higher education on speciality 141 "Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics" professional program "Energy management". – Central Ukrainian National Technical University; Kropyvnytskyi, 2024.

The purpose of the qualification work is research and substantiation of methods of increasing the level of energy efficiency of administrative buildings. Special attention is paid to the analysis of technical, organizational and economic aspects of the implementation of energy-efficient measures, taking into account the specifics of administrative buildings in Ukraine.

The work reviewed the problem of increasing the level of energy efficiency of administrative buildings, considered the methodology of research of thermophysical processes in translucent structures, optimized the thermodynamic characteristics of double-glazed windows for the climatic conditions of the city. Kropyvnytskyi, as well as a study of the effectiveness of using double-glazed windows with energy-saving coating and argon filling.

Research results can be used to develop and justify the intensification of the implementation of energy-efficient measures for administrative buildings.

ENERGY EFFICIENCY, ADMINISTRATIVE BUILDINGS,
TRANSPARENT ENCLOSURE STRUCTURES, ENERGY-SAVING COATING

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ АДМІНІСТРАТИВНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	10
1.1. Терміни та визначення.....	11
1.2. Комплексне дослідження проблематики енергоефективності адміністративного фонду України в контексті світових тенденцій	15
1.3. Аналіз питання підвищення рівня енергоефективності будівель адміністративного призначення.....	26
1.4. Сучасний стан проблеми теплових втрат через світлопрозорі огороджувальні конструкції.....	28
Висновки до розділу 1	37
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СВІТЛОПРОЗОРИХ КОНСТРУКЦІЯХ.....	38
2.1. Фундаментальні аспекти теплопередачі та її різновиди у світлопрозорих огороджувальних системах	38
2.2. Нормативні вимоги до теплотехнічних характеристик віконних конструкцій	41
2.3. Методологічні основи визначення ефективного термічного опору віконних конструкцій.....	42
2.4. Залежність теплопередачі склопакету від кліматичних особливостей регіону.....	47
2.5. Оптимізація характеристик склопакетів за допомогою методу математичного планування експерименту.....	50
2.6. Оптимізація та оцінка ефективності параметрів склопакетів за допомогою функції бажаності Харрінгтона.....	56
2.7. Програмні комплекси для теоретичних розрахунків.....	61
Висновки до розділу 2	62
РОЗДІЛ 3.ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК	64

СКЛОПАКЕТІВ ДЛЯ КЛІМАТИЧНИХ УМОВ М. КРОПИВНИЦЬКОГО

3.1. Математичне моделювання теплофізичних характеристик склопакетних конструкцій.....	64
3.2. Аналіз кореляції між термічним опором центральної зони склопакетних конструкцій та їх геометричними характеристиками в умовах клімату м. Кропивницький	72
3.3. Оптимізація параметрів склопакетів з урахуванням нормування теплового опору для м. Кропивницький	77
Висновки до розділу 3	91
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СКЛОПАКЕТІВ З ЕНЕРГООЩАДНИМ ПОКРИТТЯМ ТА АРГОНОВИМ НАПОВНЕННЯМ.....	92
4.1. Інтенсивність втрати інертного газу зі склопакетних конструкцій впродовж тривалого періоду експлуатації	93
4.2. Динаміка теплозахисних властивостей центральної зони склопакета з врахуванням міграції аргону.....	94
Висновки до розділу 4	95
ВИСНОВКИ.....	97
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	100
ДОДАТКИ.....	106
ДОДАТОК А. Охорона праці.....	107

ВСТУП

Енергетична ефективність є одним із ключових чинників сталого розвитку сучасного суспільства. Зростаюче споживання енергетичних ресурсів, екологічні виклики, а також необхідність зниження витрат на енергопостачання висувають нові вимоги до управління енергоспоживанням у різних секторах економіки. Однією з найбільш енергоємних категорій будівель є адміністративні будівлі, які споживають значну частку енергоресурсів і мають великий потенціал для впровадження енергоефективних заходів.

На тлі глобальних ініціатив зі зменшення викидів парникових газів і переходу до низьковуглецевої економіки актуальність підвищення енергоефективності адміністративних будівель постійно зростає. У Європейському Союзі, зокрема, діють жорсткі директиви, спрямовані на модернізацію будівельного фонду, тоді як в Україні імплементація схожих підходів передбачає інтеграцію інноваційних рішень та адаптацію міжнародного досвіду до національних умов.

Реалізація програм з підвищення енергоефективності адміністративних будівель потребує комплексного підходу, що включає впровадження сучасних інженерних рішень, розробку та реалізацію енергетичних аудитів, а також вдосконалення систем управління енергоресурсами. Доцільність таких заходів підтверджується їх впливом на зменшення енергетичних витрат, підвищення комфорту для користувачів і зниження екологічного навантаження.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження та обґрунтування методів підвищення рівня енергоефективності адміністративних будівель. Особливу увагу приділено аналізу технічних, організаційних та економічних аспектів впровадження енергоефективних заходів, враховуючи специфіку адміністративних будівель в Україні.

Об'єктом дослідження є адміністративні будівлі різного функціонального призначення, які демонструють високий потенціал

енергоощадження за умов правильної модернізації та раціонального управління енергоресурсами.

Предметом дослідження є методи та підходи, що сприяють підвищенню енергоефективності адміністративних будівель.

Робота базується на аналізі сучасної нормативно-правової бази, досвіді вітчизняних і міжнародних практик, а також результатах техніко-економічного моделювання. У межах дослідження застосовано такі методи, як енергетичне обстеження, математичне моделювання, порівняльний аналіз та оцінка ефективності впроваджених заходів.

Практичне значення роботи полягає в тому, що її результати можуть бути використані для оптимізації енергоспоживання в адміністративних будівлях, розробки рекомендацій для фахівців у галузі енергоефективності та формування політики сталого розвитку в будівельному секторі.

Таким чином, дослідження методів підвищення енергоефективності адміністративних будівель має не лише теоретичне, а й вагоме прикладне значення. Це відкриває можливості для досягнення енергетичної незалежності країни, зменшення екологічного впливу та підвищення конкурентоспроможності енергетичної галузі загалом.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ АДМІНІСТРАТИВНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У структурі енергоспоживання Європейського Союзу будівельна галузь посідає провідне місце серед усіх секторів економіки. Згідно з актуальними статистичними даними, об'єкти нерухомості поглинають приблизно 40% загального енергетичного балансу співтовариства та продукують 36% емісії CO₂, створюючи значне навантаження на довкілля. Європейська комісія визначила модернізацію енергетичних характеристик існуючих та новозведених будівель ключовим фактором реалізації концепції сталого розвитку континенту. Суттєвим викликом постає необхідність оновлення наявного фонду нерухомості, адже значна частка європейських будівель експлуатується більше півстоліття.

Сучасні виклики спонукають до комплексного підходу у вирішенні енергетичних питань: від впровадження передових технологій при проєктуванні нових споруд до масштабної реконструкції наявних об'єктів із застосуванням інноваційних архітектурних та інженерних рішень. Перспективним напрямком оптимізації енергоспоживання виступає вдосконалення теплоізоляційних характеристик прозорих конструктивних елементів фасадних систем.

Дослідження окресленої проблематики вимагає глибинного осмислення концепції енергоефективності будівельних об'єктів. Важливого значення набуває вивчення передового досвіду впровадження енергоощадних технологій у адміністративному секторі України та провідних країн світу. Фундаментальний аналіз механізмів втрати теплової енергії через різноманітні конструктивні елементи адміністративних споруд дозволяє виявити найбільш вразливі місця та запропонувати ефективні рішення. Критичний огляд наукових публікацій формує теоретичне підґрунтя для

оцінки економічної доцільності впровадження різноманітних енергоощадних заходів, зокрема модернізації світлопрозорих конструкцій фасадів.

Представлений розділ має на меті всебічне дослідження зазначених аспектів енергоефективності адміністративних будівель та розробку науково обґрунтованих рекомендацій щодо її підвищення в сучасних умовах.

1.1. Терміни та визначення

Термінологічний апарат у сфері енергоефективності будівель охоплює низку ключових понять. Основоположним серед них виступає поняття «енергетичної ефективності будівлі», що за нормативним визначенням [2] характеризує здатність будівлі забезпечувати комфортні умови життєдіяльності при оптимальному споживанні енергетичних ресурсів.

Практична реалізація концепції енергоефективності спрямована на мінімізацію питомих показників споживання енергії ($\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$) при збереженні належного рівня мікроклімату та експлуатаційного комфорту приміщень [1]. Для об'єктивної оцінки досягнутого рівня енергоефективності в європейській практиці, яку також впроваджує Україна, застосовується система сертифікації відповідно до профільної Директиви ЄС. Градація енергоефективності здійснюється за шкалою від А до G (рис.1.1), причому клас С встановлює базовий рівень відповідності нормативним вимогам.



Рисунок 1.1 – Ранжування за класами енергоефективності будівель у відповідності до [3]

Важливим параметром оцінювання виступає ΔEP – показник, що відображає процентне співвідношення між фактичним та нормативним значеннями питомого енергоспоживання під час опалювального та охолоджувального періодів.

У контексті конструктивних елементів особлива увага приділяється світлопрозорим конструкціям. Віконний блок представляє собою інтегровану світлопрозору систему, що забезпечує природну інсоляцію, вентиляцію та захист від зовнішніх впливів [4]. Конструктивною основою виступає віконна рама – багаторівнева структура з вертикальних стояків, горизонтальних ригелів та додаткових елементів, призначена для монтажу склопакетів та стулок (рис.1.2.).

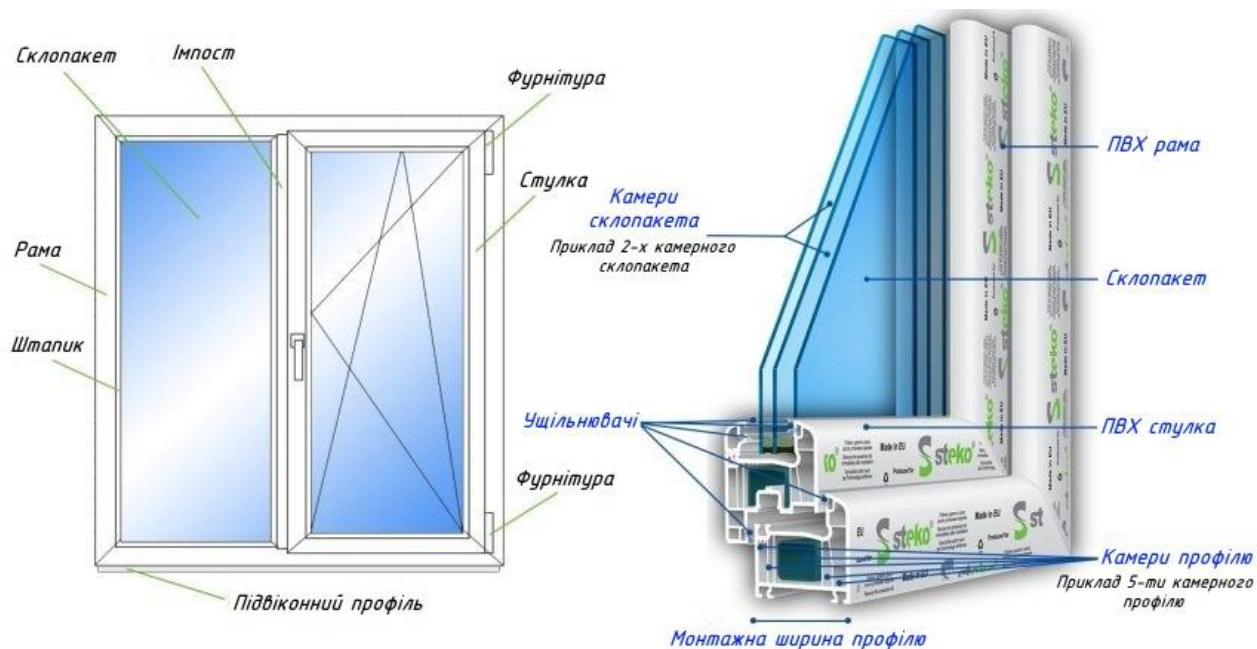


Рисунок 1.2 – Віконний блок з профілем ПВХ

Світлопрозоре заповнення реалізується через застосування склопакетів – герметичних конструкцій з двох чи трьох скляних панелей, розділених дистанційними рамками та заповнених осушеним повітрям або інертним газом [5]. Ефективність теплоізоляції склопакета визначається не лише товщиною скла та кількістю камер, але й оптимальним балансом між теплозахисними властивостями та світлопропусканням.

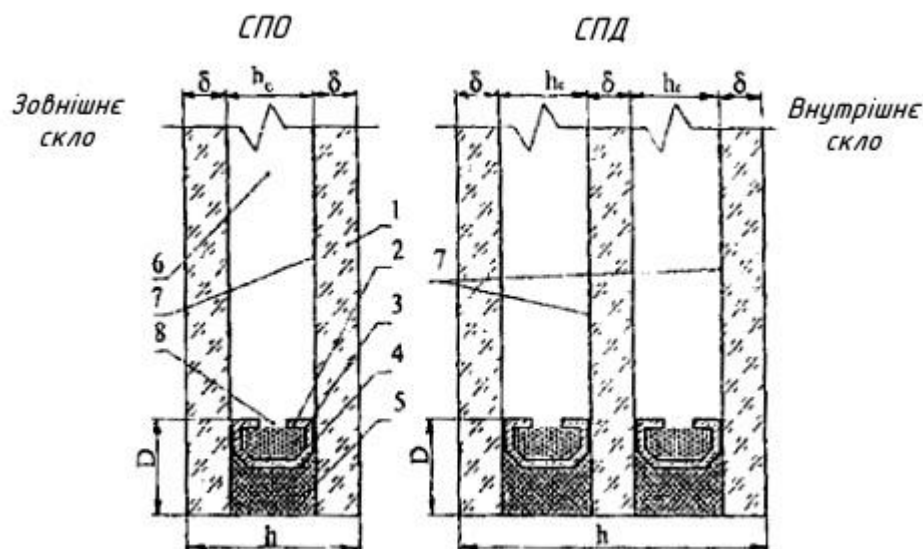


Рисунок 1.3 – Конструкційні особливості склопакетів

Рис. 1.3 надає пояснення щодо можливих різноманітних конфігурацій та структурні компоненти сучасних склопакетів, де кожен елемент виконує специфічну функцію у забезпеченні ефективності конструкції. Базовим компонентом виступає скло (позиція 1), на поверхню якого може наноситися низькоемісійне покриття (позиція 2), що розташовується згідно з рекомендованими схемами для максимальної теплоізоляції.

Просторова організація склопакета забезпечується дистанційною рамкою (позиція 3), котра разом із вологопоглиначем (позиція 4) формує периметральну конструкцію. Система герметизації реалізується через комбінацію нетверднучого (позиція 5) та тверднучого (позиція 6) герметиків, які створюють надійний бар'єр від атмосферних впливів.

Міжскляний простір (позиція 7) відіграє ключову роль у теплоізоляційних властивостях конструкції. Ефективне функціонування системи підтримується через дегідраційні отвори (позиція 8), що забезпечують необхідний вологісний режим.

Геометричні параметри конструкції характеризуються загальною товщиною склопакета (δ), відстанню між скляними поверхнями (h_c) та

глибиною герметизуючого шару (D), оптимальне співвідношення яких визначає експлуатаційні характеристики виробу.

Сучасна класифікація [7] розрізняє однокамерні (СПО) та двокамерні (СПД) склопакети, кожен з яких має специфічні функціональні характеристики залежно від застосованих типів скла та конструктивного виконання.

Розглянемо основні типи склопакетів та їхні конструктивні особливості, що визначають їх експлуатаційні характеристики.

Базовою конфігурацією виступає однокамерний склопакет, який формується двома скляними панелями з герметичним повітряним простором між ними. Стандартне виконання передбачає використання скла товщиною 4 мм із міжскляною відстанню 16 мм, що забезпечує загальну товщину конструкції 24 мм. Хоча такі конструкції широко застосовувались два десятиліття тому, сучасні теплотехнічні норми обмежують їх використання зонами без постійного перебування людей - балконами, лоджіями, неопалюваними приміщеннями, верандами дачних будинків.

Більш досконалим рішенням є двокамерний склопакет, що складається з трьох скляних панелей, розділених двома ізольованими камерами. Інноваційним аспектом виступає можливість заповнення камер інертними газами - аргоном, вуглекислим газом або ксеноном, які демонструють покращені теплоізоляційні властивості порівняно з повітрям. Оптимальна конструкція для вітчизняних кліматичних умов передбачає товщину 38 мм із дистанціями між склом 14 та 12 мм, що забезпечує відповідність сучасним будівельним нормам та високі акустичні характеристики.

Максимальні показники теплоізоляції досягаються у трикамерних склопакетах, де чотири скляні панелі формують три ізольовані простори. Такі конструкції демонструють на 30-50% вищу теплоізоляцію порівняно з двокамерними аналогами, проте їх значна вага потребує секційного виконання, що впливає на світлопропускання.

Технологічним проривом у склопакетобудуванні стало впровадження низькоемісійного скла (Low-E), яке поєднує високу світлопрозорість із підвищеною теплоізоляцією. Розрізняють *K*-скло з покриттям, нанесеним флоат-методом під час виробництва, та *I*-скло з вакуумним магнетронним напиленням металовмісних сполук, що забезпечує специфічні селективні властивості.

1.2. Комплексне дослідження проблематики енергоефективності адміністративного фонду України в контексті світових тенденцій

Наша держава входить до переліку країн із суттєвим енергетичним дефіцитом щодо забезпечення базовими джерелами первинної енергії, що змушує постійно нарощувати імпортні поставки. Критична енергозалежність України, яка сягає понад 51%, значною мірою зумовлена нераціональним споживанням енергоресурсів.

Переважна частина адміністративного фонду зведена до 1990-х років. Застосовані тоді конструктивні рішення (великопанельні конструкції, блочні системи, залізобетонні каркаси) суттєво поступаються сучасним стандартам енергоефективності. Такі будівлі демонструють низьку теплоізоляційну спроможність та потребують масштабної модернізації.

Індиферентність регіональних адміністрацій до питань енергомодернізації призвела до парадоксальної ситуації: споживачі витрачають колосальні обсяги теплової енергії (втрачаючи понад 30%), не досягаючи належного рівня комфорту. Це яскраво ілюструє неефективність використання бюджетних ресурсів на опалення муніципального сектору.

За результатами "Моніторингу енергоефективності України 2019", проведеного спільно з ПРООН та ГЕФ, енергоефективність української економіки досягла лише 60% від середньоєвропейського показника. Невикористаний потенціал енергозбереження оцінюється у 27,1 млн тонн нафтового еквіваленту, що перевищує 29,9 млрд м³ природного газу.

Промисловість та житловий сектор концентрують приблизно по третині цього потенціалу, тоді як на сферу послуг припадає 11%, а на будівництво – 1%.

Показники споживання теплової енергії бюджетними установами України (130-250 кВт·год/м²) значно перевищують європейські норми (50-80 кВт·год/м²). Приведення енергоспоживання до стандартів ЄС дозволить економити до 11,4 млрд м³ газу щорічно. Щорічні втрати через неефективне енергоспоживання перевищують 15-17 млрд доларів США при високій імпортозалежності.

На основі актуальних даних проведено детальний аналіз динаміки кількості адміністративних споруд, їх розподілу за класами енергоефективності та регіональною приналежністю за останній трирічний період.

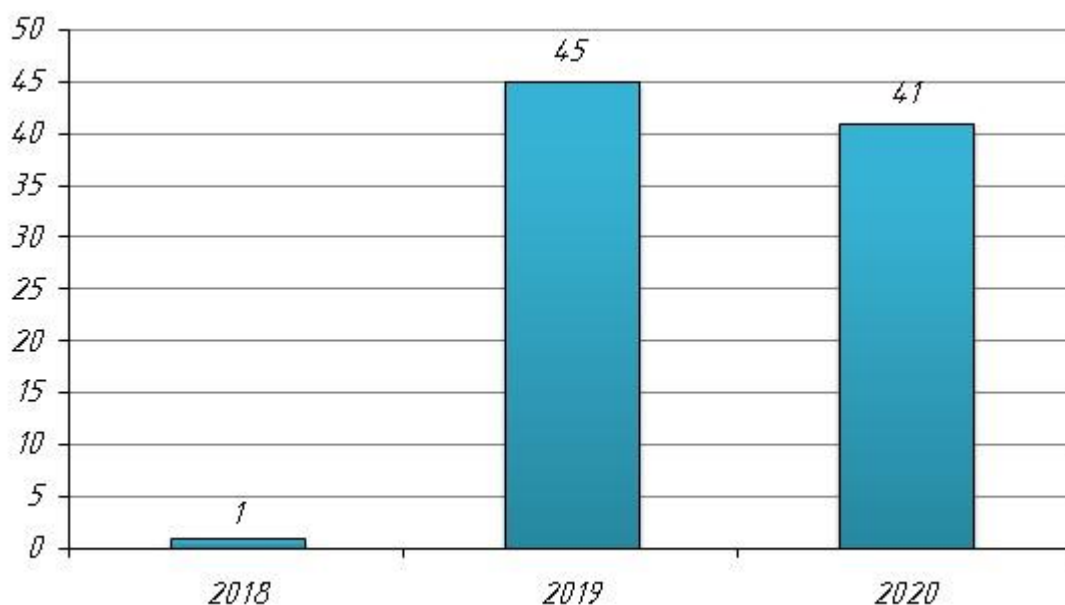


Рисунок 1.4 - Динаміка сертифікації енергоефективності адміністративного фонду України за період 2018-2020 років

Примітка: Візуалізація базується на офіційних даних реєстру енергетичних сертифікатів будівель. Спостерігається стрімке зростання кількості сертифікованих об'єктів, особливо у великих адміністративних центрах. Дані демонструють нерівномірність процесу сертифікації між

регіонами, що відображає різний рівень впровадження енергоефективних заходів та фінансової спроможності місцевих бюджетів.

Аналіз статистичних даних демонструє суттєву позитивну динаміку сертифікації адміністративних будівель у 2019 році порівняно з попереднім періодом. Це свідчить про зростаючий інтерес до енергетичного аудиту та впровадження енергоощадних технологій у будівельному секторі. Втім, 2020 рік позначився незначним зниженням темпів сертифікації, що частково пояснюється впливом пандемічних обмежень.

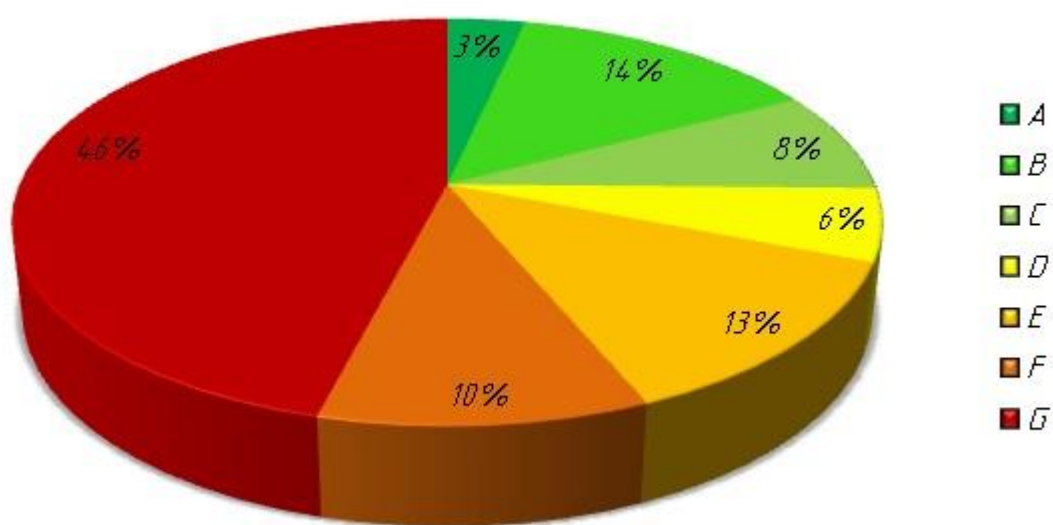


Рисунок 1.5 - Розподіл адміністративних споруд за класами енергетичної ефективності в Україні (2021-2023 рр.)

Статистичний аналіз енергетичної ефективності адміністративного фонду України виявляє критичну ситуацію: значна частка будівель характеризується низькими показниками енергоефективності, які не відповідають встановленим мінімальним нормативним вимогам згідно з актуальними державними будівельними нормами.

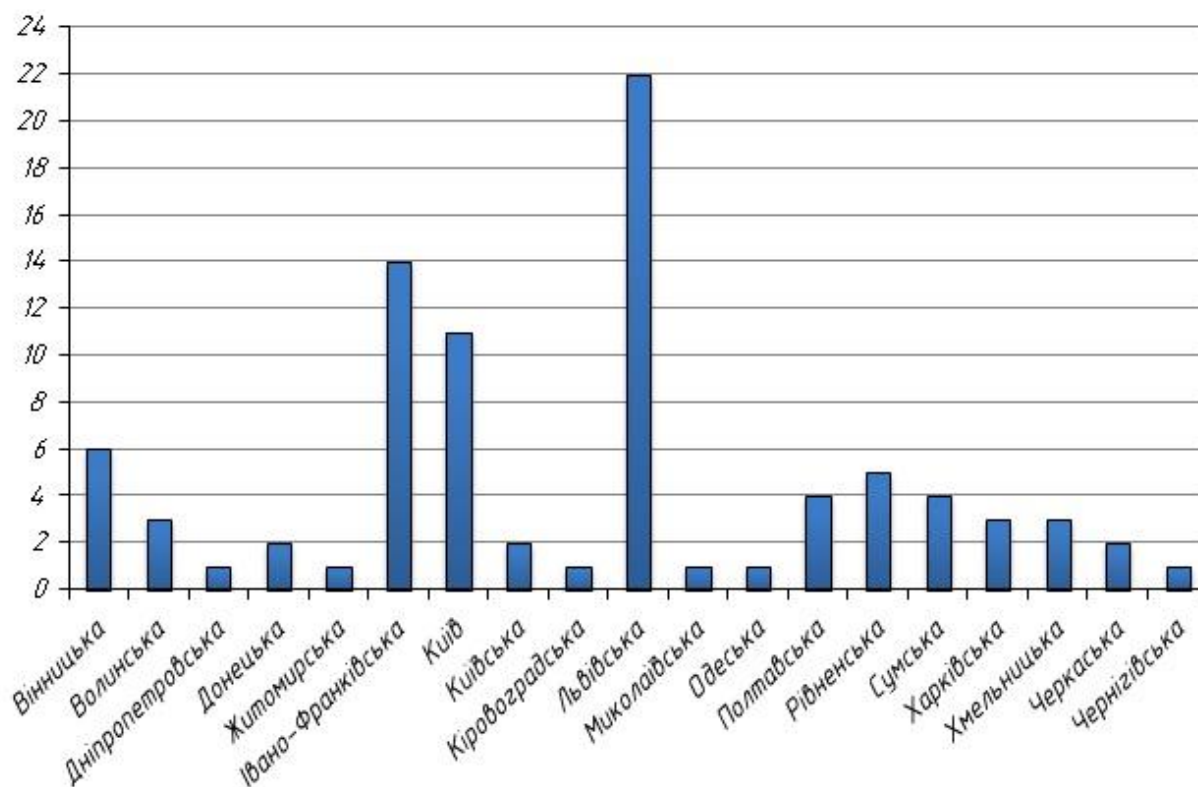


Рисунок 1.6 - Регіональний розподіл сертифікованих адміністративних об'єктів в Україні (2018-2020 рр.)

Територіальний аналіз процесу енергетичної сертифікації виявляє помітну концентрацію сертифікованих об'єктів у західному регіоні України. Така тенденція пояснюється специфікою історичної забудови цих територій, де значна частка адміністративних споруд становить історичний фонд, що потребує комплексної енергомодернізації відповідно до сучасних стандартів. Додатково це може бути зумовлено активнішою позицією місцевої влади щодо впровадження енергоефективних заходів та наявністю міжнародних програм підтримки енергомодернізації в цих регіонах.

Федеративна Республіка Німеччина у 2010 році запровадила амбітну енергетичну стратегію, що передбачає:

- зменшення емісії парникових газів на 80% до 2050 року відносно показників 1990 року;
- трансформацію енергетичного сектору з пріоритетним використанням відновлюваних джерел;

- суттєве скорочення енергоспоживання через підвищення ефективності використання ресурсів.

Станом на 2014 рік адміністративно-офісний фонд Німеччини налічував 295 тисяч споруд загальною площею 266 мільйонів квадратних метрів, що становить десятку частину від усіх нежитлових будівель країни та 17,5% їхньої сумарної площі.

Специфіка німецького будівельного сектору полягає у домінуванні старого фонду при низьких темпах нового будівництва. Це зумовило фокус державної політики на стимулюванні комплексної модернізації існуючих споруд задля досягнення максимальної енергоефективності.

За класифікацією Buildings According to Age, хронологічний розподіл адміністративних будівель демонструє превалюючу частку об'єктів, зведених до 1975 року (рис.1.7). Це створює нагальну потребу в їх модернізації відповідно до сучасних енергетичних стандартів.

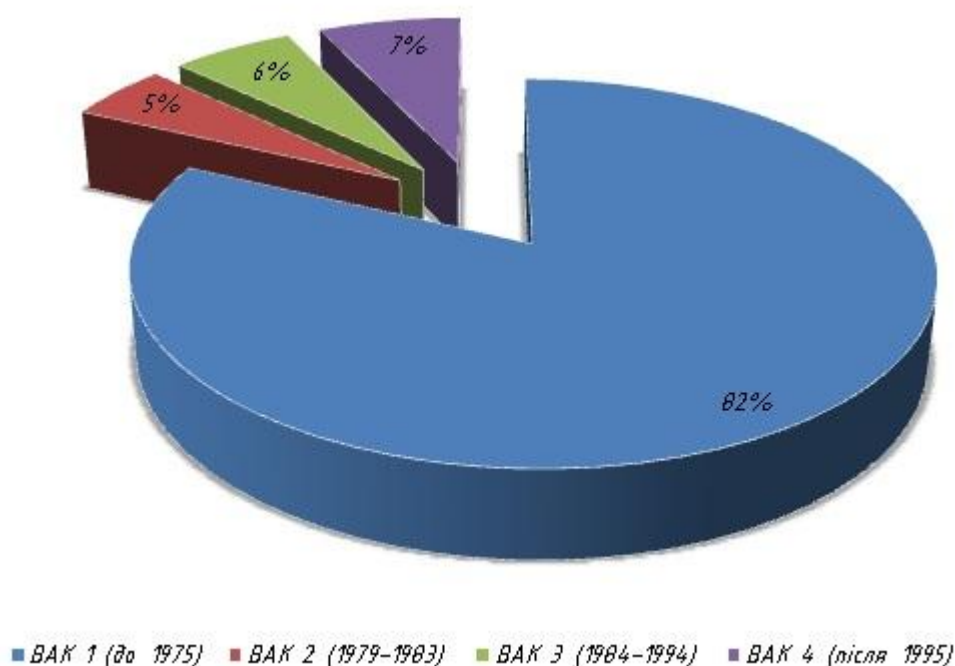


Рисунок 1.7 – Розподіл кількості адміністративних будівель у відсотках відносно року будівництва (складено автором на основі [12])

Географічне розташування Німеччини в помірному кліматичному поясі характеризується вологими прохолодними зимами та теплим літнім періодом. Найбільші енергетичні витрати припадають на опалення приміщень, тоді як потреба в кондиціонуванні залишається незначною завдяки культурі природної вентиляції.

Вищі, порівняно зі США, тарифи на енергоносії роблять заходи з енергомодернізації в Німеччині економічно привабливішими. Національна енергетична концепція країни (BMWi & BMU, 2010) встановлює амбітні цілі:

- скорочення споживання первинної енергії будівельним сектором на 80% до 2050 року;
- зменшення потреб в опаленні на 20% до 2021 року;
- досягнення кліматичної нейтральності всіх нових будівель до 2020 року;
- підвищення значення коефіцієнта теплової модернізації до 2%.

Така стратегія демонструє системний підхід Німеччини до вирішення питань енергоефективності в будівельному секторі.

Модернізація енергетичних характеристик будівель у Німеччині регламентується директивою Directive 2010/31/EU. Її основні положення імplementовані у федеральному законі про енергоощадність (Energieeinsparungsgesetz), який встановлює комплексні вимоги до:

- термоізоляційних властивостей будівельних конструкцій;
- продуктивності інженерних систем (опалення, вентиляція, гаряче водопостачання);
- індивідуального обліку та тарифікації теплової енергії.

Сертифікація енергоефективності є обов'язковою для новозбудованих та капітально модернізованих об'єктів на основі проектних розрахунків енергопотреб. Для існуючих будівель допускається вибір між проектним та фактичним методами оцінювання енергоспоживання.

Будівельна галузь демонструє найвищі показники покращення енергоефективності завдяки впровадженню у 1970-х роках будівельним

нормам та фінансовим програмам банку KfW, спрямованим на підтримку нового будівництва та реконструкції.

Специфікою німецького ринку нерухомості є висока частка орендного житла (55%), що створює певні виклики у впровадженні енергоефективних заходів через розбіжність інтересів власників та орендарів.

Банківська група KfW пропонує комплексну програму стимулювання енергомодернізації через пільгове кредитування та грантову підтримку. Додатково діє система справедливої тарифікації централізованого теплопостачання та екологічного оподаткування енергоспоживання.

Сучасні нормативи обмежують споживання первинної енергії в нових будівлях до 45 кВт-год/м². Обов'язковим є часткове використання відновлюваних джерел енергії. При реконструкції існуючих будівель власники зобов'язані дотримуватися мінімальних стандартів енергоефективності. Особливі вимоги стосуються модернізації застарілих систем опалення (понад 30 років експлуатації).

Відповідно до оновленої Директиви про енергетичну ефективність будівель (EPBD), з 2020 року всі нові споруди в країнах ЄС повинні відповідати стандарту будівель з майже нульовим енергоспоживанням (NZEB). Це стимулює подальший розвиток будівельних норм та технологій енергозбереження.

З 1985 по 2019 рік рівень енергоспоживання у Сполучених Штатах зріс на 26%. У той самий період валовий внутрішній продукт (ВВП) країни зріс на 149%, що свідчить про суттєве зростання економіки. Водночас енергоємність, яка є показником енерговитратності на одиницю ВВП, зменшилася на 50%, що означає середнє щорічне поліпшення на 2%. Це вдосконалення значною мірою стало можливим завдяки впровадженню енергоефективних рішень, хоча частково воно пов'язане зі змінами у структурі економіки: поступове скорочення частки енергоємних галузей, зокрема важкої промисловості. Аналізуючи ці дані, експерти дійшли висновку, що 40% скорочення

енергоємності припало на структурні зміни, а решта 60% — на поліпшення ефективності енергоспоживання [16].

В адміністративному секторі споживання енергії за вказаний період зросло на 73%, що значно перевищує середній показник зростання в інших секторах. Це здебільшого пояснюється розширенням площі будівель адміністративного призначення, яка збільшилася на 70% у період між 1979 і 2012 роками [17]. Основними споживачами енергії в цих будівлях є системи освітлення, а також опалення, вентиляція та кондиціонування повітря (HVAC). Разом ці дві категорії у 2010 році становили близько 60% від загального обсягу енергоспоживання у сфері адміністративних будівель [18]. Цікаво, що більшість адміністративних будівель у США зведені після 1970 року. Це наочно демонструється на графіку (рис. 1.8), де зображена динаміка частки будівель за роками їхнього зведення. Відносно недавній вік цих споруд пояснює їхній активний внесок у загальне зростання споживання енергії, оскільки нові будівлі часто мають більшу площу і більш складні інженерні системи.

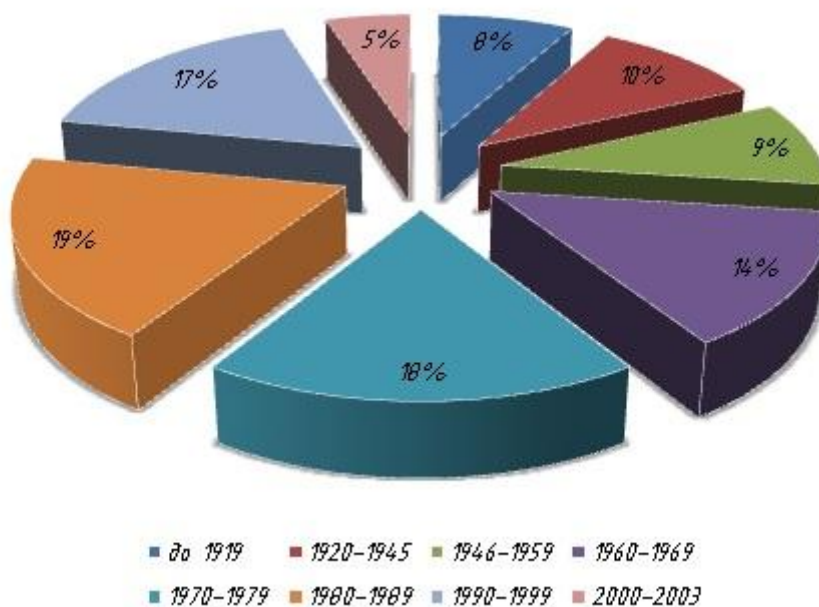


Рисунок 1.8 – Діаграма кількісного розподілу адміністративних будівель в США за роками будівництва (складено автором на основі [12])

Рис.1.8 ілюструє відсотковий розподіл адміністративних споруд у США залежно від року їх побудови (підготовлено автором за даними джерела [12]).

Системи кондиціонування повітря у таких будівлях споживають приблизно 40% енергії, а опалення приміщень — ще 25%, враховуючи охолодження та вентиляцію. Це свідчить про значний енергетичний попит, пов'язаний з підтриманням комфортного мікроклімату.

Диверсифіковані кліматичні умови Сполучених Штатів, що варіюються від дуже холодних регіонів до теплих зон, впливають на попит на енергоресурси. У зимовий період більшість регіонів потребує суттєвих витрат на опалення, тоді як у літні місяці спостерігається високий попит на охолодження. Завдяки порівняно низьким цінам на енергоносії у співвідношенні до середнього рівня доходів, а також заходам державного стимулювання енергоефективності, уряд США постійно шукає нові способи підвищення ефективності використання енергії.

На федеральному рівні приймаються енергетичні стандарти для побутової техніки, тоді як кодекси для будівель регулюються на рівні штатів. Цей підхід частково схожий із практикою в Європейському Союзі, де стандарти для обладнання уніфікуються на загальноєвропейському рівні, а будівельні норми адаптуються кожною державою-членом. У США законодавча політика орієнтована на надання інформаційної підтримки, заохочень та навчання, щоб подолати бар'єри у впровадженні енергоефективних технологій як серед приватних осіб, так і в комерційному секторі.

Енергетичні будівельні кодекси, запроваджені різними штатами, здебільшого регулюють архітектурні рішення та енергетичну ефективність систем опалення, вентиляції, охолодження, освітлення та водонагрівального обладнання. Багато з них поширюються також на масштабні реконструкції. Водночас не всі штати ухвалили єдині стандарти: у деяких регіонах відсутні обов'язкові енергетичні норми для будівель, тоді як окремі органи місцевого самоврядування встановлюють жорсткіші вимоги, ніж державні кодекси.

Крім цього, місцева влада нерідко підтримує впровадження "розширених" норм, які виходять за межі обов'язкових вимог. До них належать зелені будівельні стандарти або системи незалежної сертифікації, що оцінюють експлуатаційні показники об'єктів. Це стимулює впровадження більш стійких та екологічно безпечних рішень у будівництві та реконструкції [14].

У 2016 році будівлі в ЄС-28 спожили 458 млн тонн нафтового еквівалента (т.н.е.), що становило 41% загального кінцевого енергоспоживання та 60% використання електроенергії у регіоні. Після періоду зростання енергоспоживання в будівлях у 2000–2008 роках зі швидкістю 0,7% на рік, спостерігалось поступове зниження цього показника. З 2008 по 2016 рік річне споживання енергії в будівлях зменшувалося в середньому на 0,6%. Особливо помітне скорочення розпочалося після світової фінансової кризи, коли з 2010 року енергоспоживання знижувалося на 0,3% щорічно, навіть за умов зростання валового внутрішнього продукту (ВВП) на 1,3% на рік.

Середньорічне енергоспоживання на квадратний метр будівель у Європейському Союзі становить орієнтовно 200 кВт·год/м² для всіх типів будівель. Адміністративні будівлі вирізняються значно вищою енергоемністю, яка приблизно на 60% перевищує показники житлового фонду: у середньому це 300 кВт·год/м² порівняно з 160 кВт·год/м² для житлових будівель. Питоме енергоспоживання значно варіюється між країнами-членами ЄС. Наприклад, у таких державах, як Іспанія, споживання на 25% нижче за середнє значення по ЄС, тоді як у Швеції — на 5% більше. Ці відмінності обумовлені кліматичними умовами, інтенсивністю опалення або охолодження приміщень, а також технічними характеристиками будівельних конструкцій та обладнання [19].

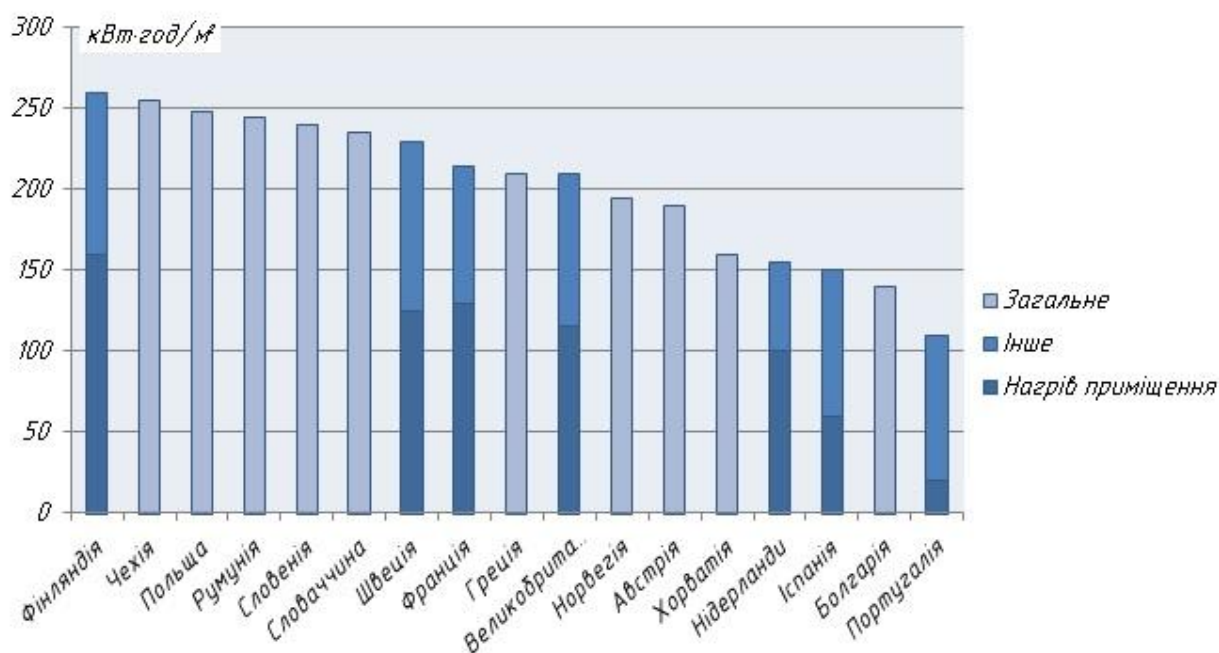


Рисунок 1.9 – Значення витрата енергії для адміністративних будівель

У 2016 році адміністративні будівлі та офісні приміщення в країнах ЄС спожили 160 млн т.н.е., що на 23% перевищило рівень 2000 року. До 2008 року спостерігалось інтенсивне зростання енергоспоживання у цьому секторі — приблизно на 2,7% щороку. Після цього показник стабілізувався та залишався відносно незмінним у наступні роки.

Такі тенденції свідчать про те, що, незважаючи на економічне зростання, у ЄС вдалося досягти значного прогресу в оптимізації використання енергії в будівлях. Це стало можливим завдяки розвитку енергоефективних технологій, застосуванню жорсткіших будівельних стандартів, а також впровадженню програм з модернізації існуючої інфраструктури.

Данія. Загальна площа нежитлового будівельного фонду в Данії становить близько 101 мільйона квадратних метрів, із яких адміністративні будівлі займають приблизно 57%. Потенціал для скорочення енергоспоживання в цих спорудах детально аналізується у звіті «Економія тепла завдяки постійній модернізації будівель до 2050 року».

У рамках дослідження були розглянуті різні сценарії енергозбереження. За сценарієм «business as usual» (звичайний хід справ), щорічне скорочення споживання енергії може досягти 10 554 ТДж до 2050 року, що еквівалентно економії 21,8% від загального енергоспоживання нежитлових будівель. Цей сценарій передбачає, що додаткова теплоізоляція та заміна будівельних компонентів здійснюються тільки в міру їх зношування, а заміна відповідає чинним будівельним стандартам на момент проведення ремонту.

Найбільший потенціал для енергозбереження мають офісні, адміністративні, навчальні та дослідницькі будівлі, особливо ті, які були побудовані до 1960 року. В залежності від року побудови, вони можуть знизити енергоспоживання на 28–34% від початкових показників.

Італія. У будівельному фонді Італії налічується приблизно 1 780 000 нежитлових будівель, які споживають близько третини всієї енергії, що використовується в будівельному секторі країни. При цьому майже 60% цього фонду потребує термінової модернізації, яка включає як функціональні покращення, так і підвищення рівня енергоефективності.

Для оцінки можливостей економії енергії до 2020 року в Італії провели аналіз нежитлових споруд, зокрема офісів та адміністративних будівель. Результати показали, що їх енергоспоживання на 50% перевищує середній показник для аналогічних споруд у регіоні.

Серед адміністративних будівель, які потребують реконструкції або модернізації, площа становить близько 5,5 млн м², що охоплює приблизно 2000 споруд. Проведення їх енергомодернізації дозволяє зменшити споживання енергії до 60%. Це суттєво сприяє досягненню цілей сталого розвитку країни та підвищенню ефективності використання ресурсів [20]

1.3. Аналіз питання підвищення рівня енергоефективності будівель адміністративного призначення

На тлі зростання вартості основних енергоресурсів та значної залежності України від зовнішніх постачальників енергоносіїв, проблема

оптимізації енергоспоживання у будівлях набуває критичної ваги. Зменшення витрат енергії в будівлях як адміністративного, так і виробничого призначення стає необхідним кроком для економії фінансових ресурсів та забезпечення енергетичної незалежності країни.

Сучасний стан багатьох будівель характеризується значними втратами енергії, зумовленими недостатнім рівнем теплоізоляції огорожувальних конструкцій, втратами тепла під час транспортування гарячої води у системах опалення та водопостачання, а також відсутністю ефективних пристроїв контролю та регулювання теплового режиму всередині приміщень.

На сьогодні тепловтрати через зовнішні огорожувальні конструкції в українських будівлях досягають 70% загальних витрат енергії. Для порівняння, у країнах Західної Європи цей показник становить 38-44%, тобто майже удвічі менше. Така різниця зумовлює необхідність впровадження сучасних технологій утеплення, вдосконалення будівельних норм та оптимізації систем опалення і вентиляції.

Окремої уваги потребують будівлі бюджетної сфери та об'єкти комунальної інфраструктури, які мають критичне значення для забезпечення соціальних, економічних і екологічних стандартів послуг. Недостатнє фінансування цих об'єктів та необхідність дотримання стандартів якості вимагають реалізації заходів з енергоефективності як першочергового завдання.

Будівлі залишаються одними з найбільших споживачів енергії. За оцінками експертів, потенціал зниження споживання електроенергії у них сягає 30-40%, у той же час для теплової енергії – до 50%. При цьому основну увагу необхідно приділяти саме скороченню втрат тепла, які можна поділити на кілька основних категорій, зокрема через стіни, вікна, дах та підлогу (рис. 1.10).

У перспективі реалізація енергоефективних заходів у будівлях дозволить не лише скоротити витрати на їх утримання, але й зменшити викиди парникових газів, сприяючи боротьбі зі зміною клімату.

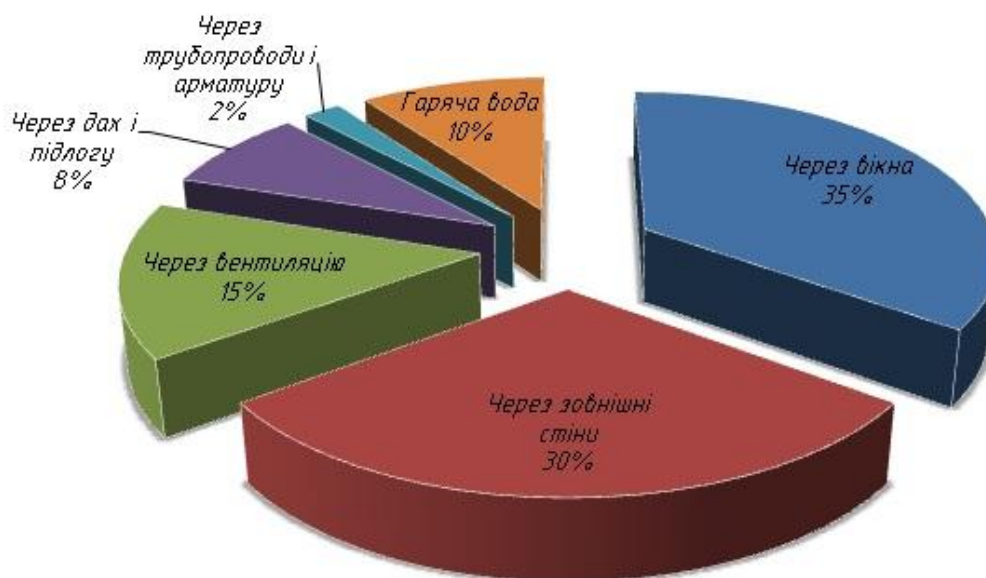


Рисунок 1.10 – Розподіл втрат теплової енергії, споживаної будівлею

Як показано на рис. 1.10, найбільші теплові втрати спостерігаються через віконні конструкції та інші прозорі елементи будівель. Це пов'язано з їх низькою термостійкістю порівняно з непрозорими фасадними матеріалами, які забезпечують кращу теплоізоляцію.

1.4. Сучасний стан проблеми теплових втрат через світлопрозорі огорожувальні конструкції

Враховуючи наведені дані, стає очевидним, що вікна є одним із ключових елементів, на які варто звернути увагу для мінімізації тепловтрат. Дослідження доводять, що значна частина енергетичних витрат адміністративних будівель пов'язана з втратою тепла через віконні конструкції. Окрім цього, додаткове навантаження на системи охолодження спричинене проникненням сонячної радіації всередину приміщень через скло [22-24].

У численних наукових роботах розглядаються енергетичні характеристики вікон, проте більшість із них стосується житлових будівель. Адміністративні будівлі суттєво відрізняються від житлових за кількома важливими параметрами. По-перше, у житлових будинках менший обсяг

внутрішнього енергоспоживання. По-друге, у багатьох випадках житлові споруди не потребують встановлення систем охолодження.

Для адміністративних об'єктів першорядне значення має дослідження взаємозв'язку між дизайном віконних конструкцій, їх технічними характеристиками та енергетичним попитом на опалення й охолодження. Також важливо враховувати вплив вікон на рівень природного освітлення та його рівномірний розподіл у приміщеннях [25].

Енергетичний баланс вікон визначається складною взаємодією теплових потоків і сонячного випромінювання. З одного боку, прозорі елементи сприяють нагріванню приміщення за рахунок сонячної енергії, а з іншого — є джерелом значних тепловтрат. Тому для оцінки їхньої ефективності необхідно враховувати всі ці фактори комплексно.

Інноваційні технології, такі як енергозберігаючі склопакети, багат шарове скло з низькоемісійним покриттям або інтелектуальні вікна з регульованими характеристиками світлопропускання, здатні суттєво знизити енерговитрати. Крім того, оптимізація дизайну фасадів із врахуванням орієнтації будівлі, встановлення зовнішніх жалюзі чи штор для контролю сонячної радіації також можуть покращити енергетичну ефективність адміністративних будівель.

Як показали попередні дослідження, значний потенціал для зниження енергоспоживання можна досягти через оптимізацію огорожувальних конструкцій будівель. Якщо зосередитися на прозорих елементах фасаду, таких як вікна, Вінтер [22] виявив, що загальна енергоспоживаність для опалення, вентиляції, охолодження (HVAC) та освітлення адміністративних будівель у кліматичних умовах Данії коливалася від 96 кВт·год/м² до 73 кВт·год/м². Це залежало від комбінації теплових та оптичних властивостей прозорих елементів фасаду. Мінімальне споживання енергії спостерігалось в разі використання вікон з найкращими теплоізоляційними характеристиками, що поєднувалися з мінімальним сонячним опроміненням і автоматичним

регулюванням освітлення. Водночас у дослідженні Вінтера не було враховано пристрої для затінення, що могло б ще більше знизити енергоспоживання.

У іншому дослідженні, присвяченому принципам проектування фасадів для будівель з майже "нульовим" енергоспоживанням, Тальфельдт та інші [24] з'ясували, що для офісної будівлі в умовах датського клімату, обладнаної стандартними вікнами (з дво- чи трьохкамерними склопакетами), енергетичний баланс будівлі був значно перевищений. Однак після покращення теплоізоляційних властивостей вікон та зменшення рівня ультрафіолетового випромінювання до $0,2-0,3 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$, завдяки вікнам з п'яти- або чотирикамерними склопакетами, тепловтрати суттєво знизилися. В цьому випадку рівень теплоізоляції вікон досяг таких самих значень, як у непрозорих частин фасаду, що дозволило значно зменшити енергоспоживання.

Отже, результати досліджень свідчать, що основна увага при оптимізації прозорих фасадів у холодних кліматичних умовах повинна приділятися покращенню теплотехнічних характеристик вікон. Водночас затінення, хоча й має значення для енергоефективності, не є настільки вирішальним чинником, як підвищення теплоізоляційних властивостей вікон.

Відповідно до досліджень [26], які охоплювали енергоспоживання для опалення та охолодження офісних приміщень, оснащених різними видами сонцезахисних склопакетів. Він досліджував вплив орієнтації кімнати, співвідношення площі скління до площі стін (GWAR) та кліматичних умов на річне енергоспоживання, піковий енергетичний попит та температуру всередині приміщення. Теплопередачу через прозорі та непрозорі елементи фасаду було вирівняно таким чином, щоб середнє значення теплопередачі становило $0,99 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$. Згідно з результатами, для південних та північних фасадів зі 30% GWAR склопакети із значним коефіцієнтом сонячного пропускання ($> 0,6$) забезпечували менше річне споживання енергії порівняно з пакетом середнього коефіцієнта пропускання ($0,4-0,6$). Така ситуація стала можливою завдяки тому, що знижена потреба в опаленні компенсувала

вимоги до охолодження. У той же час для фасадів, орієнтованих на схід і захід, кращими виявилися склопакети з середнім значенням коефіцієнта пропускання сонячного випромінювання.

Також було відзначено, що для південних і північних фасадів з більшим коефіцієнтом пропускання сонячного випромінювання річні енергетичні потреби були нижчими, ніж для фасадів, орієнтованих на схід та захід. Це підтверджує, що для південних і північних фасадів доцільно використовувати більші площі скління або підвищити коефіцієнт затінення. Однак слід зауважити, що дослідження не включало аналіз впливу денного освітлення та його ролі в потребах штучного освітлення, а також не розглядалося питання теплового і візуального комфорту в офісних приміщеннях.

Відповідно до наукових досліджень [25, 27] проведених вченими, які здійснили енергетичне моделювання для різноманітних склопакетів та сонцезахисних систем в адміністративних будівлях, що розташовані в Швеції. Результати їх досліджень демонструють наявність реального потенціалу для зниження енергоспоживання завдяки впровадженню сонячного затінення. Вплив таких систем на енергоефективність будівель значною мірою залежить від площі скління, а також від значення коефіцієнта теплопровідності вікон. Коли теплопровідність зменшується, ефект від сонцезахисту стає менш вираженим. Враховуючи це, в майбутньому будівлі мають застосовувати вікна з ще кращими теплоізоляційними характеристиками, ніж ті, що використовувалися в дослідженні Поіразіса.

В іншому дослідженні, проведеному для адміністративних будівель в місті Uccle, Бельгія [28], автори описали параметричні дослідження ключових факторів, які впливають на енергоефективність офісних будівель. В результаті вони зробили кілька важливих висновків для оптимізації таких споруд:

- необхідно ретельно утеплювати будівлю та забезпечувати її високий рівень герметичності;
- слід обмежувати та контролювати споживання енергії всередині будівлі;

- важливо продумати оптимальні розміри вікон і їх розташування на фасаді;

- необхідно гарантувати наявність ефективної вентиляційної системи;

- потрібно усунути фактори теплової інертності, що можуть знижувати енергоефективність будівлі.

Загалом, досліджувана будівля мала недостатньо утеплення, з товщиною ізоляції від 7 до 10 см на непрозорих частинах фасаду, що значно нижче за рекомендовані норвезькими стандартами (20-40 см). Це значить, що для виконання сучасних будівельних норм [29] або досягнення рівня пасивного будинку [30], необхідно значно підвищити рівень теплоізоляції.

Вікна виконують кілька ключових функцій у будівлях:

- забезпечують природне освітлення;

- сприяють інсоляції приміщень;

- створюють комфортні умови для перебування людей.

Кліматичні умови мають значний вплив на вибір теплоізоляційних характеристик світлопрозорих конструкцій. У холодних регіонах вікна повинні забезпечувати високу теплоізоляцію та пропускати сонячну енергію, щоб максимально ефективно використовувати природне опалення. Водночас у теплих кліматах вікна повинні мати теплозахисні властивості, що знижують потребу в охолодженні будівель.

Коли йдеться про тепловтрати через віконні конструкції, слід розглядати три основні компоненти віконних конструкцій: переплетіння, скління та монтажні вузли. При проєктуванні віконних установок важливо уникати утворення так званих "мостиків холоду", які можуть значно знизити енергоефективність.

Для обрамлення світлопрозорих конструкцій використовують різноманітні матеріали — дерев'яні, полівінілхлоридні, алюмінієві, сталеві, склопластикові та комбіновані, кожен з яких має свої особливості щодо конструкції та теплотехнічних властивостей. Одним із найбільш популярних варіантів для скління є багатокамерні склопакети.

У дослідженні [31] було проаналізовано температурні показники на різних ділянках внутрішньої поверхні віконного блоку за умов низьких зовнішніх температур. Виявилося, що температура на віконному профілі завжди вища, ніж на самому склопакеті. Профіль займає приблизно 30% площі віконного блоку, а решта 70% припадає на склопакет. Однак у структурі вартості віконної конструкції частка склопакета не перевищує 30%. Таким чином, ефективне зниження тепловтрат через вікно можна досягти, використовуючи високоякісні склопакети.

Основним параметром, що визначає енергетичну ефективність вікон, є опір теплопередачі. В Україні для зниження тепловтрат використовують такі способи поліпшення характеристик склопакетів:

1. Збільшення кількості камер (перехід від однокамерного до двокамерного чи трикамерного скла) та їх товщини.
2. Використання енергозберігаючих скла (наприклад, К-скло або І-скло).
3. Заповнення простору між стеклами інертними газами, такими як аргон, криптон чи ксенон.

Енергозберігаюче (низькоемісійне) скло має спеціальне покриття, яке дозволяє проходити короткохвильовому сонячному випромінюванню в приміщення, але блокує довгохвильове теплове випромінювання, яке виходить з приміщення, зокрема від опалювальних приладів. Такий підхід допомагає зменшити теплові втрати. Показник енергозбереження скла визначається його випромінювальною здатністю, яка характеризується здатністю відбивати теплові хвилі з довжиною хвилі менше 16 000 нм. У звичайного скла цей показник складає $E = 0,83$, тоді як у енергоефективного скла він менший за 0,04. Тому чим нижчий коефіцієнт емісії поверхні, тим менші теплові втрати.

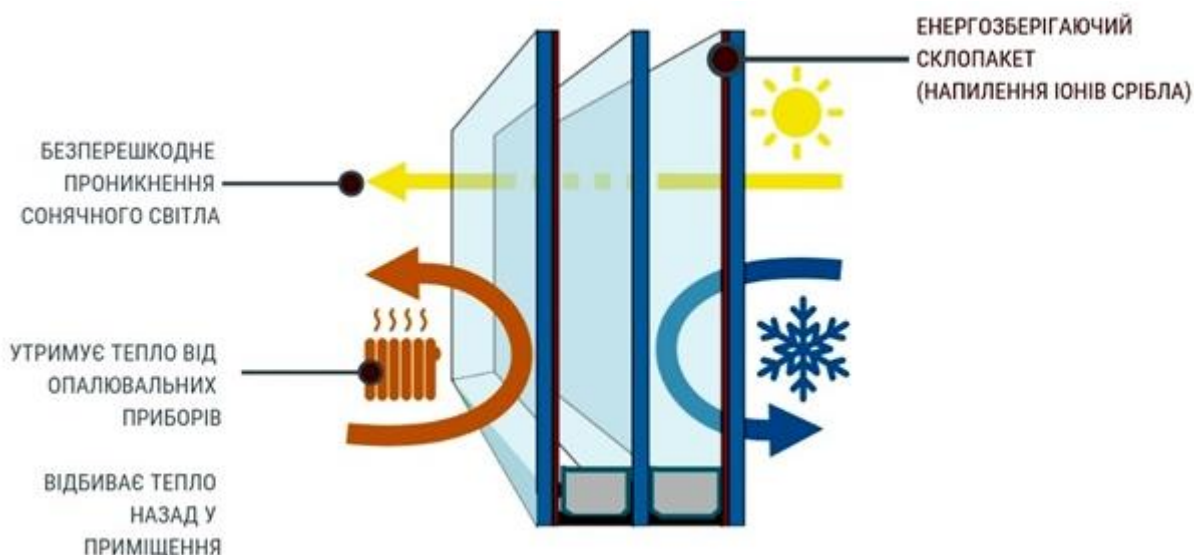


Рисунок 1.11 – Конструктивна схема вікна із енергозберігаючого скла

Причина виникнення випромінювання полягає в русі вільних електронів атомів на поверхні скла, а також у густині електронів, які переміщуються. Важливо зазначити, що не всі метали, які є хорошими провідниками електричного струму, мають властивість відбивати довгохвильове теплове випромінювання.

Наразі для цих цілей застосовуються два основних типи покриттів: *K*-скло, яке має "тверде" покриття, та *I*-скло, що характеризується "м'яким" покриттям.

K-скло отримує свої енергозберігаючі властивості завдяки хімічному процесу, що проходить при високих температурах (піроліз), у результаті якого на поверхні скла формується тонкий шар оксидів металів, таких як InSnO_2 . Цей шар прозорий, але водночас має електропровідність, що дозволяє йому ефективно відбивати теплове випромінювання. *K*-скло має емісійний коефіцієнт $E = 0,2$, що дозволяє йому знижувати теплові втрати.

I-скло, у свою чергу, виготовляється за допомогою вакуумного напилення, що утворює багатошарову структуру, що складається із чергуваних шарів срібла і діелектричних матеріалів, таких як BiO , AlN або TiO_2 . Завдяки такій конструкції *I*-скло має емісійний коефіцієнт $E = 0,04$, що забезпечує значно кращу теплоізоляцію.

Заповнювач камер склопакетів також має важливий вплив на їх теплоізоляційні характеристики. Склопакети із внутрішнім наповненням сухим повітрям, мають значно менші теплоізоляційні властивості порівняно з тими, що заповнені інертними газами. Інертні гази, такі як аргон, криптон або ксенон, мають набагато нижчу теплопровідність у порівнянні з повітрям, що зменшує втрати тепла через віконні конструкції. Крім того, інертні гази мають вищу густину, що зменшує конвекційні потоки всередині склопакету, тим самим підвищуючи ізоляційні характеристики. Тому, завдяки використанню інертних газів у склопакетах, теплоізоляція значно поліпшується.

У табл.1.1. подані характеристики повітря та інертних газів, якими зазвичай наповнюють склопакети.

Таблиця 1.1 – Характеристики повітря і інертних газів

№ з/п	Назва	Густина ρ , кг/м^3	Теплопровідність λ , $\text{Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$
1	Елегаз (SF_6)	6,18	0,01360
2	Ксенон	5,857	0,00520
3	Криптон	3,738	0,00870
4	Аргон	1,781	0,01630
5	Повітря	1,291	0,02410

У галузі теплопередачі та енергоефективності світлопрозорих огорожувальних конструкцій існує велика кількість наукових публікацій і статей, що висвітлюють різні аспекти цієї теми. Особливу увагу заслуговують роботи вітчизняних дослідників, таких як Марущак У.Д. [34], Білоус О.М. [33] та Міщенко Р.А. [35], які зробили значний внесок у розвиток цієї галузі.

Існуючі методи оцінки теплотехнічних властивостей існуючих світлопрозорих огорожувальних конструкцій проаналізовані в статті [36], де запропоновано комплексний підхід для розрахунку фактичного значення приведенного опору теплопередачі віконного блоку. Цей метод ґрунтується на

визначенні середньої температури внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції та, відповідному, фактичному коефіцієнта тепловіддачі, що дозволяє досягти високої точності та врахувати термічну неоднорідність. У роботі [37] проведено аналіз різних способів підвищення опору теплопровідності пакетів. Характерні залежності теплового опору від різних факторів, таких як кут нахилу вікна, геометрія скління, селективне покриття скла і властивості газового заповнення, були досліджені в [38, 39].

Одним із ефективних способів підвищення теплової ефективності світлопрозорих огорожувальних конструкцій є усунення містків холоду в зонах стиків стін і вікон, а також в місцях з'єднання скління з переплетом і відкосами. Варіанти конструктивних рішень, спрямовані на зниження тепловтрат у цих зонах, представлені в роботах [40, 41].

Існує багато типів енергоефективних склопакетів, огляд яких можна знайти в публікації [42]. Особливу увагу слід звернути на роль газових прошарків у склопакетах, таких як товщина, кількість і тип заповнювачів. Вони значною мірою впливають на теплотехнічні характеристики вікон. Дослідження конвективного та променевого теплообміну в газонаповнених прошарках склопакета проведено в роботах [38, 43-45].

Нанесення низько-емісійних покриттів на скло є ефективним методом зменшення теплових втрат через світлопрозорі конструкції. Вплив таких покриттів на температуру скла та його опір теплопередачі детально розглянуто в роботі [43].

Також заслуговують уваги "розумні вікна", які здатні регулювати інтенсивність сонячного потоку, що потрапляє в приміщення. Огляд таких технологій наведено в публікації [46].

Загальний літературний огляд дозволив сформулювати уявлення про стан сучасних досліджень у цій сфері, виявити найбільш розвинені напрямки та вказати на питання, які потребують подальшого вивчення. Значна увага приділяється конструкціям з наявними тепло відбиваючими екранами та склопакетам з низько-емісійним покриттям. Однак, аналіз наявних публікацій

показав, що питання варіативності опору теплопередачі склопакетів в залежності від зовнішньої температури залишаються недостатньо висвітленими. Багато авторів не ставили мету оптимізації конструкцій склопакетів з точки зору енергозбереження та економічної ефективності, що робить це питання надзвичайно актуальним для подальших досліджень.

Висновки до розділу 1

1. Адміністративні будівлі, займають значну частку в загальному енергоспоживанні, що складає близько 40%. При цьому втрати енергії в таких будівлях є суттєвими та потребують особливої уваги для підвищення ефективності використання ресурсів.

2. Аналіз поточної ситуації з енергоефективністю в Україні виявив нераціональне використання енергетичних ресурсів. Рівень енергетичної залежності перевищує 50%, що є значно вищим, ніж у країнах ЄС і більшості інших розвинутих держав, де цей показник є набагато нижчим.

3. Оцінка енергоефективності адміністративних будівель в Україні показала, що основні тепловтрати через огорожувальні конструкції складають близько 70%, у той час як у країнах з розвинутою економікою цей показник варіюється від 38% до 44%. Однак існує великий потенціал для зниження цих втрат, що може досягати 50%.

4. Детальний аналіз теплових втрат у будівлях вказує на те, що найбільші енергетичні втрати виникають через світлопрозорі огорожувальні конструкції фасадів, зокрема через склопакети, які складають 35% від загальних втрат енергії. Тому зменшення втрат через ці елементи є ключовим напрямком для покращення енергоефективності будівель.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СВІТЛОПРОЗОРИХ КОНСТРУКЦІЯХ

Світлопрозорі огорожувальні елементи виконують подвійну функцію: забезпечують природне освітлення та створюють тепловий бар'єр між внутрішнім простором будівлі (з температурним режимом t_e , °C) та зовнішнім середовищем (з показником t_z , °C). У кліматичних умовах України критично важливим аспектом проєктування таких конструкцій є їхня ефективність у холодний період року. Ключовим параметром оцінки теплозахисних властивостей виступає коефіцієнт опору теплопередачі (R).

Враховуючи, що впродовж опалювального сезону температурний градієнт ($t_e - t_z$) має додатне значення, формується напрямлений тепловий потік з приміщення назовні. Механізми передачі теплової енергії реалізуються через теплопровідність матеріалів, конвективний теплообмін та променеве випромінювання. У світлопрозорих конструкціях спостерігається симбіоз усіх трьох механізмів теплопереносу. Проте для коректного інженерного розрахунку необхідно аналізувати кожен процес окремо, оскільки вони підпорядковуються різним фізичним закономірностям.

2.1. Фундаментальні аспекти теплопередачі та її різновиди у світлопрозорих огорожувальних системах

Для розробки ефективних стратегій енергозбереження важливо чітко розуміти природу тепловтрат. Під терміном "тепловтрати" розуміють кількісну характеристику теплової енергії, яка втрачається через огорожувальні елементи будівельної конструкції внаслідок теплопередачі.

У спрощеному трактуванні, при низьких зовнішніх температурах виникають теплові потоки, спрямовані з опалюваного приміщення назовні. Інтенсивність цього теплового транспорту визначає рівень енергетичних втрат будівлі. Сам процес переносу теплової енергії називається теплопередачею.

Теплопередача у світлопрозорих конструкціях здійснюється трьома основними механізмами:

- конвективним теплообміном між поверхнями та повітряними масами;
- теплопровідністю через твердотільні компоненти конструкції;
- променевим теплообміном між поверхнями різної температури.

Важливо підкреслити, що в реальних умовах експлуатації світлопрозорих конструкцій всі три механізми теплопередачі діють одночасно та взаємопов'язано. Розглянемо детальніше особливості кожного з них.

Конвективний теплообмін. Конвективний теплоперенос являє собою процес транспортування теплової енергії потоками рухомого середовища (рідини або газу). У контексті склопакетних конструкцій цей механізм реалізується через природну циркуляцію газового наповнення між скляними поверхнями.

Фізика процесу базується на температурно-залежній зміні густини газу. Шар газу, що контактує з теплішою внутрішньою поверхнею склопакета, нагрівається, зменшує свою густину та підіймається вгору. Одночасно охолоджений газ біля зовнішньої поверхні, маючи більшу густину, опускається донизу. Така циркуляція створює замкнений конвективний потік, що інтенсифікує теплові втрати.

Для мінімізації конвективного теплопереносу сучасні технології пропонують заповнення міжскляного простору інертними газами з підвищеною молекулярною масою та зниженою теплопровідністю. Найефективнішими є аргон, криптон, ксенон та елегаз, які суттєво перевершують повітря за теплоізоляційними властивостями.

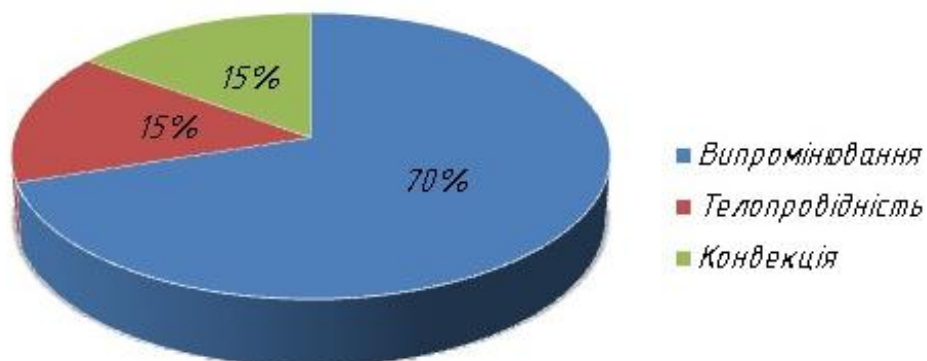
Теплопровідний механізм. Теплопровідність характеризує здатність матеріалу проводити теплову енергію через свою структуру та кількісно описується коефіцієнтом теплопровідності. У склопакетних системах найбільші втрати через теплопровідність пов'язані з наявністю термічних мостів.

Термічним мостом традиційно виступає алюмінієва дистанційна рамка, яка забезпечує герметичність склопакета. Сучасні інженерні рішення передбачають заміну металевої рамки на термічно оптимізовані полімерні композити. Додатково ефективність теплоізоляції підвищується впровадженням багатокамерних профільних систем з теплоізоляційними вставками.

Променевий теплообмін. Цей вид теплопередачі реалізується через інфрачервоне випромінювання від об'єктів з вищою температурою. Сонячна радіація є домінуючим джерелом такого випромінювання, хоча всередині приміщень значний внесок можуть давати опалювальні прилади та нагріті поверхні.

Технологічним рішенням для зменшення променевих тепловтрат служить застосування енергоефективного скла (І-скла) з селективним покриттям. Більш досконалі мультифункціональні склопакети здатні диференційовано контролювати як довгохвильову, так і короткохвильову складові інфрачервоного спектру.

Експериментальні дослідження демонструють, що у типовому вертикальному однокамерному склопакеті з повітряним заповненням тепловтрати розподіляються між усіма трьома механізмами теплопередачі, причому їх відносний внесок залежить від конкретних умов експлуатації (рис. 2.1).



Графік 2.1 - Розподіл механізмів теплопереносу в однокамерній склопакетній системі з повітряним заповненням при вертикальному монтажі

На представленій діаграмі візуалізовано співвідношення тепловтрат через різні механізми теплопередачі у стандартному однокамерному склопакеті з вертикальною орієнтацією. Згідно з експериментальними даними, найбільший внесок у загальний тепловий потік забезпечує променевий теплообмін, що складає приблизно 70% від сумарних втрат. Конвективні процеси відповідають за близько 15% тепловтрат, тоді як прямий теплопровідний перенос через матеріали конструкції становить приблизно 15% загального теплового потоку. Такий розподіл підкреслює важливість застосування селективних покриттів для мінімізації радіаційної складової теплопереносу як найбільш значущого фактора енергетичних втрат.

2.2. Нормативні вимоги до теплотехнічних характеристик віконних конструкцій

Сучасні будівельні норми встановлюють комплексний підхід до оцінки теплоізоляційних властивостей огорожувальних конструкцій будівель. Відповідно до актуальних нормативних документів [47], система теплового захисту повинна задовольняти три фундаментальні критерії:

1. Компонентний критерій: фактичний приведений опір теплопередачі кожного конструктивного елемента має перевищувати нормативно встановлені мінімальні значення.

2. Інтегральний критерій: загальна теплозахисна характеристика будівлі, що враховує сукупний вплив усіх огорожувальних конструкцій, повинна бути нижчою за встановлений нормативний показник.

3. Гігієнічний критерій: температурний режим внутрішніх поверхонь конструктивних елементів має підтримуватися вище критичного рівня для запобігання утворенню конденсату та забезпечення комфортних умов перебування.

Важливо підкреслити, що відповідність будівлі сучасним теплотехнічним стандартам досягається виключно при одночасному дотриманні всіх трьох вищезазначених критеріїв. Для світлопрозорих

конструкцій розрахунковий опір теплопередачі повинен відповідати нормативам, встановленим з урахуванням кліматичного районування території будівництва згідно з додатком В документа [47].

Математична модель для визначення нормативного значення опору теплопередачі віконного блоку ($R_{\text{в}}^{\text{норм}}$, (м²·°C)/Вт) виражається:

$$R_{\text{в}}^{\text{норм}} = R_{\text{в}}^{\text{необ}} \cdot m_p, \quad (2.1)$$

де $R_{\text{в}}^{\text{необ}}$ - представляє базовий необхідний опір теплопередачі;

m_p - виступає регіональним коефіцієнтом корекції.

Для міста Кропивницький, що розташоване в першій кліматичній зоні України, базове значення опору теплопередачі ($R_{\text{в}}^{\text{необ}} =$) встановлено на рівні 0,9 (м²·°C)/Вт згідно з таблицею 3 нормативного документа [47].

2.3. Методологічні основи визначення ефективного термічного опору віконних конструкцій

Оцінка теплоізоляційних характеристик світлопрозорих елементів будівлі може здійснюватися двома шляхами: аналітичним розрахунком відповідно до методології, викладеної в нормативному документі [47], або експериментальним шляхом через випробування у сертифікованих лабораторних умовах.

При використанні розрахункового методу ключовим параметром виступає коефіцієнт теплопередачі, нормативні значення якого регламентуються додатком К документа [48].

Сумарний тепловий потік ($Q_{\Sigma}^{\text{бл}}$, Вт) через віконну конструкцію визначається комплексним рівнянням:

$$Q_{\Sigma}^{\text{бл}} = Q_{\text{пер}} + Q_{\text{скл}} + \Delta Q_{\text{кр}}^{\text{скл}} \quad (2.2)$$

де складові рівняння представляють:

- $Q_{пер}$ - тепловий потік через профільну систему (віконну раму);
- $Q_{скл}$ - тепловтрати через склопакетну частину конструкції;
- $\Delta Q_{кр}^{скл}$ - додатковий тепловий потік через термічні мости на межі контакту рами та склопакета.

Особливу увагу слід приділити феномену підвищеної теплопередачі у крайових зонах, де відбувається з'єднання різнорідних матеріалів віконної рами та склопакета. Ці ділянки характеризуються інтенсифікованим теплопереносом через формування локальних термічних мостів.

Візуалізація розподілу теплових потоків через структурні елементи віконного блоку з акцентом на крайові зони представлена на схематичному зображенні (рис. 2.2).

Розуміння особливостей теплопереносу через різні компоненти віконної конструкції дозволяє оптимізувати її теплоізоляційні характеристики шляхом вдосконалення конструктивних рішень та вибору відповідних матеріалів.

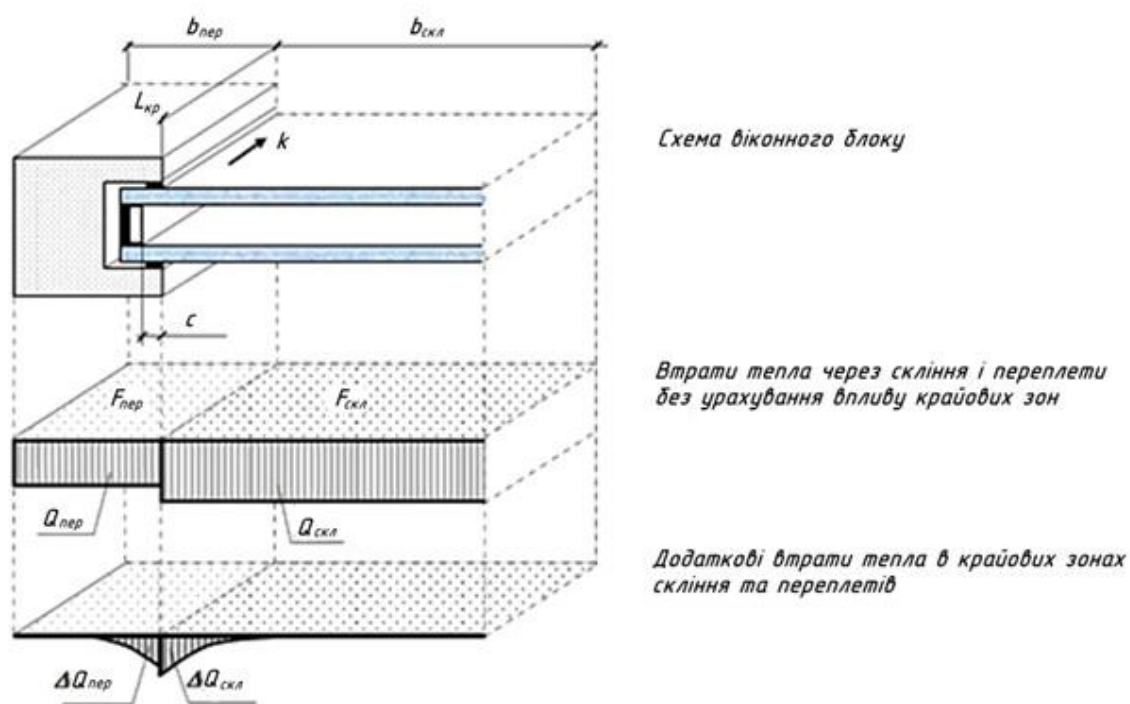


Рисунок 2.2 - Топологія теплових полів у конструктивних елементах віконної системи

На рис.2.2 візуалізовано характер розподілу теплових потоків у різних компонентах віконної конструкції. Діаграма демонструє три ключові зони теплопереносу:

1. центральну область склопакета з рівномірним тепловим полем;
2. профільну систему (віконну раму) з підвищеною теплопровідністю;
3. критичні ділянки на стику рами та склопакета, де формуються локальні термічні мости.

Особливу увагу приділено візуалізації крайових зон - областей підвищеної теплопередачі на межі контакту різних конструктивних елементів. У цих зонах спостерігається інтенсифікація теплового потоку внаслідок складної геометрії з'єднання та різниці теплофізичних властивостей матеріалів. Розуміння топології теплових полів дозволяє оптимізувати конструктивні рішення для мінімізації локальних тепловтрат.

Алгоритм визначення зведеного термічного опору світлопрозорих конструкцій

Нормативний документ [49] встановлює чіткий регламент розрахунку теплотехнічних характеристик світлопрозорих конструкцій при стандартизованих температурних режимах. Процедура обчислення включає два основні етапи:

Етап 1. Комп'ютерне моделювання теплофізичних параметрів.

За допомогою спеціалізованого програмного забезпечення визначається термічний опір наступних функціональних елементів (рис. 2.3):

- основної площини склопакетної системи;
- периферійних ділянок склопакета;
- імпостів та інших конструктивних розділювачів;
- зон термічного контакту склопакета з розділювачами;
- елементів віконної рами (коробки та стулок).

Етап 2. Геометричний аналіз компонентів.

Здійснюється прецизійний розрахунок площ конструктивних елементів з точністю до 0,001 м²:

а) Ефективна площа засклення розраховується як загальна видима площа склопакета за вирахуванням периметральних смуг шириною d вздовж рамних елементів та розділювачів;

б) Площа конструктивних розділювачів визначається як їхня ортогональна проекція на площину віконної конструкції;

в) Периметральна зона обчислюється як добуток нормативної ширини d на довжину контуру примикання склопакета до рамних елементів;

г) Зона спряження з розділювачами розраховується через множення довжини периметра розділювача на нормативну ширину крайової зони d ;

д) Площа рамної конструкції визначається сумуванням проекцій усіх профільних елементів на фронтальну площину вікна.

Такий структурований підхід забезпечує точну оцінку теплотехнічних властивостей віконної системи з урахуванням специфіки теплопередачі через кожен конструктивний компонент.

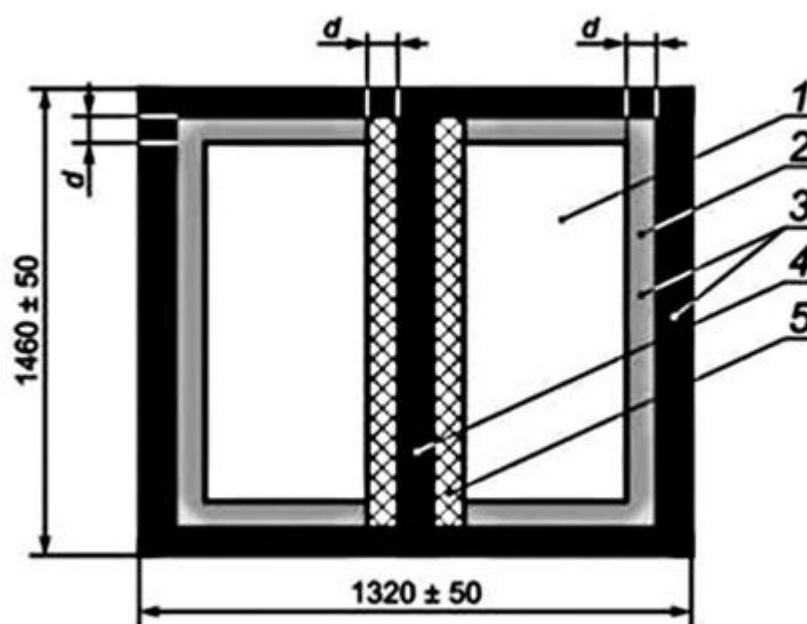


Рисунок 2.3 - Топографія теплотехнічних зон світлопрозорої конструкції стандартного розміру (фронтальна проекція)

На схематичному зображенні представлено функціональне зонування віконного блоку з позначенням ключових розрахункових областей:

Зона 1: Центральна область склопакета - характеризується рівномірним розподілом теплового поля та стабільними теплофізичними параметрами;

Зона 2: Периметральна смуга застління - критична область підвищеного теплопереносу на межі контакту склопакета з рамною конструкцією;

Зона 3: Профільна система - включає комплекс конструктивних елементів коробки та стулки, що формують периметр віконного блоку;

Зона 4: Силовий розділювач (імпост) - вертикальний елемент жорсткості, що розділяє світлопрозору площину на функціональні сегменти;

Зона 5: Зона термічного контакту - область інтенсифікованого теплообміну в місці спряження склопакета з імпостом.

Представлена схема є базовим інструментом для розрахунку теплотехнічних характеристик віконної конструкції з урахуванням особливостей теплопередачі через кожен функціональну зону.

Зведений опір теплопередачі для зовнішніх огорожувальних конструкцій (світлопрозорих) визначається за допомогою такої формули:

$$R_{\text{пр}} = \frac{F_{\text{сп}} + \sum_{i=1}^n F_i}{\frac{F_{\text{сп}}}{R_{\Sigma\text{сп}}} + \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{R_{\Sigma i}} + \sum_{j=1}^m k_j L_j}, \quad (2.3)$$

Де $R_{\Sigma\text{сп}}$ — приведений опір теплопередачі, який залежить від характеристик склопакетів, таких як відстань між шарами скла, типу газонаповнення;

$F_{\text{сп}}$ — площа світлопрозорої частини конструкції в квадратних метрах;

$R_{\Sigma i}$, F_i — значення опору теплопередачі та власне площа i -го непрозорого елемента конструкції;

n — загальна кількість непрозорих елементів конструкції з визначеними значеннями $R_{\Sigma i}$, F_i ;

k_j — значення лінійного коефіцієнта теплопередачі для j -го елемента конструкції (теплопровідного включення), що обчислюється на основі двовірних або тривірних температурних полів згідно з [7], або за даними [8];

L_j — значення лінійного розміру j -го елемента конструкції, виміряний в метрах;

m — загальна кількість непрозорих елементів конструкції.

На рисунку 2.4 зображено схеми для розрахунку площі скління, переплетів і розмірів крайових зон віконних блоків для різних конструктивних варіантів.

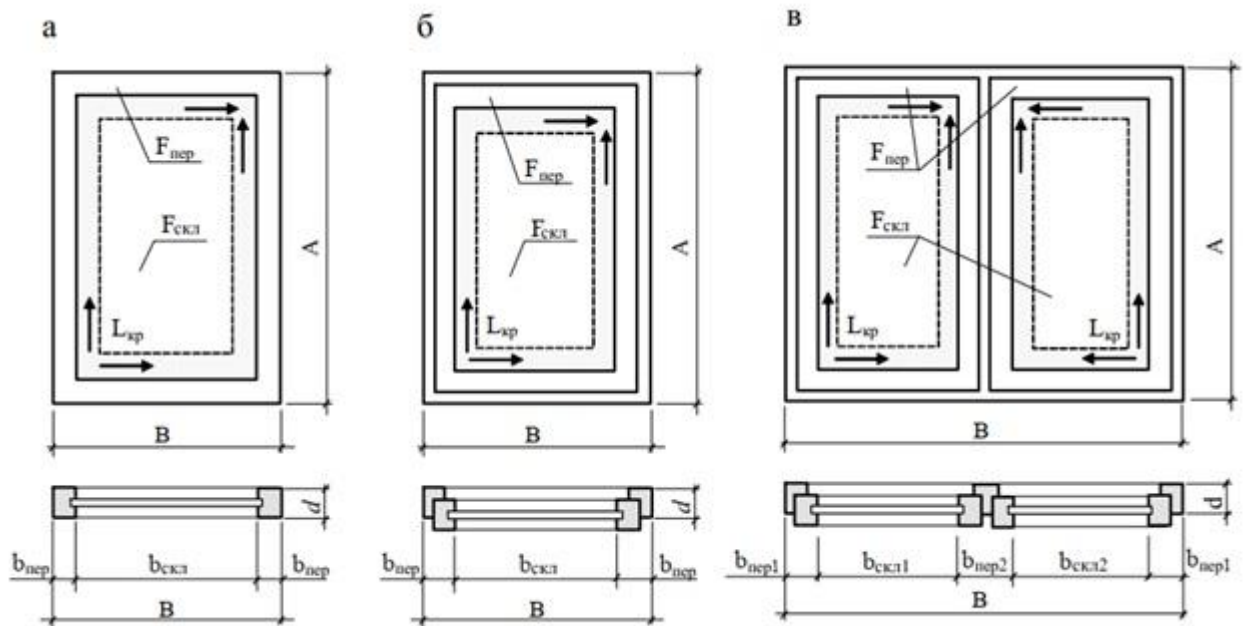


Рисунок 2.4 — Схеми для розрахунку площ скління, переплетів та габаритів крайових зон віконних блоків з різними конструктивними рішеннями.

2.4. Залежність теплопередачі склопакету від кліматичних особливостей регіону

Як зазначено раніше, вибір склопакету повинен здійснюватися з урахуванням конкретних кліматичних умов регіону. Процес підбору можна здійснювати як за допомогою доступної програми Window 7.7, так і шляхом проведення ручного розрахунку. В Україні діє національний стандарт ДСТУ [50], який містить методику визначення опору теплопередачі центральної частини склопакету, що узгоджена з міжнародним стандартом ISO 15099.

Відповідно до [50], проєктні значення опору теплопередачі R та коефіцієнта теплопередачі U (що позначаються як R_d і U_d) повинні визначатися з урахуванням місцевих кліматичних умов, географічних характеристик та інших факторів. Граничні умови для розрахунку обираються так, щоб температура зовнішнього повітря відповідала температурі холодної п'ятиденки з ймовірністю 0,92, а середня швидкість вітру відповідала значенню середньої швидкості за період з середньою добовою температурою $\leq 8^\circ\text{C}$ згідно з [50].

Згідно з вищезгаданим стандартом, опір теплопередачі центральної частини склопакету обчислюється за наведеними формулам.

Величину опору теплопередачі центральної частини склопакету ($R_{цз}$, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$) можна визначити за формулою:

$$R_{цз} = \frac{1}{U} = \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_t} + \frac{1}{h_i}, \quad (2.4)$$

де h_e і h_i — коефіцієнти теплообміну з зовнішнього та внутрішнього середовища ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$); h_t — коефіцієнт загального теплопередачі скління ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$).

Загальний термічний опір ($1/h_t$) можна розрахувати за формулою:

$$\frac{1}{h_t} = \sum_1^N \frac{1}{h_s} + \sum_1^M d_j \cdot r_j, \quad (2.5)$$

де h_s — коефіцієнт теплопередачі кожного газового проміжку ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$); N — кількість газових проміжків; d_j — товщина кожного шару скла (м); r_j — термічний опір матеріалу кожного шару скла, $\text{м} \cdot \text{К}/\text{Вт}$ (для натрій-кальцієвого скла термічний опір становить $1,0 \text{ м} \cdot \text{К}/\text{Вт}$); M — кількість матеріальних шарів.

Аналіз цієї формули дозволяє зробити висновок, що при однаковій конструкції склопакету та матеріалах величина загального термічного опору залежить від коефіцієнта теплопередачі газового проміжку h_s , який можна визначити за:

$$h_s = h_r + h_g, \quad (2.6)$$

де h_r – коефіцієнт термічного випромінювання ($\text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$);

h_g – коефіцієнт теплопередачі газу в проміжку ($\text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$).

Коефіцієнт термічного випромінювання h_r розраховується за формулою:

$$h_r = 4 \cdot \sigma \cdot \left(\frac{1}{\xi_1} + \frac{1}{\xi_2} - 1 \right)^{-1} \cdot T_m^3, \quad (2.7)$$

де $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$, $\text{Вт/м}^2\cdot\text{К}^4$ — значення сталої Стефана-Больцмана;

T_m — середня абсолютна температура газового проміжку (К);

ξ_1 і ξ_2 — коригуючі коефіцієнти емісії для огорожувальних поверхонь при температурі T_m . Для звичайного натрій-кальцієвого скла без покриття або з покриттями, що не впливають на коефіцієнт емісії, значення $\xi_1 = \xi_2 = 0,837$.

Коефіцієнт теплопередачі газу h_g розраховується за формулою:

$$h_g = Nu \cdot \frac{\lambda}{s}, \quad (2.8)$$

де s — ширина газового проміжку (м); λ — теплопровідність газу ($\text{Вт/м}\cdot\text{К}$);

Nu — число Нуссельта.

Число Нуссельта для вертикального скління розраховується за формулою:

$$Nu = 0,035 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,38}, \quad (2.9)$$

де Gr — значення числа Грасгофа; Pr — значення числа Прандтля, котрі в свою чергу визначають:

$$Gr = \frac{9,81 \cdot s^3 \cdot \Delta T \cdot \rho^2}{T_m \cdot \mu^2}, \quad (2.10)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c}{\lambda}, \quad (2.11)$$

де ΔT — різниця температур між поверхнями скла, що обмежують газовий проміжок (К); ρ — значення густини газу (кг/м³); μ — значення динамічної в'язкості газу (кг/м·с); c — значення питомої теплоємності газу (кДж/кг·К); T_m — значення середньої температури газового проміжку (К).

Згідно з [50], якщо значення Nu виявляється меншим за 1, в такому випадку у формулі (2.9) значення Nu приймається за 1.

2.5. Оптимізація характеристик склопакетів за допомогою методу математичного планування експерименту

Експеримент є основою більшості наукових досліджень, що можуть проводитися в різних умовах, таких як виробничі підприємства, лабораторії, дослідницькі поля або спеціальні ділянки. Він може бути як фізичним, так і психологічним чи модельним. Експерименти можуть проводитися безпосередньо на реальному об'єкті або на його моделі, яка, як правило, відрізняється від оригіналу масштабом або іншими характеристиками. Головна вимога до таких моделей — це забезпечення достатньо точного відображення реальних умов об'єкта дослідження.

В останні роки, поряд із традиційними фізичними моделями, все більш популярними стають абстрактні математичні моделі, що дозволяють аналізувати складні процеси без потреби в реальних фізичних експериментах. Зокрема, планування експериментів нерозривно пов'язане з розробкою і тестуванням математичних моделей об'єктів, що досліджуються [51].

Планування експериментів — це сукупність методів математичної статистики, які дозволяють ефективно розробляти експерименти,

налаштовувати вимірювання та здійснювати дослідження залежностей між різними параметрами. Метою цього методу є не лише оцінка впливу конкретних факторів на досліджуваний процес, але й пошук оптимальних значень параметрів, які визначають найкращий результат або поведінку цього процесу. В більшості випадків для проведення експериментів достатньо розглядати два рівні змінюваних факторів. Проте, для більш складних ситуацій, коли вплив факторів не є лінійним, часто потрібно застосовувати більш ніж два рівні для врахування нелінійних ефектів, таких як квадратичні або взаємодійні впливи між змінними.

Для детального опису об'єкта дослідження зручно використовувати концепцію кібернетичної системи, яка представлена схематично на рис. 2.5. Таку схему інколи називають «чорним ящиком». Стрілки, що виходять з правої частини, символізують різноманітні характеристики цілей дослідження (y), які є параметрами оптимізації. У науковій літературі ці параметри можуть бути позначені й іншими термінами, такими як критерії оптимізації або цільові функції.

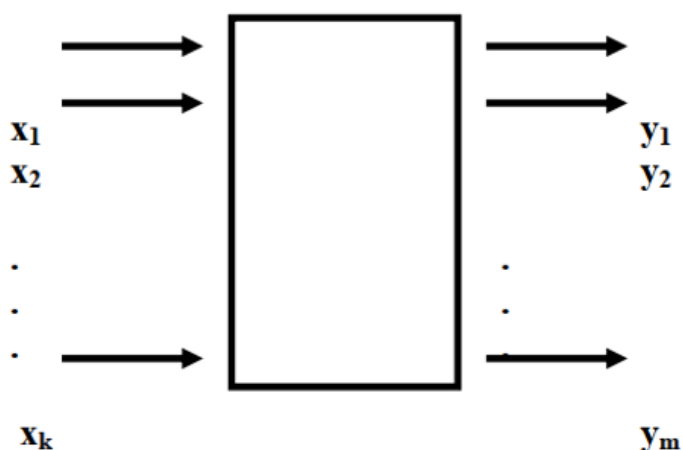


Рисунок 2.5 – Схема процесу оптимізації об'єкта дослідження

Для успішного проведення експерименту необхідно мати можливість впливати на функціонування «чорного ящика». Усі методи цього впливу (x) називаються факторами, і саме їх варіативність дає змогу регулювати результат дослідження. При цьому, для вирішення завдань зазвичай

використовують математичну модель, яка описує залежність між параметром оптимізації та факторами впливу. Це можна виразити за допомогою рівняння:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2.12)$$

де $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ — функція відгуку, що відображає вплив факторів на результат.

Кожен фактор у ході експерименту може приймати одне з декількох значень. Ці значення називаються рівнями факторів. Для зручності побудови «чорного ящика» та проведення експерименту фактори зазвичай мають обмежену кількість дискретних рівнів. Визначений набір рівнів для кожного фактора визначає конкретний стан «чорного ящика» та умови проведення окремого експерименту. Якщо ж розглянути всі можливі комбінації рівнів факторів, то отримаємо множину різних станів «чорного ящика», що відповідатиме числу можливих варіантів експериментів.

Кількість можливих експериментів можна обчислити за формулою:

$$N = p^n, \quad (2.13)$$

де N — це загальна кількість експериментів; p — кількість рівнів для кожного фактора; n — кількість факторів, що беруть участь у дослідженні.

Повний факторний експеримент типу 2^n

Перший етап планування експерименту для створення лінійної моделі базується на змінюванні параметрів на двох рівнях. На цьому етапі, знаючи кількість факторів, можна визначити кількість експериментів, необхідних для реалізації всіх можливих комбінацій рівнів факторів.

Експеримент, в якому реалізовані всі варіанти сполучень рівнів факторів, називають повним факторним експериментом (ПФЕ). У випадку, коли кількість факторів дорівнює двом, такий експеримент є ПФЕ типу $2n$.

Умови експерименту зручно представити у вигляді таблиці, яка отримала назву матриця планування експерименту. Матриця для двох факторів наведена в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Матриця планування експерименту 2^2

Номер з\п	y	x_1	x_2
1	y_1	+1,0	+1,0
2	y_2	-1,0	+1,0
3	y_3	+1,0	-1,0
4	y_4	-1,0	-1,0

Кожен стовпець матриці планування можна розглядати як вектор-стовпець, а кожен рядок як вектор-рядок. Таким чином, в табл.2.1 присутні два вектор-стовпці незалежних змінних та один вектор-стовпець параметра оптимізації.

Щоб перетворити те, що записано в алгебраїчній формі, на графічне зображення, в області визначення факторів розміщується точка, що відповідає основному рівню, і через неї проводяться нові осі координат, паралельні осям натуральних значень факторів. Далі вибирають масштаби по новим осям так, щоб інтервал варіювання для кожного фактора дорівнював одиниці. Це дозволяє отримати умовні точки, що відповідають вершинам квадрата при $n = 2$ та вершинам куба при $n = 3$. Центри цих фігур знаходяться на основному рівні, а сторони мають довжину, рівну двом інтервалам. Нумери вершин квадрата або куба відповідають номерам експериментів у матриці планування. Площа, обмежена цими фігурами, визначається як область експерименту. За таким самим принципом розміщуються експериментальні точки при $n > 3$ [52].

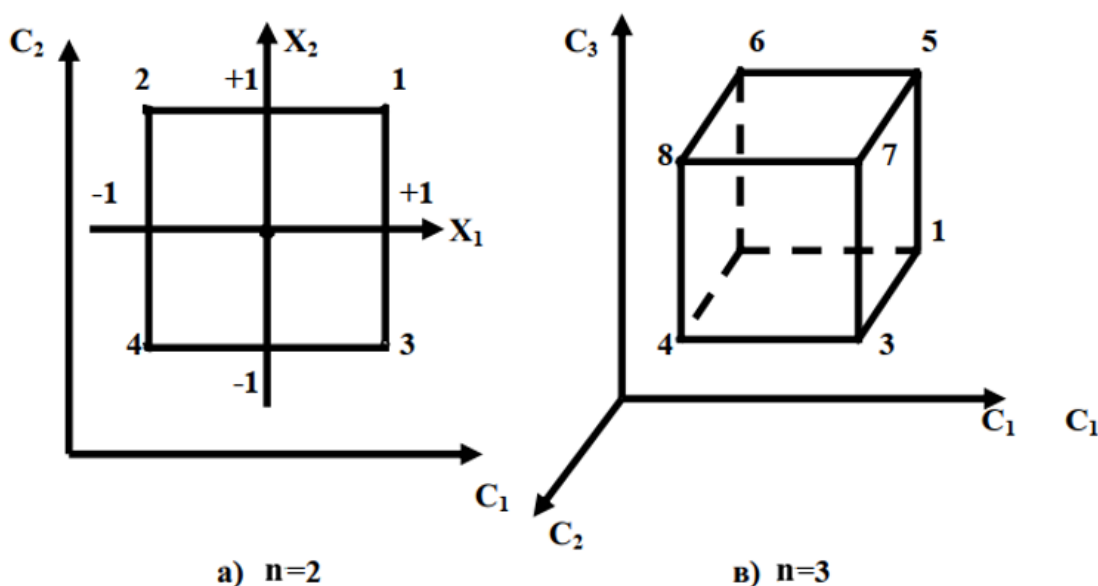


Рисунок 2.6 – Розміщення точок для ПФЕ при $n = 2$ і $n = 3$

Якщо при двох факторах усі можливі комбінації рівнів можна легко отримати методом перебору, то при збільшенні кількості факторів виникає потреба в спеціальних прийомах для побудови матриць. Існує три основні методи, які засновані на поступовому переході від матриць меншої розмірності до більших.

1. **Перший метод** передбачає, що при додаванні нового фактору кожна комбінація рівнів попереднього фактора зустрічається двічі, комбінуючись з верхнім і нижнім рівнями нового фактора. Це дозволяє застосувати метод запису початкового плану для одного рівня нового фактору, а потім повторення його для іншого рівня.

2. **Другий метод** передбачає перемноження стовпців матриці. При поетапному перемноженні рівнів вихідної матриці утворюється додатковий стовпець, що містить результат множення $x_1 \cdot x_2$. Після цього вихідний план повторюється, а в стовпці множення знаки змінюються на протилежні. Цей метод складніший, але застосовується для матриць будь-якої розмірності.

3. **Третій метод** базується на чергуванні знаків. У першому стовпці знаки змінюються по чергову, у другому стовпці — через два рази, в третьому

— через чотири, в четвертому — через вісім і так далі, з кроком, що відповідає ступеням двійки [52].

Приклад побудови матриці планування для експерименту типу 23 представлений в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Матриця планування експерименту 2^3

Номер з\п	y	x_1	x_2	x_3
1	y_1	+1,0	+1,0	+1,0
2	y_2	-1,0	+1,0	+1,0
3	y_3	+1,0	-1,0	+1,0
4	y_4	-1,0	-1,0	+1,0
5	y_5	+1,0	+1,0	-1,0
6	y_6	-1,0	+1,0	-1,0
7	y_7	+1,0	-1,0	-1,0
8	y_8	-1,0	-1,0	-1,0

Після побудови матриці планування проводиться експеримент, під час якого збираються експериментальні дані. Використовуючи ці дані, можна здійснити розрахунок коефіцієнтів регресії.

Значення вільного члена b_0 обчислюється як середнє значення всіх параметрів оптимізації, що отримані в ході експерименту, за допомогою такої формули:

$$b_0 = \sum_{1}^N y_u / N, \quad (2.14)$$

де y_u — значення параметра оптимізації в u -у досліді; N — кількість дослідів у матриці.

Лінійні коефіцієнти регресії розраховуються за наступною формулою:

$$b_i = \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u / \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 = \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u / N, \quad (2.15)$$

де x_{iu} — кодоване значення фактору x_i в u -у експерименті.

Коефіцієнти регресії, що відображають парну взаємодію між факторами, обчислюються за такою формулою:

$$b_{ij} = \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u / \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 = \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u / N \quad (2.16)$$

Ці рівняння дозволяють оцінити зв'язок між факторами і параметром оптимізації, а також визначити, як взаємодії між факторами впливають на результат експерименту.

2.6. Оптимізація та оцінка ефективності параметрів склопакетів за допомогою функції бажаності Харрінгтона

Одним із найбільш ефективних і наочних методів побудови інтегрального індексу ефективності в експериментальних дослідженнях є використання загальної функції бажаності Харрінгтона. Її основа полягає в перетворенні натуральних значень часткових показників, що мають різну фізичну природу та одиниці виміру, на єдину безрозмірну шкалу бажаності, яка дає можливість порівнювати їх за однією умовою переважності.

Шкала бажаності Харрінгтона являє собою універсальну психофізичну вербально-числову шкалу, що зазвичай застосовується у випадках, коли оцінки мають суб'єктивний характер. Це особливо важливо при експертному оцінюванні, оскільки вона дозволяє формалізувати суб'єктивні переваги експертів. Шкала визначається функцією бажаності, яка встановлює зв'язок між натуральними значеннями фізичних показників і психофізичними параметрами — суб'єктивними лінгвістичними оцінками "бажаності" для

певних функцій, об'єктів, систем або осіб. У таблиці 2.3 представлено відповідність між кількісними значеннями безрозмірної шкали і сприйняттям цих значень людьми.

Таблиця 2.3 – Вербально-числова шкала Харрінгтона

Інтервали значень функції бажаності	Лінгвістична оцінка бажаності
0,80 – 1,00	Дуже висока
0,630 – 0,80	Висока
0,370 – 0,630	Задовільна
0,20 – 0,370	Низька
0,00 – 0,20	Дуже низька (незадовільна)

У межах цієї шкали зазвичай виділяють три основні градації: "низька", "задовільна" (середня) і "висока" (добра). Ці категорії відповідають інтервалам (0,00 – 0,37), (0,37 – 0,69) та (0,69 – 1,00) відповідно, і кожен інтервал включає в себе нижню межу значення.

Основним етапом у побудові функції бажаності Харрінгтона є визначення меж допустимих значень (y) для кожного показника. Ці межі можуть бути встановлені на основі стандартів, нормативних документів, а також шляхом експертної оцінки, якщо немає чітко визначених значень. Обмеження можуть бути односторонніми або двосторонніми в залежності від характеру зміни показника. Якщо поліпшення загальної характеристики можливе лише при зміні показника в одному напрямку (наприклад, при зменшенні або збільшенні), то встановлюється одностороннє обмеження, виражене як $y_i \leq y_{max}$ або $y_i \geq y_{min}$. У випадку, коли зміна показника може відбуватися в обох напрямках від оптимального значення, встановлюється двостороннє обмеження, виражене як $y_{min} \leq y_i \leq y_{max}$.

Наприклад, для часу реакції встановлюється одностороннє обмеження, оскільки чим менший час реакції, тим більша бажаність показника. Натомість для величини артеріального тиску встановлюється двостороннє обмеження, оскільки оптимальне значення тиску має певний діапазон, і відхилення від нього в будь-яку сторону знижує показник бажаності.

Для випадків одностороннього обмеження, коли показники мають «позитивний» характер і бажаність змінюється монотонно у напрямку зростання значення показника, функція бажаності Харрінгтона приймає сигмоїдальну форму, як показано на рис. 2.7. Цей тип функції відображає типову залежність бажаності від значення показника.

Формулювання цієї функції виглядає наступним чином:

$$d = e^{-e^{-y'}}, \quad (2.17)$$

де y' — це шкала, що містить кодовані значення досліджуваних показників у;

d — це шкала бажаності, яка дозволяє оцінити перевагу цього показника.

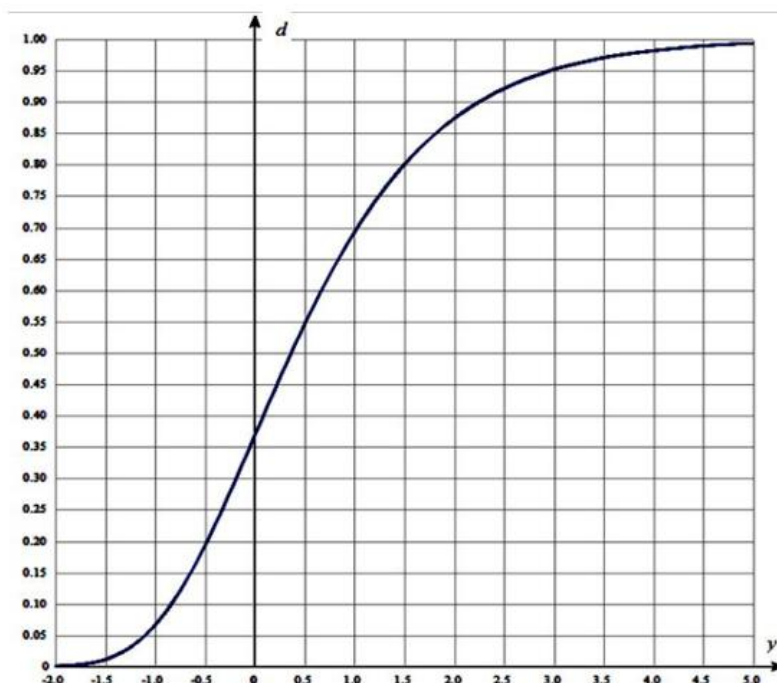


Рисунок 2.7 – Діаграма функції бажаності Харрінгтона для випадку з одностороннім обмеженням.

З рис. 2.7 видно, що на відрізку «задовільно» функція бажаності має майже лінійну форму, тоді як у межах, де значення наближаються до 0 або 1, її характер стає нелінійним. Це свідчить про знижену чутливість у крайніх областях порівняно з середньою частиною, що узгоджується із законом Вебера-Фехнера. Ефективні значення власних показників розташовані у діапазоні від -2 до +5 на шкалі кодованих значень. Для приведення кількісних характеристик показників до нормованого вигляду застосовується перетворення, при якому кожному значенню y присвоюється відповідне кодоване значення y' межах від -2 до +5. Найбільше значення показника отримує позначку «+5», найменше — «-2», а всі інші розподіляються між цими межами за заданою формулою:

$$y' = -2 + 7 \cdot \frac{(y - y_{min})}{(y_{max} - y_{min})}, \quad (2.18)$$

де y_{min} і y_{max} — відповідно нижня та верхня границі діапазону значення показника.

Під час переведення нормованих значень y'_i до відповідних бажаностей d_i , їх інтерпретація набуває наступного вигляду: значення $d_i = 0$ свідчить про абсолютно неприйнятний рівень показника, $d_i = 1$ — про оптимальний стан, а $d_i = 0,37$ зазвичай є нижньою межею прийнятних значень. У разі двостороннього обмеження функція бажаності визначається як:

$$d = e^{-|y'|^n}, \quad (2.19)$$

де y' — нормоване значення показника y , n — позитивний параметр, що впливає на форму функції.

Для розрахунку y' випадку двосторонніх обмежень використовується формула:

$$y' = \frac{(2y - y_{max} - y_{min})}{(y_{max} - y_{min})} \quad (2.20)$$

Графічне зображення функції бажаності з двостороннім обмеженням для $n = 2$ наведено на рис. 2.8. Значення параметра n , що впливає на крутизну кривої, можна обчислити за формулою:

$$n = \frac{(\ln \ln(1/d))}{(\ln|y'|)} \quad (2.21)$$

де d зазвичай належить до інтервалу $0,6 < d < 0,9$ (часто використовується $d = 0,7$). Контрольна точка дозволяє задавати крутизну кривої, акцентуючи увагу на особливій важливості певних показників. Для них параметр n збільшується, що спричиняє різкі зміни бажаності за незначного відхилення значень показника поблизу меж. При збільшенні n крива наближається до граничного вигляду: $d = 0$ поза заданими межами і $d = 1$ у межах допустимих значень.

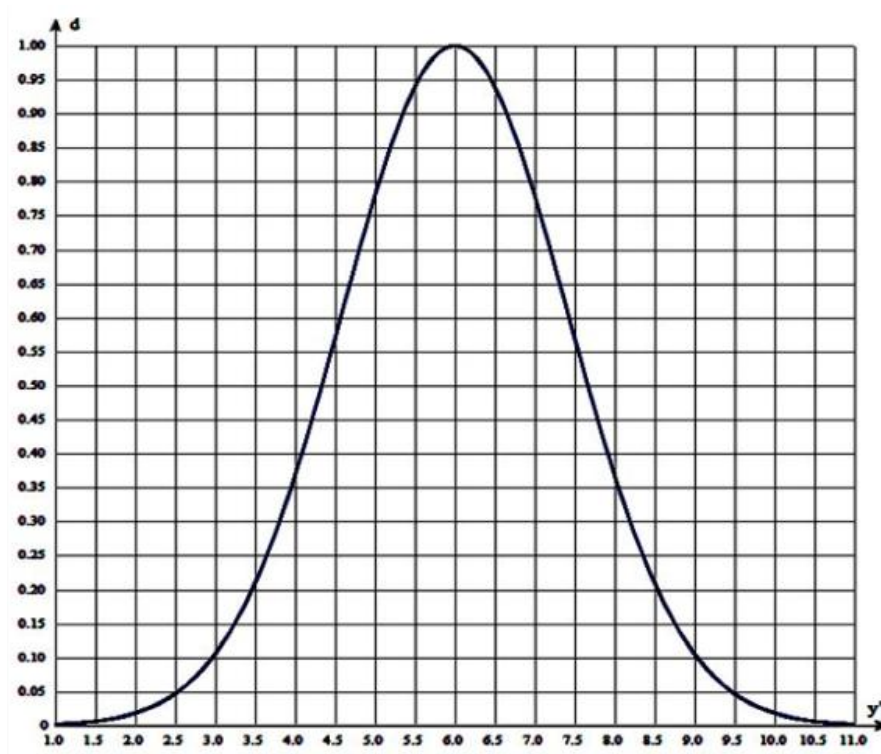


Рисунок 2.8 – Графік функції бажаності Харрінгтона з двостороннім обмеженням

На рис. 2.8 наведено графік функції бажаності Харрінгтона з двосторонніми обмеженнями. Після того як визначено всі індивідуальні функції бажаності (d_i), вони згортаються в загальний критерій D , що є інтегрованою функцією бажаності. За відсутності вагових коефіцієнтів, цей загальний критерій можна виразити наступною формулою:

$$D = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i} \quad (2.22)$$

Для обчислення загальної функції бажаності використовується та сама шкала переваг, що і для власних показників (табл. 2.4). Ця функція є чутливою до низьких значень індивідуальних бажаностей і наближається до нуля, якщо хоча б один із показників отримує нульову оцінку. З іншого боку, значення функції бажаності дорівнює одиниці, коли всі індивідуальні показники рівні одиниці. У разі, якщо певні властивості критерію є надто жорсткими та неприйнятними, рекомендується застосовувати інші методи узагальнення [13].

2.7. Програмні комплекси для теоретичних розрахунків

Для розрахунків склопакетів у цій роботі використовується програмне забезпечення Window 7.7, розроблене Каліфорнійським університетом (США), разом із АПРОК. Це програмне забезпечення широко використовується будівельними інженерами, архітекторами, студентами та педагогами. Воно дозволяє виконувати аналіз теплопередачі, оцінювати енергетичну ефективність матеріалів, а також проводити розрахунки для визначення температурних режимів і розв'язувати проблеми, що обумовлені конденсацією, вологістю матеріалу, а також герметичністю конструкцій. Програма має велику базу даних, що містить понад 60 тисяч видів скла. Також надається можливість моделювати різні профілі віконних блоків і газові суміші для заповнення камер склопакетів. Двовірний аналіз

теплопередачі базується на методі кінцевих елементів, де користувач визначає властивості матеріалів для кожної частини конструкції та встановлює умови оточуючого середовища.

Зміни в опорі теплопередачі в залежності від характеристик газу, що заповнює камери склопакета, аналізуються за допомогою програмного пакета «MathCad». Цей інструмент дозволяє виконувати числові та символічні розрахунки, працювати з векторами та матрицями, а також автоматично переводити одиниці вимірювання.

Для оптимізації параметрів світлопрозорих конструкцій з точки зору нормування опору теплопередачі та економічної доцільності застосовувався метод планування експерименту. Це метод, що передбачає процедуру вибору кількості експериментів і умов їх проведення для отримання необхідної точності. Усі фактори, що впливають на процес, змінюються одночасно за певними правилами, а результати експериментів використовуються для створення математичної моделі. Після цього проводиться статистичний аналіз, під час якого перевіряється значимість коефіцієнтів регресії та адекватність побудованої моделі. Адекватність моделі оцінюється шляхом порівняння з експериментальними даними і перевіряється в програмі «STATISTICA». Це програмне забезпечення для статистичного аналізу, розроблене компанією StatSoft Inc., реалізує функції для обробки та візуалізації даних, а також для застосування статистичних методів. Для створення математичних моделей у «STATISTICA» (модуль «Множинна регресія»), який дозволяє оцінювати залежності між кількома змінними.

Висновки до розділу 2

1. Методологія дослідження теплофізичних процесів у світлопрозорих конструкціях є важливим інструментом для оцінки енергетичної ефективності та теплопередачі цих конструкцій. Врахування різних параметрів, таких як властивості матеріалів, конструктивні особливості та умови навколишнього середовища, дозволяє отримати точні моделі

теплообміну та забезпечити оптимізацію характеристик конструкцій. Використання сучасних програмних комплексів, таких як Window 7.7 і MathCad, надає можливість проводити складні розрахунки та симуляції, що забезпечують високу точність результатів. Вони дозволяють враховувати різноманітні фактори, включаючи зміну характеристик газу в камерах склопакетів, що є важливим для розвитку енергозберігаючих технологій у будівництві.

2. Методи планування експериментів і статистичного аналізу, що використовуються для оптимізації параметрів конструкцій, дозволяють забезпечити точність і надійність отриманих результатів. Планування експериментів дає змогу визначити кількість та умови проведення випробувань, необхідних для досягнення заданої точності, а статистичний аналіз в програмі «STATISTICA» допомагає оцінити значимість коефіцієнтів регресії та перевірити адекватність математичних моделей. Такий комплексний підхід дозволяє ефективно вирішувати задачі, пов'язані з поліпшенням енергетичної ефективності та оптимізацією теплофізичних характеристик світлопрозорих конструкцій у сучасному будівництві.

3. Зміни в характеристиках газу, що заповнює камери склопакетів, досліджуються за допомогою програмного пакета «MathCad», який дозволяє виконувати числові та символьні розрахунки. Цей інструмент також дозволяє автоматично переводити одиниці вимірювання та працювати з векторами й матрицями, що робить його зручним для проведення детальних аналізів.

4. Оптимізація параметрів світлопрозорих конструкцій здійснюється за допомогою методу планування експерименту. Цей метод передбачає вибір кількості експериментів та умов їх проведення для досягнення заданої точності. Результати експериментів використовуються для побудови математичних моделей, а їх адекватність перевіряється через статистичний аналіз в програмі «STATISTICA». Ця програма реалізує функції для обробки та візуалізації даних і дозволяє використовувати методи множинної регресії для оцінки залежностей між змінними.

РОЗДІЛ 3

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СКЛОПАКЕТІВ ДЛЯ КЛІМАТИЧНИХ УМОВ М. КРОПИВНИЦЬКОГО

3.1. Математичне моделювання теплофізичних характеристик склопакетних конструкцій

Енергоефективність світлопрозорих конструкцій визначається комплексом теплофізичних процесів, що відбуваються через різні структурні елементи віконного блоку. Найбільший потенціал оптимізації теплотехнічних параметрів зосереджений у склопакетній частині, яка становить приблизно 70% загальної площі конструкції при відносно помірній частці у собівартості - близько 30% від вартості квадратного метра.

Дослідження термодинамічних властивостей газового середовища між склопакетними елементами потребує розширення наявного діапазону експериментальних даних. На основі математичного моделювання розроблено аналітичні залежності теплофізичних характеристик повітряного прошарку для температурного інтервалу від -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$.

Математичний апарат включає функціональні залежності ключових параметрів від температури міжскляного простору. Теплопровідність повітря демонструє лінійне зростання з підвищенням температури згідно рівняння:

$$\lambda = 0,00008 \cdot T_m + 0,00278 \quad (3.1)$$

Густина повітряного середовища характеризується степеневою залежністю:

$$\rho = 357,15 \cdot T_m^{-1,002} \quad (3.2)$$

що відображає зменшення щільності при нагріванні.

Динамічна в'язкість газового наповнення описується лінійною функцією:

$$\mu = (3799022,3 + 48927,94 \cdot T_m) \cdot 10^{-12} \quad (3.3)$$

демонструючи зростання з підвищенням температури.

Питома теплоємність повітря має складний характер температурної залежності з трьома характерними діапазонами: константа 1013 Дж/(кг·К) для інтервалу -50...-30°C, лінійне спадання в діапазоні -30...0°C та стабілізація на рівні 1005 Дж/(кг·К) при додатних температурах:

$$\begin{cases} 1013, \text{якщо } 223,15 \text{ }^{\circ}\text{K} \leq T_m \leq 243,15 \text{ }^{\circ}\text{K} \\ 1077,5 - 0,266 \cdot T_m, \text{якщо } 243,15 \text{ }^{\circ}\text{K} < T_m < 273,15 \text{ }^{\circ}\text{K} \\ 1005, \text{якщо } 273,15 \text{ }^{\circ}\text{K} \leq T_m \leq 333,15 \text{ }^{\circ}\text{K} \end{cases} \quad (3.4)$$

Аналіз отриманих залежностей свідчить про різноспрямовану динаміку термодинамічних параметрів: зростання теплопровідності та в'язкості супроводжується зниженням густини та теплоємності при підвищенні температури міжскляного простору.

Верифікація математичної моделі здійснювалась на прикладі однокамерного склопакета формули 4М1-12-4М1 з міжскляною відстанню 12 мм при температурному перепаді 15°K. Розрахунковий алгоритм реалізовано в середовищі *MathCad* для забезпечення точності обчислень та зручності параметричного аналізу.

Запропонована методика дозволяє оптимізувати конструктивні параметри склопакетів з урахуванням кліматичних особливостей регіону експлуатації та специфіки теплофізичних процесів у міжскляному просторі.

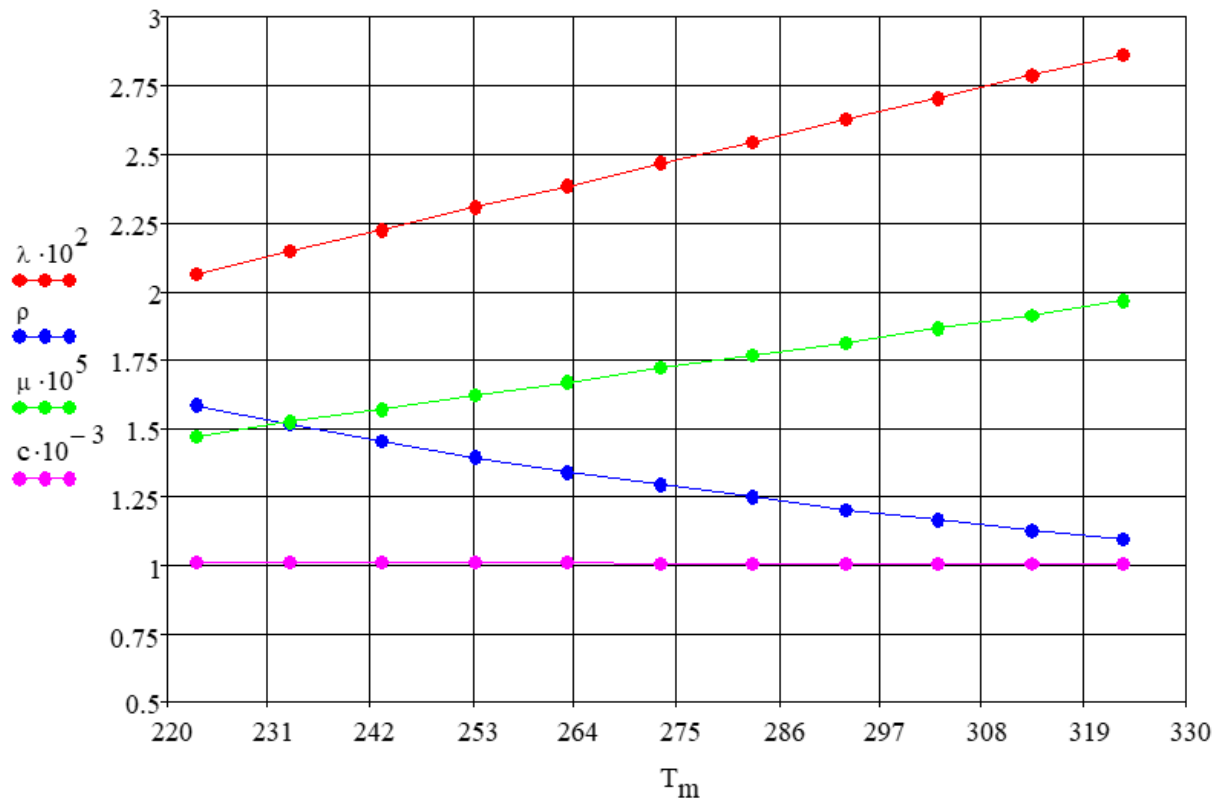


Рисунок 3.1 – Залежності теплофізичних властивостей повітряного середовища від температурних умов

Графічні залежності критеріїв подібності Gr , Pr та Nu від усередненої температури повітря в міжскляному просторі подано на рис. 3.2-3.4.

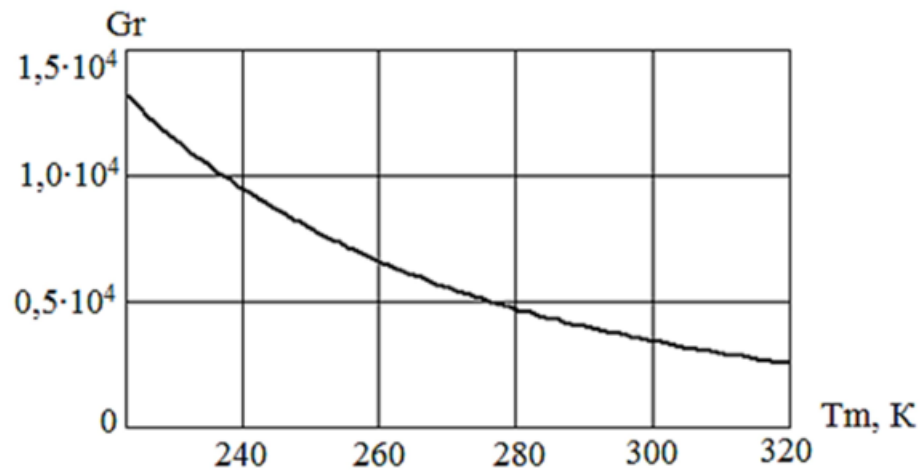


Рисунок 3.2 – Динаміка зміни числа Грасгофа відносно усередненої температури в міжскляному просторі

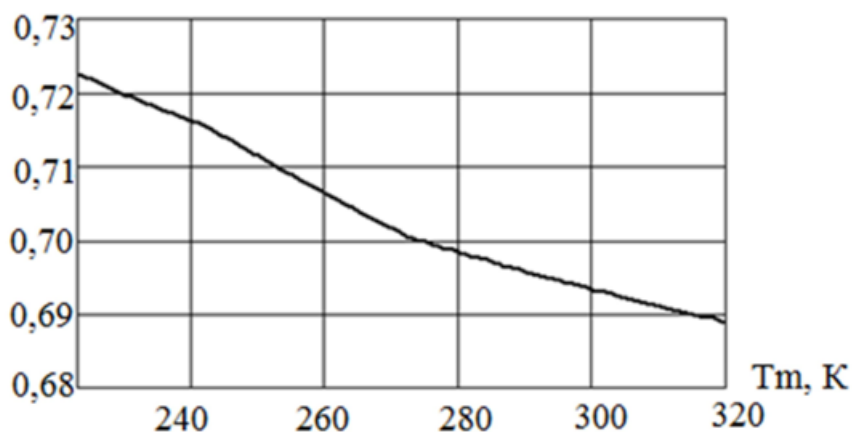


Рисунок 3.3 – Динаміка зміни числа Прандтля відносно усередненої температури в міжскляному просторі

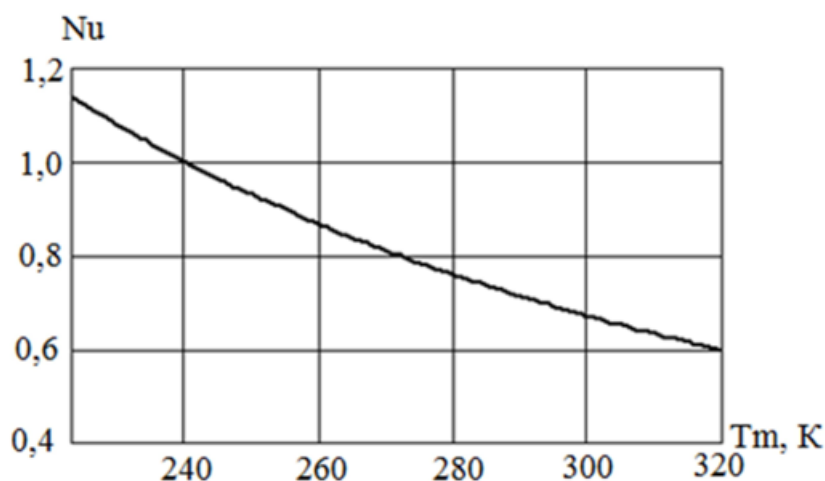


Рисунок 3.4 – Динаміка зміни числа Нуссельта відносно усередненої температури в міжскляному просторі

Аналіз графічних залежностей 3.2-3.4 свідчить про обернену кореляцію між підвищенням усередненої температури повітряного середовища та значеннями критеріїв Грасгофа, Прандтля й Нуссельта.

На рис. 3.5 зображено характер зміни трьох параметрів теплопередачі залежно від усередненої температури повітря в міжскляному просторі: радіаційного коефіцієнта (h_r), газового коефіцієнта (h_g) та їх сумарного показника - загального коефіцієнта теплопередачі (h_s).

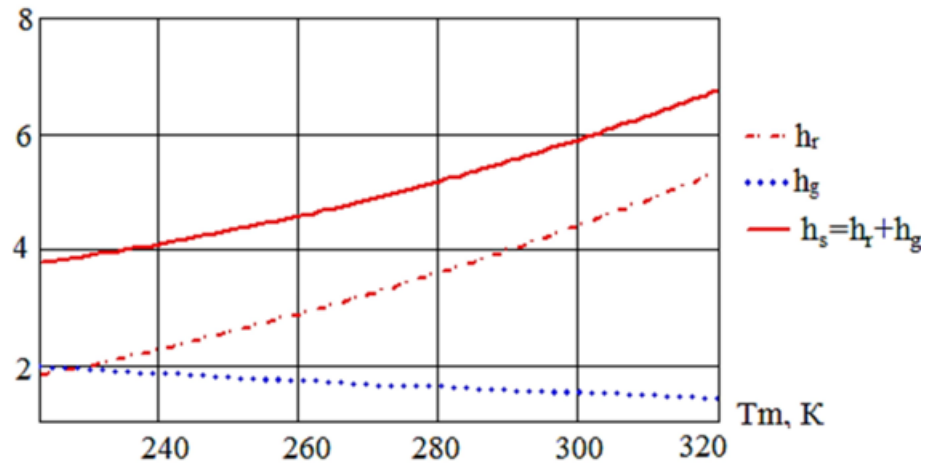


Рисунок 3.5 – Співвідношення коефіцієнтів h_r , h_g та h_s відносно параметра T_m

Спостереження показують, що зростання середньотемпературного показника (T_m) у склопакетній камері призводить до підвищення радіаційного коефіцієнта теплопередачі (h_r), водночас зменшуючи газовий коефіцієнт (h_g). При цьому сумарний коефіцієнт теплопередачі повітряного прошарку (h_s) демонструє тенденцію до зростання.

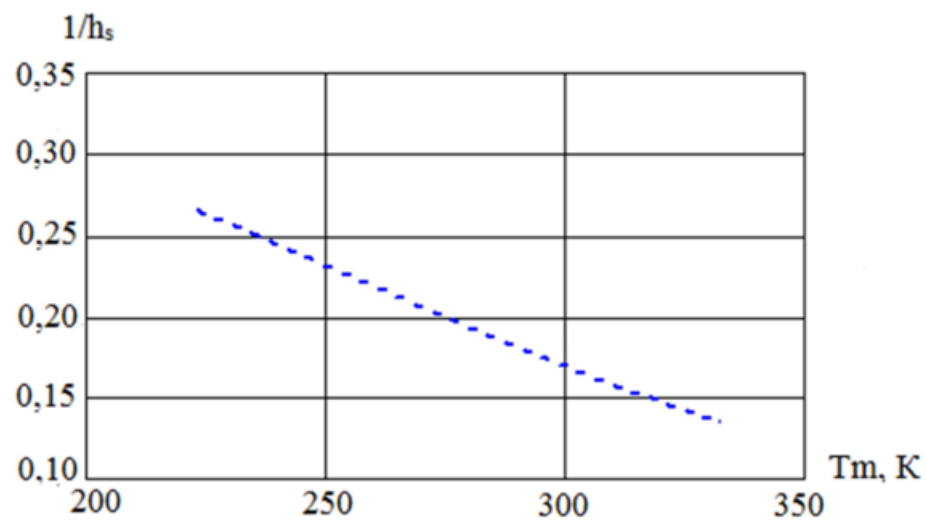


Рисунок 3.6 – Динаміка коефіцієнта теплового опору газового прошарку у склопакеті з однією камерою залежно від середньотемпературних показників

Рис. 3.6 відображає варіацію показника термічного спротиву газового прошарку відносно усередненої температури в міжскляному просторі.

При зростанні усередненої температури T_m у міжскляному просторі спостерігається зниження коефіцієнта теплового опору однокамерної конструкції. Згідно з рівняннями (2.7) та (2.6), це призводить до послаблення термічного спротиву в центрі склопакета. За умови сталої температури приміщення підвищення середньотемпературних показників у склопакетній камері може бути спричинене зростанням температури довкілля. Отже, потепління зовнішнього середовища спричиняє зменшення термоопору центральної зони конструкції.

Для верифікації встановлених закономірностей проведено розрахунки у програмі Window 7.7 щодо термічного спротиву центральної частини однокамерного склопакета (ширина 12 мм) за різних зовнішніх температур (t_n , °C). Табл. 3.1-3.3 містять дані про опір теплопередачі для конструкцій:

- з повітряним заповненням (4M1-12-4M1)
- з аргоновим заповненням (4M1-12Ar-4M1)
- з повітряним заповненням та I-склом (4M1-12-4i)

Рис. 3.7 демонструє кореляцію між термоопором та зовнішньою температурою для різних типів склопакетів.

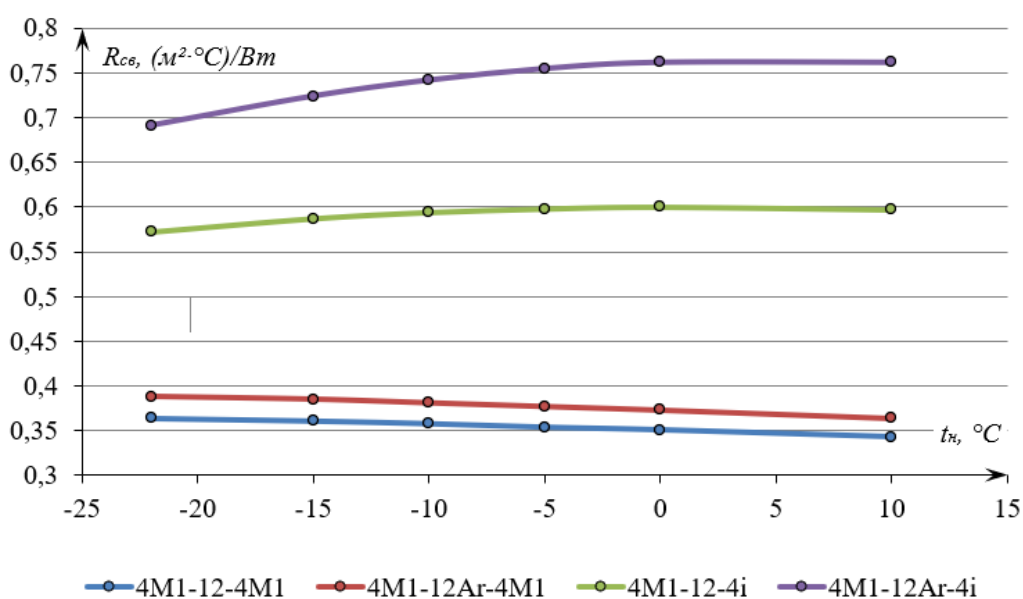


Рисунок 3.7 – Співвідношення термічного опору та зовнішньої температури для різних склопакетних конструкцій

Таблиця 3.1 – Термічний опір центру однокамерного склопакета з повітряним наповненням (тип 4М1-12-4М1)

t _в , °C	t ₃ , °C	ΔT _{на склі} , °C	R _{св} , (м ² ·°C)/Вт	T _{на склі} , °C				T _м
				Зовнішнє скло		Внутрішнє скло		
				t ₁ , °C	t ₂ , °C	t ₃ , °C	t ₄ , °C	
21,00	-22,0	-5,30	0,3640	-16,90	-16,40	5,80	6,30	23,20
21,00	-15,0	-1,10	0,3610	-10,70	-10,30	8,10	8,50	19,20
21,00	-10,0	1,9750	0,3580	-6,20	-5,90	9,80	10,20	16,40
21,00	-5,0	5,00	0,3540	-1,80	-1,50	11,50	11,80	13,60
21,00	0,0	8,050	0,3510	2,60	2,80	13,30	13,50	10,90
21,00	10,0	14,20	0,3430	11,40	11,50	16,90	17,00	5,60

У конструкції з повітряним заповненням (4М1-12-4М1) за незмінної внутрішньої температури спостерігається: підвищення зовнішньої температури (t_n) призводить до зменшення перепаду між склом ($\Delta T_{\text{скла}}$), зростання температури міжскляного простору (T_m) та зниження термоопору ($R_{\text{св}}$).

Таблиця 3.2 – Термічний опір центру однокамерного склопакета з аргоновим наповненням (тип 4М1-12Аг-4М1)

t _В , °C	t ₃ , °C	ΔT _{на склі, °C}	R _{св} , (м ² ·°C)/Вт	T _{на склі} , °C				T _м
				Зовнішнє скло		Внутрішнє скло		
				t ₁ , °C	t ₂ , °C	t ₃ , °C	t ₄ , °C	
21,00	-22,0	-5,00	0,388	-17,20	-16,70	6,70	7,20	24,40
21,00	-15,0	-0,825	0,385	-10,90	-10,60	8,90	9,30	20,20
21,00	-10,0	2,175	0,381	-6,50	-6,10	10,50	10,80	17,30
21,00	-5,0	5,20	0,377	-2,00	-1,70	12,10	12,40	14,40
21,00	0,0	8,20	0,373	2,40	2,70	13,70	14,00	9,60
21,00	10,0	14,25	0,364	11,30	11,40	17,10	17,20	5,90

Аргонове заповнення (4М1-12Аг-4М1) демонструє аналогічну залежність термоопору від зовнішньої температури.

Результати моделювання у Window 7.7 корелюють з обчисленнями за методикою [50] у середовищі MathCad.

Таблиця 3.3 – Термічний опір центру однокамерного склопакета з повітрям та І-склом (тип 4М1-12-4і)

t _в , °C	t ₃ , °C	ΔT _{на склі} , °C	R _{св} , (м ² ·°C)/Вт	T _{на склі} , °C				T _м
				Зовнішнє скло		Внутрішнє скло		
				t ₁ , °C	t ₂ , °C	t ₃ , °C	t ₄ , °C	
21,00	-22,0	-3,55	0,572	-18,70	-18,40	11,30	11,60	30,30
21,00	-15,0	0,50	0,587	-12,30	-12,10	13,10	13,30	25,60
21,00	-10,0	3,40	0,594	-7,70	-7,50	14,30	14,50	22,20
21,00	-5,0	6,250	0,598	-3,10	-2,90	15,40	15,60	18,70
21,00	0,0	9,075	0,600	1,50	1,70	16,50	16,60	15,10
21,00	10,0	14,75	0,597	10,80	10,90	18,60	18,70	7,90

Конструкції з І-склом, наповнені повітрям чи аргоном, показують: при сталій внутрішній температурі зростання зовнішньої температури (t_n) зумовлює підвищення температури міжскляного простору (T_m) та збільшення термоопору при зменшенні температурного перепаду ($\Delta T_{\text{скла}}$).

Таблиця 3.4 – Термічний опір центру однокамерного склопакета з аргоном та І-склом (тип 4М1-12-4і)

t _в , °C	t _з , °C	ΔT _{на склі} , °C	R _{св} , (м ² ·°C)/Вт	T _{на склі} , °C				T _м
				Зовнішнє скло		Внутрішнє скло		
				t ₁ , °C	t ₂ , °C	t ₃ , °C	t ₄ , °C	
21,00	-22,0	-3,025	0,691	-19,30	-19,00	13,00	13,20	32,50
21,00	-15,0	1	0,724	-12,80	-12,60	14,60	14,80	27,60
21,00	-10,0	3,8	0,742	-8,20	-8,00	15,60	15,80	24,00
21,00	-5,0	6,6	0,755	-3,50	-3,40	16,60	16,70	20,20
21,00	0,0	9,375	0,762	1,20	1,30	17,40	17,60	16,40
21,00	10,0	14,9	0,762	10,60	10,70	19,10	19,20	8,60

У склопакетах з І-склом спостерігається обернена залежність термоопору від зовнішньої температури порівняно зі звичайним склом. Встановлено, що радіаційна теплопередача має більший вплив на тепловтрати, ніж конвективна. Низькоемісійне скло зменшує радіаційні

тепловтрати. Схематичне зображення теплопередачі через однокамерний склопакет з низькоемісійним покриттям подано на рис. 3.8.

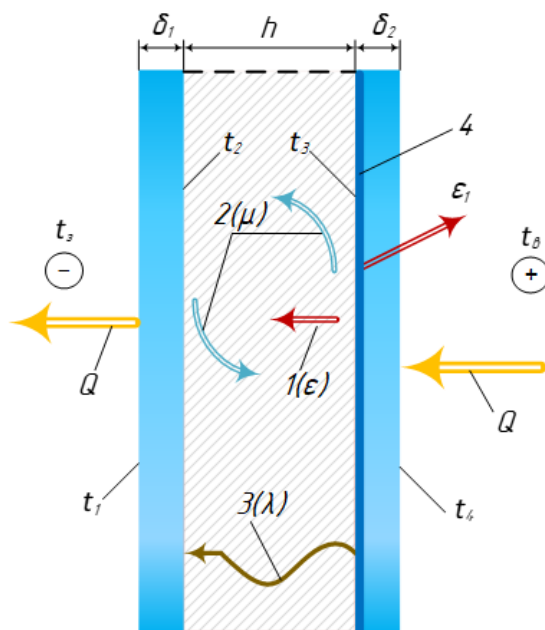


Рисунок 3.8 – Механізми теплопередачі в однокамерному склопакеті з низькоемісійним покриттям: 1 – радіаційний теплообмін; 2 – конвективний теплообмін; 3 – кондуктивний теплообмін; 4 – низькоемісійне покриття; λ – теплопровідність; μ – динамічна в'язкість; ε – випромінювальна здатність; δ – товщина скляного шару; h – відстань між склом; t_1 – температура зовнішньої поверхні; t_2 – температура внутрішньої поверхні зовнішнього скла; t_3 – температура зовнішньої поверхні внутрішнього скла; t_4 – температура внутрішньої поверхні.

3.2. Аналіз кореляції між термічним опором центральної зони склопакетних конструкцій та їх геометричними характеристиками в умовах клімату м. Кропивницький

Попередні дослідження засвідчили необхідність вибору склопакетів з урахуванням регіональних особливостей розташування об'єкта. Для оцінювання ефективності обраного склопакета відносно вимог [47], доцільно розробити методику розрахунку нормативного термоопору його центральної частини, оскільки документ [47] містить лише алгоритм визначення нормативного опору теплопередачі для цілісної віконної конструкції.

Показник термічного опору світлопрозорої системи $R_{вік}$, (м²·°C)/Вт, визначається за рівнянням (2.5). Трансформуючи формулу (2.5), отримуємо вираз для обчислення $R_{\Sigma cn}$, (м²·°C)/Вт, у центральній зоні склопакета:

$$R_{\Sigma \text{сп}} = \frac{F_{\text{сп}}}{\frac{F_{\text{сп}} + \sum_{i=1}^n F_i}{R_{\text{пр}}} - \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{R_{\Sigma i}} - \sum_{j=1}^m k_j L_j}, \quad (3.5)$$

Шляхом прирівнювання у формулі (3.5) загального опору віконного блоку до нормативних показників та введення конкретних параметрів профілю, розроблено математичну модель для обчислення нормативного термоопору центральної зони склопакетної конструкції.

Базові параметри віконної системи:

- габаритні розміри b_e , м, та h_e , м, визначено згідно [50];
- термічний опір конструкції відповідає нормативу для м. Кропивницький ($R_{\text{в}}^{\text{норм}} = 0,9$);
- рамна частина виконана з п'ятикамерного ПВХ-профілю, що характеризується показником $R_{\text{непр}} = 0,9$ (м²·°C)/Вт, площа якої розрахована для двостулкового вікна (рис. 3.9);
- використано алюмінієву дистанційну рамку із заглибленням у ПВХ-профіль на $f = 5$ мм;
- параметр лінійної теплопередачі становить $k = 0,06$ Вт/(м²·°C) [48, табл.К1].

Таблиця 3.5 демонструє показники термічного опору центральної зони склопакетної системи.

Для віконних систем із параметрами згідно [56], нормативний термоопір центральної зони склопакетів у м. Кропивницький варіюється від 0,909 до 1,063 (м²·°C)/Вт. Максимальний показник 1,063 (м²·°C)/Вт досягається при габаритах $h_e = 1,16$ м, $b_e = 1,17$ м та площі $F_e = 1,357$ м². Аналіз формули (3.5) показує, що зростання загальної площі вікна призводить до інтенсивнішого збільшення знаменника F_{cn} , порівняно з іншими

компонентами, що зумовлює зниження нормативного термоопору центральної зони.

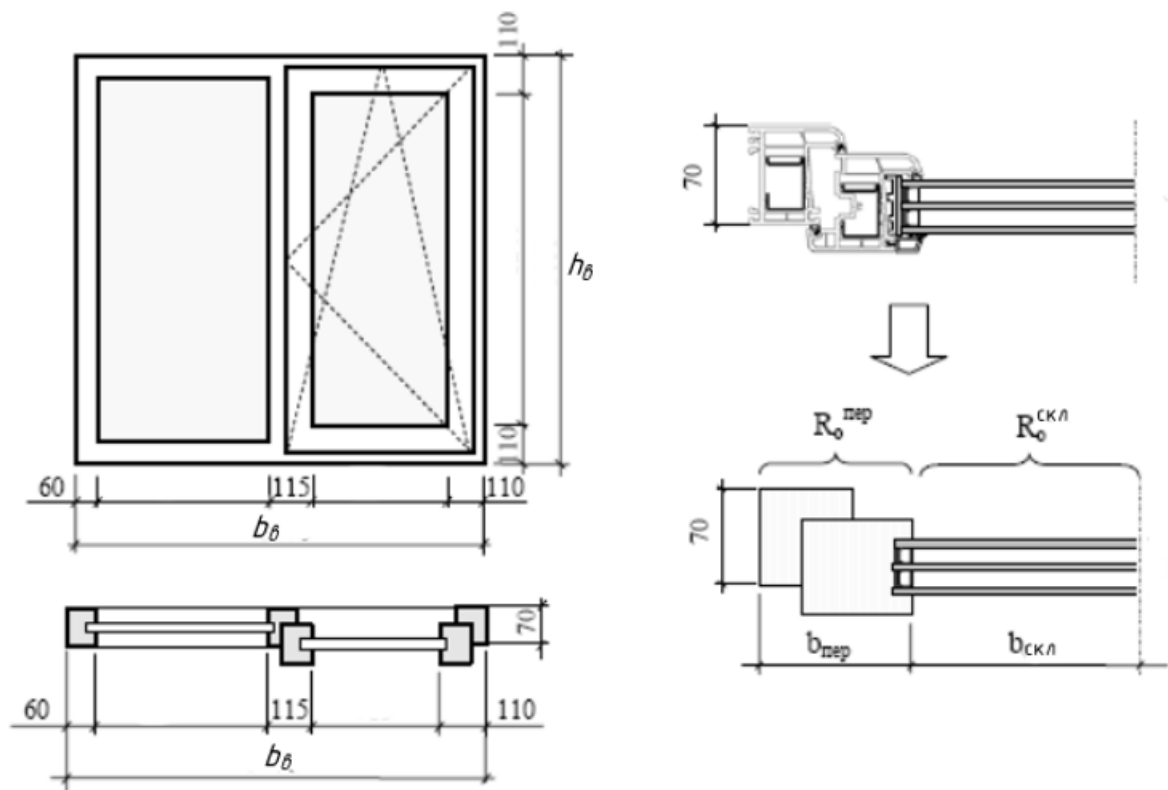


Рисунок 3.9 – Габаритні характеристики рамної частини віконної конструкції

Таблиця 3.5 – Розрахункові величини термоопору центральної зони склопакета

$h_{\text{в}}, \text{ м}$	$b_{\text{в}}, \text{ м}$	$F_{\text{в}}, \text{ м}^2$	$R_{\text{в}}^{\text{норм}}, \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C)/Вт}$	$F_{\text{непр}}, \text{ м}^2$	$R_{\text{непр}}, \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C)/Вт}$	$F_{\text{сп}}, \text{ м}^2$	$L, \text{ м}$	$k, \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$	$R_{\text{св}}^{\text{норм}}, \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C)/Вт}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Висота віконного блоку більше його ширини									
1,320	1,170	1,544	0,9	0,527	0,750	1,018	6,37	0,0600	1,045
1,460	1,320	1,927	0,9	0,592	0,750	1,335	7,23	0,0600	0,991
1,760	1,170	2,059	0,9	0,652	0,750	1,407	8,13	0,0600	1,013
2,060	1,470	3,028	0,9	0,789	0,750	2,240	9,93	0,0600	0,937
2,060	1,770	3,646	0,9	0,939	0,750	2,707	10,53	0,0600	0,909

Висота віконного блоку менше його ширини									
1,160	1,320	1,531	0,9	0,507	0,750	1,025	6,03	0,0600	1,021
1,160	1,470	1,705	0,9	0,532	0,750	1,173	6,33	0,0600	0,990
1,160	1,770	2,053	0,9	0,624	0,750	1,429	6,93	0,0600	0,959
1,320	1,470	1,940	0,9	0,578	0,750	1,363	6,97	0,0600	0,975
1,460	1,770	2,584	0,9	0,729	0,750	1,855	8,13	0,0600	0,934
Висота віконного блоку рівна його ширині									
1,160	1,170	1,357	0,9	0,481	0,750	0,876	5,73	0,0600	1,063
1,320	1,320	1,742	0,9	0,552	0,750	1,190	6,67	0,0600	1,003
1,460	1,470	2,146	0,9	0,618	0,750	1,529	7,53	0,0600	0,964
1,760	1,770	3,115	0,9	0,834	0,750	2,281	9,33	0,0600	0,919

У двостулкових конструкціях однакової площі спостерігається вища величина нормативного термоопору при вертикально витягнутих вікнах ($b_v < h_v$) порівняно з горизонтально розвиненими ($b_v > h_v$). Наприклад, при $F_{cn} = 2,05 \text{ м}^2$: вертикальна конфігурація ($b_v = 1,17 \text{ м}$, $h_v = 1,76 \text{ м}$) має термоопір $1,013 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)}/\text{Вт}$, тоді як горизонтальна ($b_v = 1,77 \text{ м}$, $h_v = 1,16 \text{ м}$), $R_{cv}^{\text{норм}} = 0,959 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)}/\text{Вт}$. Це пояснюється більшою протяжністю крайових зон у вертикальних конструкціях ($L_1 = 8,13 \text{ м}$ проти $L_2 = 6,93 \text{ м}$), що впливає на теплові втрати.

На основі обчислених даних створено графічні залежності нормативного термоопору $R_{cv}^{\text{норм}}$ центральної зони від площі конструкції з урахуванням пропорцій. Розроблено апроксимуючі функції та їх математичні вирази. Висока точність апроксимації підтверджується коефіцієнтом достовірності R^2 , близьким до одиниці.

Рис. 3.10 відображає взаємозв'язок між нормативним термоопором центральної зони та габаритами віконної системи.

Графік демонструє, що при однаковій площі двостулкової конструкції мінімальний нормативний термоопір спостерігається у горизонтально орієнтованих вікон.

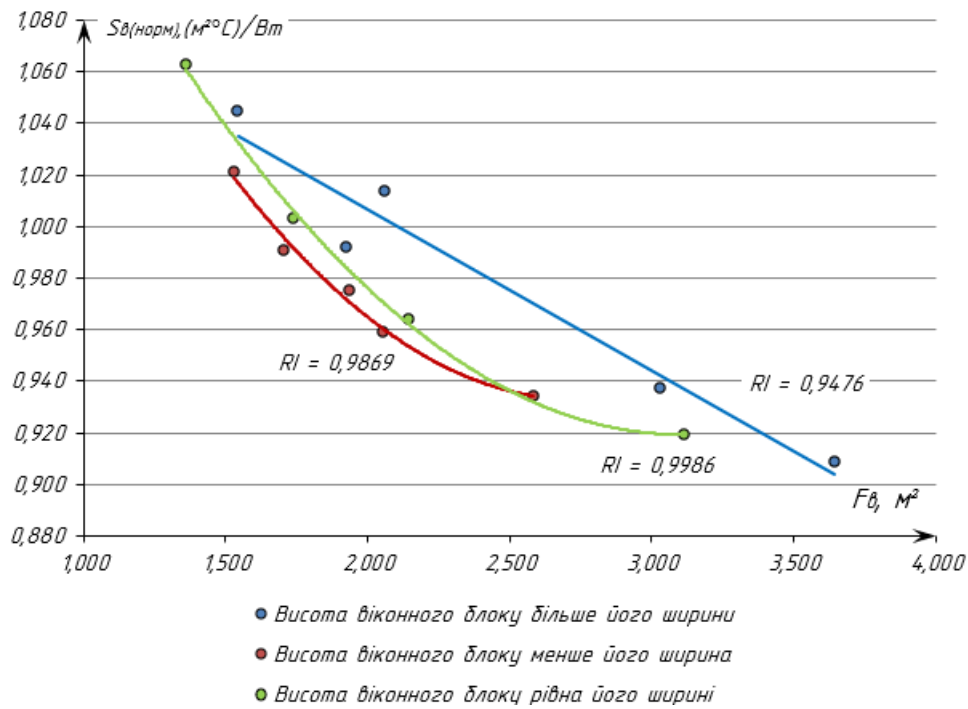


Рисунок 3.10 – Кореляція нормативного термоопору центральної зони склопакета з площею та пропорціями віконного блоку

Для розрахунку нормативного термоопору центральної зони склопакетів у м. Кропивницький запропоновано три формули залежно від конфігурації.

Для вертикально витягнутих вікон (висота більше ширини):

$$R_{\text{св}}^{\text{норм}} = -0,0662 \cdot F_{\text{сп}} + 1,1311$$

Для горизонтально витягнутих конструкцій (висота менше ширини):

$$R_{\text{св}}^{\text{норм}} = 0,0594 \cdot F_{\text{сп}}^2 - 0,3244 \cdot F_{\text{сп}} + 1,3762$$

Для квадратних віконних блоків:

$$R_{\text{св}}^{\text{норм}} = 0,0465 \cdot F_{\text{сп}}^2 + 0,2886 \cdot F_{\text{сп}} + 1,3673$$

Важливо зауважити: наведені формули актуальні виключно для кліматичних умов м. Кропивницький, стандартної геометрії п'ятикамерного ПВХ-профілю згідно рис.3.9 та алюмінієвих дистанційних рамок із 5-міліметровим заглибленням у профіль.

3.3. Оптимізація параметрів склопакетів з урахуванням нормування теплового опору для м. Кропивницький

На сьогоднішній день розроблено велику кількість різноманітних конструкцій склопакетів, що демонструють високі теплотехнічні характеристики. Конструктивні особливості таких виробів включають варіації ширини повітряних камер, наповнення інертними газами, товщину скла та наявність спеціальних покриттів. У межах цієї роботи виконано аналіз і оптимізацію конструкцій склопакетів для міста Кропивницький, спираючись на вимоги до нормованого опору теплопередачі.

Відомо, що згідно з нормативами, тепловий опір віконного блоку для Кропивницького має становити $R_{\text{в}}^{\text{норм}} = 0,9 \text{ (м}^2\cdot\text{°C)/Вт}$. За даними джерел [56] та [57], більшість віконних конструкцій із двокамерними склопакетами, які не оснащені низькоемісійним склом, не відповідають цьому значенню. Розрахункові результати для склопакетів без низькоемісійного скла наведені у табл.3.6. Ці розрахунки виконано за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення Window 7.7.

Таблиця 3.6 – Опори теплопередачі середньої зони і значення температури на внутрішній поверхні різних типів склопакетів

Тип склопакета	Значення опору теплопередачі центр. частини $R_{\text{св}}$, $(\text{м}^2\cdot\text{°C)/Вт}$	Значення температури на внутрішній поверхні скла $t_{\text{в}}^{\text{нов}}$, °C
4М ₁ -10-4М ₁ -10-4М ₁	0,53600	11,00
4М ₁ -12-4М ₁ -12-4М ₁	0,55900	11,40

Тип склопакета	Значення опору теплопередачі центр. частини $R_{св}$, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$	Значення температури на внутрішній поверхні скла $t_{\text{с}}^{\text{нов}}$, $^\circ\text{C}$
4M ₁ -14-4M ₁ -14-4M ₁	0,5720	11,60
4M ₁ -10Ar-4M ₁ -10Ar-4M ₁	0,5910	11,90
4M ₁ -12Ar-4M ₁ -12Ar-4M ₁	0,6090	12,20
4M ₁ -14Ar-4M ₁ -14Ar-4M ₁	0,6170	12,30
6M ₁ -10-6M ₁ -10-6M ₁	0,5420	11,10
6M ₁ -12-6M ₁ -12-6M ₁	0,5650	11,50
6M ₁ -14-6M ₁ -14-6M ₁	0,5790	11,70
6M ₁ -10Ar-6M ₁ -10Ar-6M ₁	0,5970	12,00
6M ₁ -12Ar-6M ₁ -12Ar-6M ₁	0,6150	12,30
6M ₁ -14Ar-6M ₁ -14Ar-6M ₁	0,6230	12,40

Табл. 3.6 демонструє значення опору теплопередачі центральної частини склопакета та температури на його внутрішній поверхні для різних конструктивних рішень, актуальних для кліматичних умов Кропивницького. Для віконного блоку з п'ятикамерним профілем ПВХ, відповідно до попередньо отриманих значень $R_{св}^{\text{норм}}$, тепловий опір повинен перебувати в межах 0,909–1,063 $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ залежно від розмірів конструкції. Однак параметри, наведені в таблиці 3.6, не відповідають цим вимогам.

Згідно з табл. 2.1 та даними джерел [56] і [57], зроблено висновок, що для забезпечення нормативного опору теплопередачі у м. Кропивницький необхідно використовувати склопакети із низькоемісійним покриттям.

Для досягнення оптимальної конструкції двокамерного склопакета застосовано метод математичного планування експерименту. Цей підхід дозволяє знаходити оптимальну область параметрів за умов одночасної варіації кількох факторів шляхом ітеративного аналізу вихідних даних. Для оцінки значущості коефіцієнтів регресії та перевірки адекватності отриманої

моделі використовувалася програма STATISTICA, яка забезпечує ефективне планування та обробку експериментальних даних.

Розрахунки проводилися за граничних умов третього роду: температура зовнішнього середовища $t_3 = -22$ °C, температура внутрішнього середовища $t_v = 21$ °C, коефіцієнти тепловіддачі зовнішньої ($\alpha_z = 23$ Вт/(м²·°C) та внутрішньої ($\alpha_v = 8$ Вт/(м²·°C)) поверхонь. Камери склопакета заповнені аргоном із концентрацією 95%.

Для проведення оптимізації теплотехнічних характеристик двокамерних склопакетів було обрано кілька ключових факторів, які варіювалися під час експерименту: ширина та товщина камери склопакета, а також значення теплопровідності газового середовища, яким заповнені камери склопакетів.

Вихідним параметром виступає опір теплопередачі центральної частини склопакета (R), який є основним показником ефективності з точки зору енергоощадності.

Планування експерименту здійснювалося з використанням факторного аналізу, що дало змогу визначити залежності між варійованими параметрами і результативним показником. Відповідна матриця планування експерименту представлена в табл. 3.7, а результати реалізації експериментального плану – в табл. 3.8. Коефіцієнти рівняння регресії, розраховані за підсумками обробки отриманих даних, наведено в табл. 3.9.

На основі експериментальних даних було складено регресійну модель, яка описує залежність опору теплопередачі від варійованих факторів (табл. 3.7).

Повне рівняння з урахуванням коефіцієнтів, отриманих в експерименті, представлено в табл. 3.9.

Таблиця 3.7 – Загальна матриця планування експерименту

№	Умовне позначення	Найменування факторів	Рівні варіювання		
			1	0	-1
1	λ	Теплопровідність газу, Вт/(м·°С)	0,01670	0,01635	0,02407
2	δ	Товщина скла, мм	6	5	4
3	b	Ширина камери склопакета, мм	14	12	10

Таблиця 3.8 – Реалізація плану експерименту

№	Тип склопакета	Тип газового заповнення	Код варіації	Значення опору теплопередачі
1	2	3	4	5
1	6M ₁ -14-6M ₁ -14-6i	Аргон	110	0,9970
2	6M ₁ -12-6M ₁ -12-6i		010	0,9940
3	6M ₁ -10-6M ₁ -10-6i		-110	0,9330
4	5M ₁ -14-5M ₁ -14-5i		100	0,9930
5	5M ₁ -12-5M ₁ -12-5i		000	0,9910
6	5M ₁ -10-5M ₁ -10-5i		-100	0,9300
7	4M ₁ -14-4M ₁ -14-4i		1-10	0,9890
8	4M ₁ -12-4M ₁ -12-4i		0-10	0,9870
9	4M ₁ -10-4M ₁ -10-4i		-1-10	0,9270
10	6M ₁ -14-6M ₁ -14-6i	Повітря	11-1	0,8410
11	6M ₁ -12-6M ₁ -12-6i		01-1	0,8140
12	6M ₁ -10-6M ₁ -10-6i		-11-1	0,7510
13	5M ₁ -14-5M ₁ -14-5i		10-1	0,8370
15	5M ₁ -10-5M ₁ -10-5i		00-1	0,8120
16	4M ₁ -14-4M ₁ -14-4i		-10-1	0,7480

1	2	3	4	5
17	4M ₁ -12-4M ₁ -12-4i	Повітря (5%) Аргон (95%)	0-1-1	0,8090
18	4M ₁ -10-4M ₁ -10-4i		-1-1-1	0,7450
19	6M ₁ -14-6M ₁ -14-6i		111	0,9870
20	6M ₁ -12-6M ₁ -12-6i		011	0,9830
21	6M ₁ -10-6M ₁ -10-6i		-111	0,9220
22	5M ₁ -14-5M ₁ -14-5i		101	0,9830
23	5M ₁ -12-5M ₁ -12-5i		001	0,9800
24	5M ₁ -10-5M ₁ -10-5i		-101	0,9190
25	4M ₁ -14-4M ₁ -14-4i		1-11	0,9790
26	4M ₁ -12-4M ₁ -12-4i		0-11	0,9760
27	4M ₁ -10-4M ₁ -10-4i		-1-11	0,9150

Таблиця 3.9 – Визначені коефіцієнти рівняння регресії, отримані в результаті планування експерименту

Найменування факторів	Визначені коефіцієнти регресії
$\delta \cdot \lambda$	0,000334
$b \cdot \lambda$	-0,006251
$b \cdot \delta$	0,000334
λ^2	-0,091501
Теплопровідність газу λ	0,080723
δ^2	-0,000166
Товщина скла δ	0,003388
b^2	-0,025665
Ширина камери склопакета b	0,036112
Сер. значення	0,988445

Перевірка адекватності рівняння регресії здійснювалася на основі дисперсійного аналізу, результати якого подано на рис. 3.11. Аналіз графіків і числових даних підтвердив відповідність моделі експериментальним результатам із прийнятним рівнем похибки.

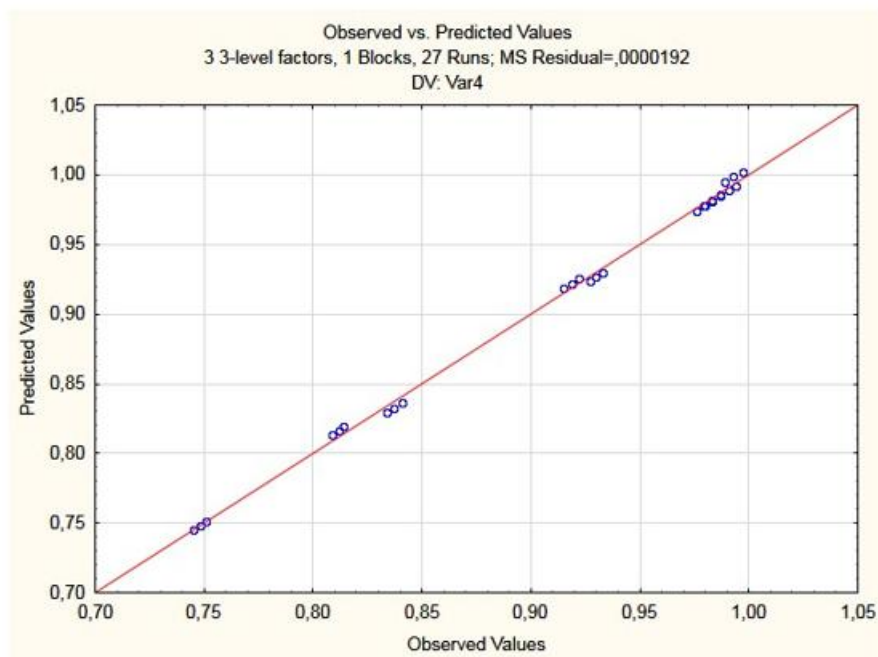


Рисунок 3.11 – Перевірка адекватності рівняння регресії

На основі табл.2.4 складено рівняння регресії, відповідно до якого опір теплопередачі центральної зони склопакета R_{cb} , $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$, рівний:

$$\begin{aligned}
 R_{cb} = & 0,988444 + 0,036111 \cdot b - 0,025667 \cdot b^2 + 0,003389 \cdot \delta - 0,000167 \\
 & \cdot \delta^2 + 0,080722 \cdot \lambda - 0,091500 \cdot \lambda^2 + 0,000333 \cdot b \cdot \delta - 0,006250 \\
 & \cdot b \cdot \lambda + 0,000333 \cdot \delta \cdot \lambda
 \end{aligned}
 \quad (3.6)$$

де b – ширина камери склопакета, мм; δ – товщина скла, мм; λ – теплопровідність газу, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

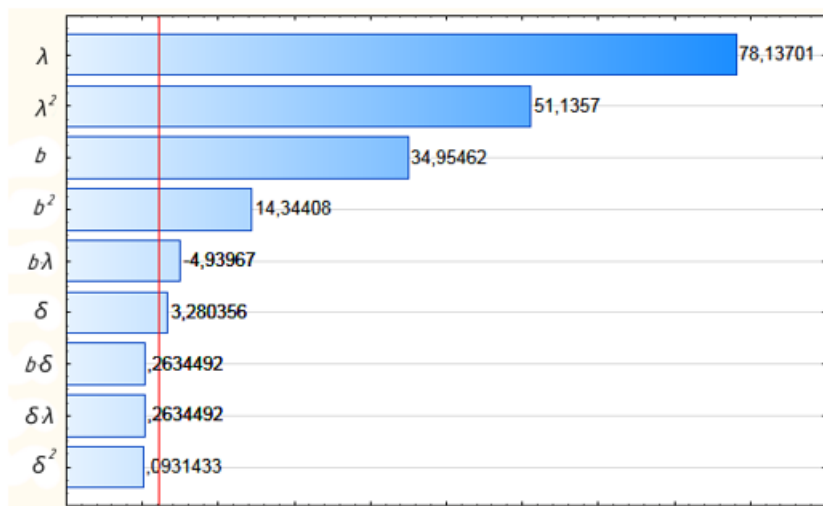


Рисунок 3.12 – Вплив коефіцієнтів рівняння на збільшення опору теплопередачі центральної зони склопакета

На рис. 3.12 показано, як зміна варійованих параметрів впливає на опір теплопередачі центральної частини склопакета. Основні висновки щодо характеру впливу:

- параметри з позитивними коефіцієнтами в рівнянні регресії вказують, що збільшення їхніх значень сприяє підвищенню опору теплопередачі.
- параметри з негативними коефіцієнтами мають зворотний ефект, тобто їх зниження також збільшує значення (R).
- наявність квадратичних членів у рівнянні свідчить про нелінійний характер впливу. Це означає, що кожен фактор має оптимальну зону, при виході за яку вплив змінюється на протилежний.

Результати дослідження продемонстрували, що найбільший вплив на теплотехнічні властивості склопакета має теплопровідність газового середовища (λ), що заповнює камери. Зменшення цього параметра дозволяє досягти найбільш суттєвого зростання опору теплопередачі.

Ширина камер (b) також чинить помітний вплив, але менш значущий порівняно з теплопровідністю газу. Оптимізація цього параметра має вагоме значення для поліпшення енергозберігаючих характеристик склопакетів.

Збільшення товщини скла (δ) впливає найменшою мірою, що пояснюється переважно високою теплопровідністю самого матеріалу скла. Тому його зміна є менш ефективною для покращення теплоізоляційних характеристик порівняно з іншими параметрами.

В якості варійованих факторів були прийняті:

- ✓ ширина камери склопакета;
- ✓ товщина скла;
- ✓ теплопровідність газу.

Вихідним параметром є вартість 1 м² склопакета. Ціни на склопакети були прийняті у відповідності до прайс-листа фірми **Rehau**.

Матриця планування експерименту і реалізація плану експерименту представлені в табл.3.7 і 3.10 відповідно. Коефіцієнти рівняння регресії, отримані в результаті планування експерименту, представлені в табл.3.11.

Таблиця 3.10 – Реалізація плану експерименту

№	Формула склопакета	Наповнення камер	Код	Ціна, грн
1	2	3	4	5
1	4M ₁ -10-4M ₁ -10-4i	Повітря	-1-1-1	3200
2	4M ₁ -12-4M ₁ -12-4i		0-1-1	3355
3	4M ₁ -14-4M ₁ -14-4i		1-1-1	3650
4	5M ₁ -10-5M ₁ -10-5i		-10-1	4209
5	5M ₁ -12-5M ₁ -12-5i		00-1	4355
6	5M ₁ -14-5M ₁ -14-5i		10-1	4484
7	6M ₁ -10-6M ₁ -10-6i		-11-1	4512
8	6M ₁ -12-6M ₁ -12-6i		01-1	4540

1	2	3	4	5
9	6M _I -14-6M _I -14-6i	Аргон	11-1	4580
10	4M _I -10-4M _I -10-4i		-1-10	3320
11	4M _I -12-4M _I -12-4i		0-10	3400
12	4M _I -14-4M _I -14-4i		1-10	3510
13	5M _I -10-5M _I -10-5i		-100	3655
14	5M _I -12-5M _I -12-5i		000	4370
15	5M _I -14-5M _I -14-5i		100	4420
16	6M _I -10-6M _I -10-6i		-110	4461
17	6M _I -12-6M _I -12-6i		010	4585
18	6M _I -14-6M _I -14-6i		110	4756
19	4M _I -10-4M _I -10-4i	Повітря (5%) Аргон (95%)	-1-11	3350
20	4M _I -12-4M _I -12-4i		0-11	3400
21	4M _I -14-4M _I -14-4i		1-11	3700
22	5M _I -10-5M _I -10-5i		-101	4254
23	5M _I -12-5M _I -12-5i		001	4435
24	5M _I -14-5M _I -14-5i		101	4529
25	6M _I -10-6M _I -10-6i		-111	4556
26	6M _I -12-6M _I -12-6i		011	4585
27	6M _I -14-6M _I -14-6i		111	4595

Таблиця 3.11 – Коефіцієнти рівняння регресії, отримані в результаті планування експерименту

Назва факторів варіювання	Коефіцієнт регресії
Середнє значення	4263,222
Ширина камери склопакета b	150,389
b^2	-17,167
Товщина скла δ	571,389

δ^2	-298,167
Теплопровідність газу λ	28,833
λ^2	74,167
$b \cdot \delta$	-49,000
$b \cdot \lambda$	-10,750
$\delta \cdot \lambda$	-11,750

Перевірка адекватності рівняння регресії представлена на рис.3.13.

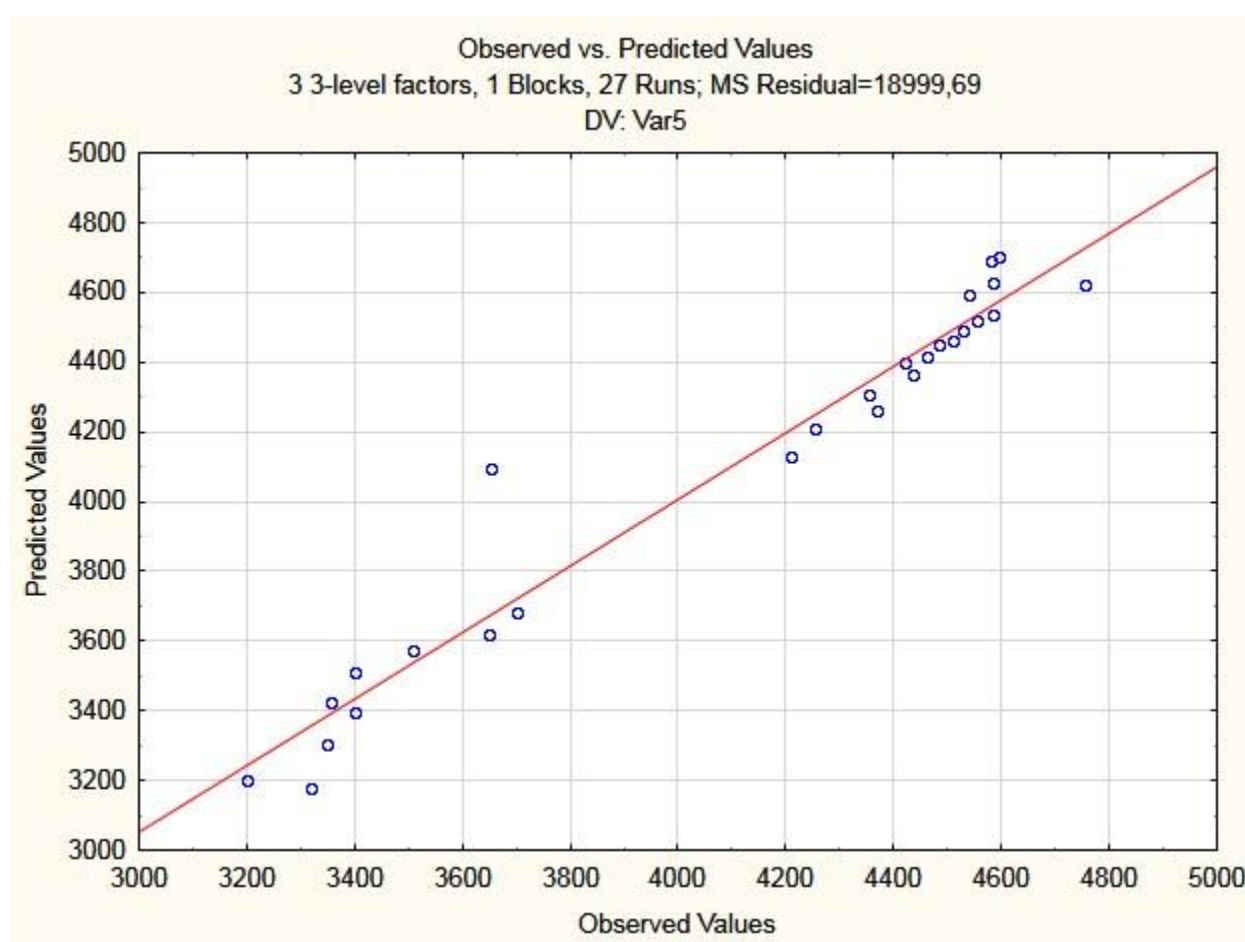


Рисунок 3.13 – Перевірка адекватності рівняння регресії

На основі табл.3.11 складено рівняння регресії, відповідно до якого 1 м² склопакета C , грн., рівний:

$$C = 4263,2 + 150,389 \cdot b - 17,167 \cdot b^2 + 571,389 \cdot \delta - 298,167 \cdot \delta^2 + 28,833 \cdot \lambda + 74,167 \cdot \lambda^2 - 49 \cdot b \cdot \delta - 10,750 \cdot b \cdot \lambda - 11,750 \cdot \delta \cdot \lambda \quad (3.7)$$

де b – ширина камери склопакета, мм;

δ – товщина скла, мм;

λ – теплопровідність газу, Вт/(м·°C).

Вплив коефіцієнтів рівняння на збільшення ціни склопакетів представлено на рис.3.14.

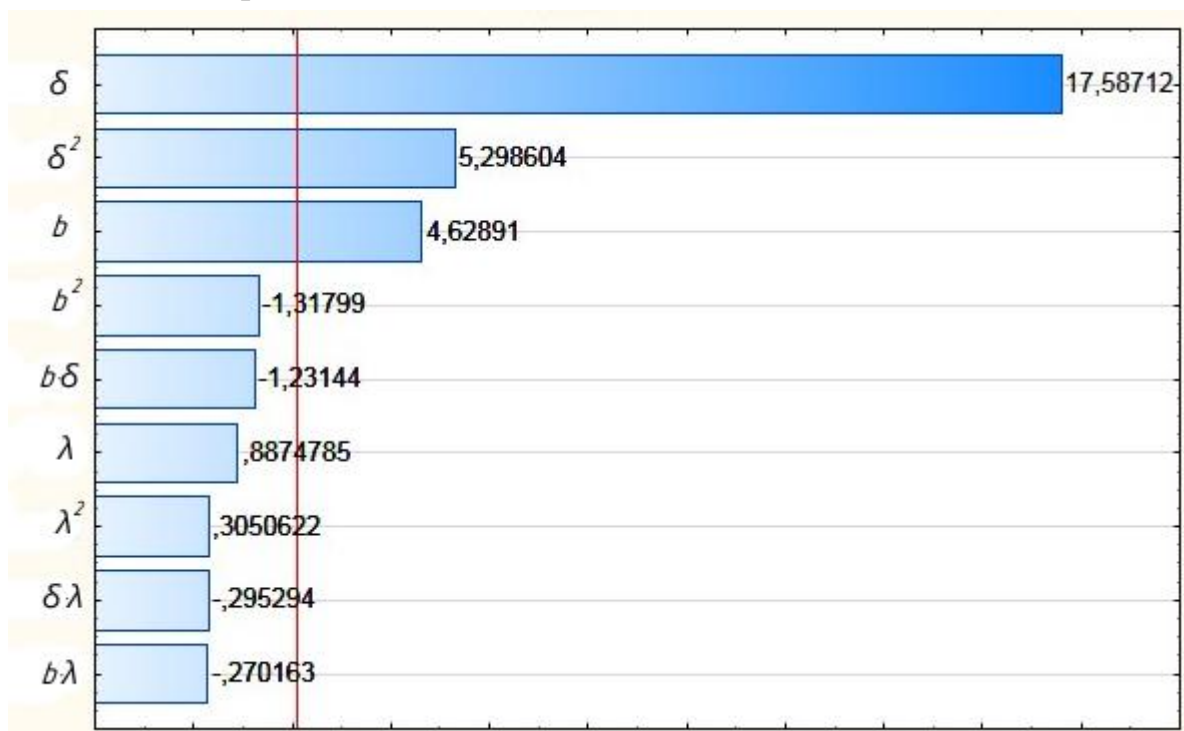


Рисунок 3.14 – Вплив коефіцієнтів рівняння на збільшення ціни склопакетів

Коефіцієнти регресії, що мають позитивний знак означає, що зниження вхідного параметра фактору варіювання зменшує вартість 1 м² склопакета.

Квадратичні члени рівняння регресії вказують, що є значення, при яких зміна варійованого параметру відносно будь-якого його значення призведе до зміни впливу цього фактору на вартість 1 м² склопакета на протилежне значення.

Коефіцієнти регресії, що мають негативний знак означають, що зниження вхідного параметру фактора варіювання збільшує вартість 1 м² склопакета.

Аналіз рівняння регресії дозволяє констатувати, що найбільший вплив на збільшення ціни 1м² склопакета чинить збільшення товщини стекол (δ). Менший вплив чинить ширина камер склопакета (b). Найбільш незначний вплив чинить заповнення камер склопакета газом (λ).

Отримані формули (3.6) та (3.7) дозволяють оптимізувати параметри склопакетів з позиції економічної доцільності і нормування приведенного опору теплопередачі. Це можливо зробити за допомогою функції бажаності Харрінгтона.

Застосування функції Харрінгтона дозволяє знайти максимальне значення опору теплопередачі на рівні мінімальних витрат на склопакети в діапазоні, що розглядався. Тобто, вихідним параметром опору теплопередачі присвоювалося максимальне значення – «1», а вихідним параметрам ціни присвоювалося мінімальне значення – «0».

Шкала бажаності відноситься до психофізичних шкал. Її призначення – встановити відповідність між фізичними і психологічними параметрами.

Стандартні відмітки на шкалі бажаності Харрінгтона представлені в табл.3.12.

Таблиця 3.12 – Стандартні відмітки на шкалі бажаності Харрінгтона

Бажаність	Значення
Дуже добре	1,00 – 0,80
Добре	0,80 – 0,63
Задовільно	0,63 – 0,37
Погано	0,37 – 0,20
Дуже погано	0,20 – 0,00

Залежність функції бажаності від параметрів конструкції склопакетів представлені на рис.3.15 – 3.17 відповідно. Розрахунок передбачених значень і функції бажаності представлені на рис.3.18.

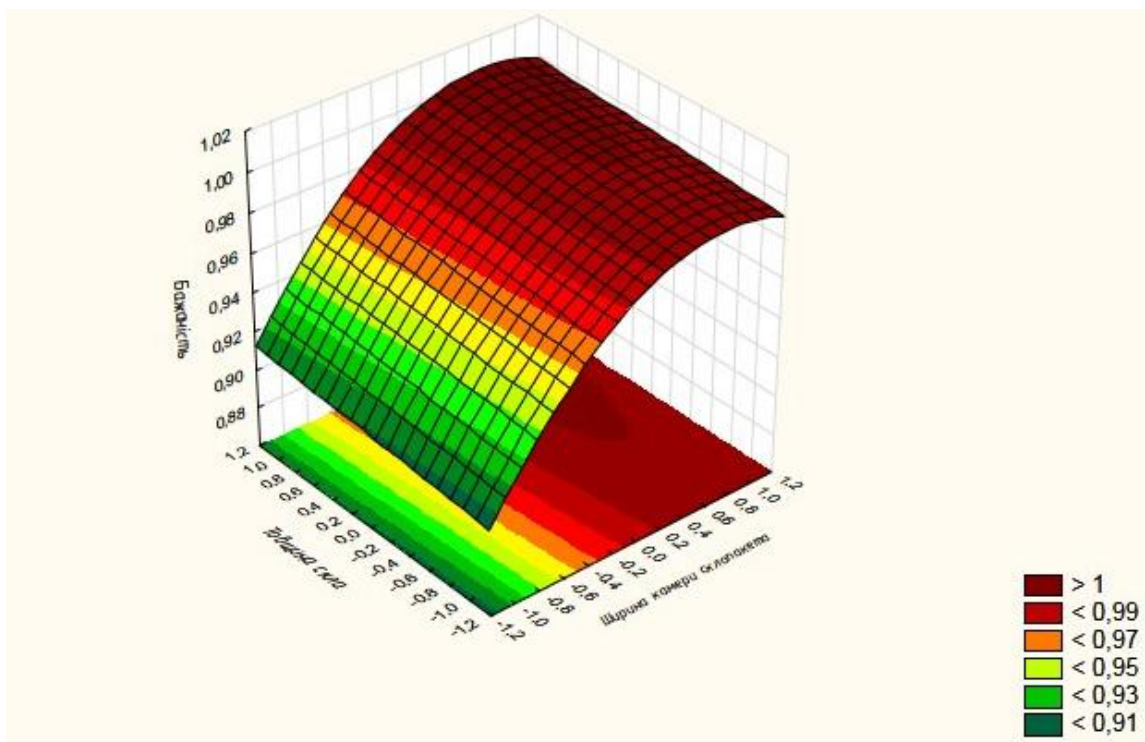


Рисунок 3.15 – Залежність функції бажаності від товщини стекол і ширини камер склопакета

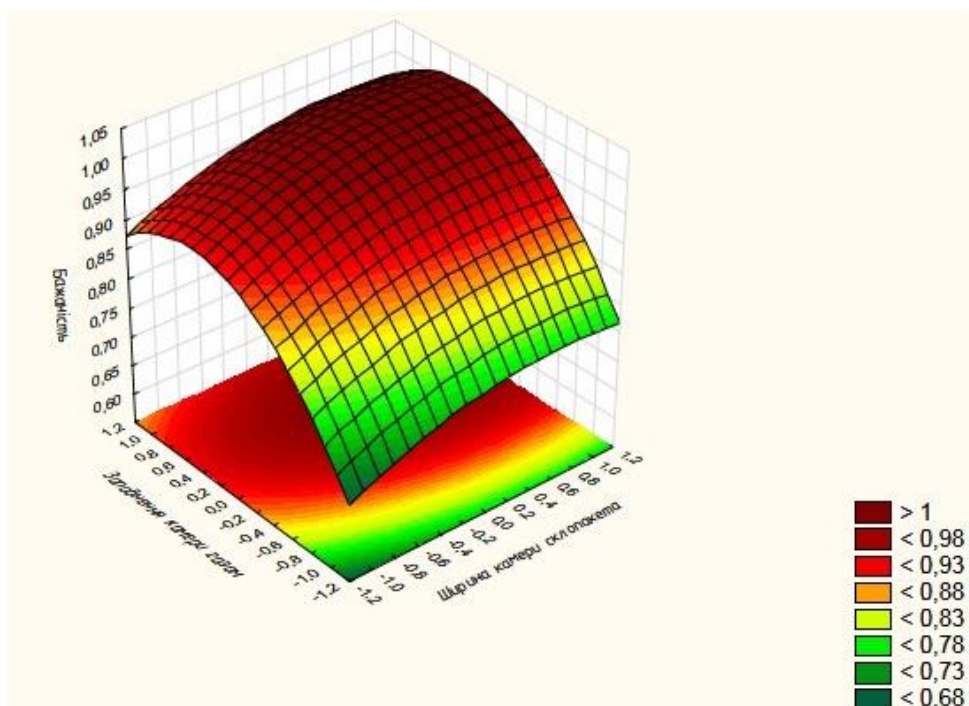


Рисунок 3.16 – Залежність функції бажаності від ширини і заповнення камер склопакета

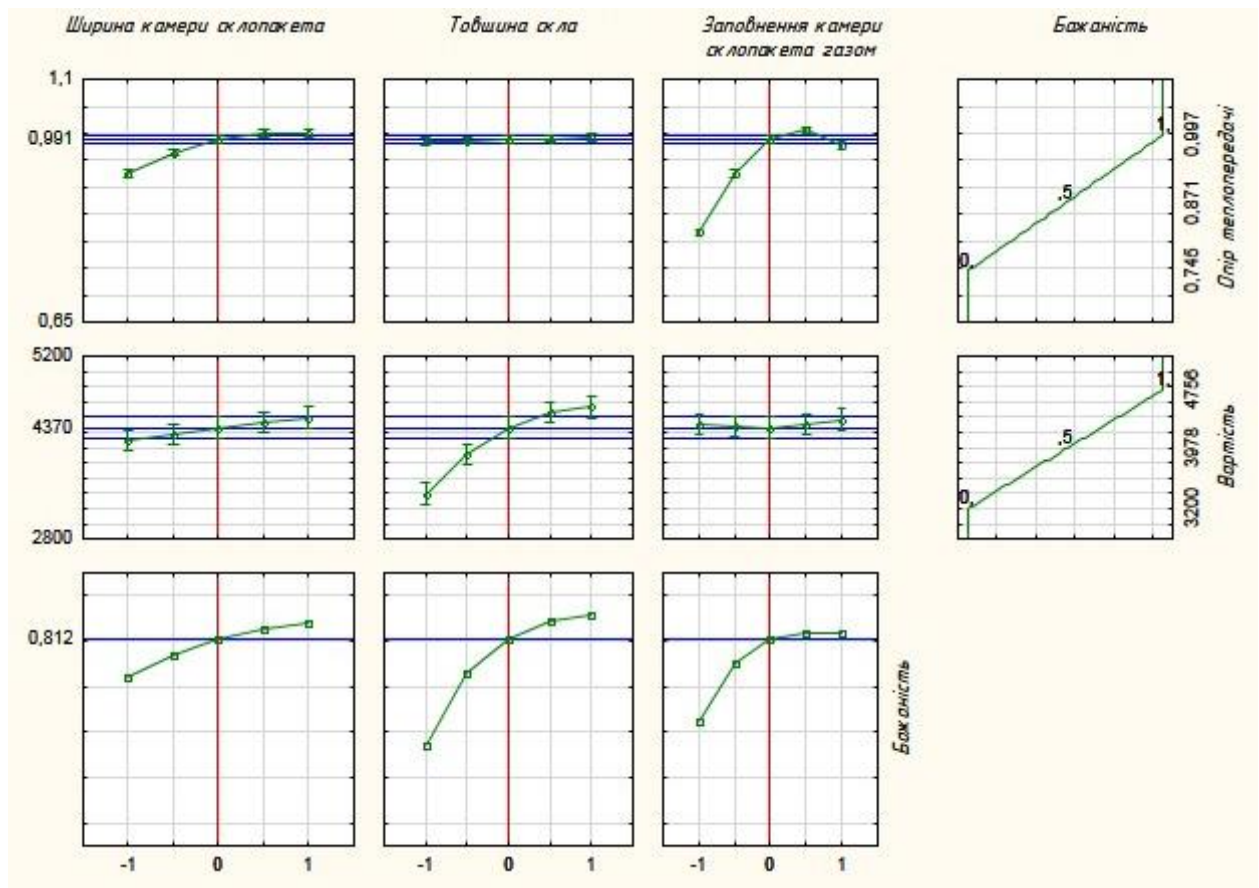


Рисунок 3.17 – Залежність функції бажаності від заповнення склопакета газом і товщини стекол

Виходячи з рис.3.18, можна зробити висновок, що максимальний опір теплопередачі центральної зони скло пакета ($R_{cv} = 0,987 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$) при мінімальній вартості 1 м^2 ($C = 4370 \text{ грн}$) досягається при ширині камер склопакета 12 мм (0), заповнених аргоном (0) і товщині стекол 5 мм.

Таким чином, для м. Кропивницький з позиції теплотехнічних якостей і грошових вкладень доцільним буде використання віконних блоків зі склопакетом 5M₁-12Ar-5M₁-12Ar-5i.

Висновки по розділу 3.

1. Дослідження методики [57] та результати комп'ютерного моделювання у середовищі Window 7.7 виявили залежність термічного опору R_{cv} від характеристик газового наповнення камер, які змінюються під впливом температурного режиму докiлля та приміщення. У конструкціях зі склом M_1 зниження зовнішньої температури при незмінних внутрішніх умовах спричиняє охолодження міжскляного простору та підвищення термоопору. Натомість, склопакети з I -склом демонструють протилежну тенденцію - зниження термічного опору при охолодженні зовнішнього середовища. Встановлено домінування радіаційної складової теплопередачі над конвективною, при цьому низькоемісійні покриття суттєво знижують радіаційні тепловтрати.

2. Розроблено методику визначення нормативного термоопору центральної зони склопакетів для м. Кропивницький з урахуванням геометричних параметрів віконних конструкцій.

3. За результатами аналізу поелементних вимог теплозахисту м. Кропивницький встановлено невідповідність склопакетів без низькоемісійного покриття чинним нормативам. Техніко-економічна оптимізація засвідчила доцільність застосування конструкції 5M1-12Ar-5M1-12Ar-5i, що забезпечує термоопір центральної зони $0,987 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$ при вартості 4370 грн/м².

4. Запропоновано математичну модель для прогнозування втрат інертного газу. Розрахунки показують зниження термоопору центральної зони склопакета 5M1-12Ar-5M1-12Ar-5i на 3,83% впродовж 30-річного терміну експлуатації.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СКЛОПАКЕТІВ З ЕНЕРГООЩАДНИМ ПОКРИТТЯМ ТА АРГОНОВИМ НАПОВНЕННЯМ

У сучасному будівництві питання енергоефективності та зниження теплових втрат є одними з найактуальніших. Вікна займають важливе місце у конструкції будівлі, адже вони є одними з основних шляхів втрати тепла, а також впливають на комфорт мешканців та споживання енергії для обігріву та охолодження приміщень. У зв'язку з цим, в останні десятиліття велике значення набувають інноваційні рішення, які дозволяють підвищити теплоізоляційні характеристики віконних конструкцій, серед яких особливе місце займають склопакети з низько-емісійним склом і заповненням камер аргоном.

Одним з ключових елементів, що визначають теплоізоляційні властивості склопакетів, є газ, яким заповнюються міжстикові камери. Найпоширенішим газом, який використовується для цього, є аргон. Аргон — інертний газ, що має низьку теплопровідність, що дозволяє значно знизити теплові втрати через вікна.

Заповнення міжскляних камер аргоном дозволяє збільшити загальний коефіцієнт опору теплопередачі віконного блоку. Аргон, через свою щільність і молекулярну структуру, значно зменшує теплообмін між внутрішнім і зовнішнім середовищем, що сприяє підтриманню стабільної температури в приміщеннях. Це особливо важливо для регіонів з холодним кліматом, де теплоізоляційні властивості вікон відіграють вирішальну роль у забезпеченні енергозбереження.

Однією з основних переваг таких склопакетів є значне зниження теплових втрат через вікна. Завдяки поєднанню низько-емісійного скла та аргону, вдається досягти значно кращих показників теплоізоляції порівняно з традиційними склопакетами. Це дозволяє знизити витрати на опалення в

зимовий період і на кондиціонування в літній, що в результаті веде до економії енергії і зниження витрат на комунальні послуги.

Окрім цього, низько-емісійне скло дозволяє зберігати природну освітленість у приміщенні, не дозволяючи при цьому теплу виходити через вікна. Це має значення не тільки для енергозбереження, але й для покращення якості освітлення в приміщеннях, що сприяє комфорту і зменшенню потреби в штучному освітленні протягом дня.

Такі склопакети також забезпечують кращу шумоізоляцію, що особливо важливо для житлових будівель, розташованих в міських умовах з високим рівнем шумового забруднення. Завдяки герметичності конструкцій і властивостям матеріалів, з яких виготовляються склопакети, вдається значно знизити рівень шуму, що проникає ззовні.

Впровадження склопакетів з низько-емісійним склом та заповненням камер аргонном має не лише технічні, але й економічні переваги. Хоча початкові витрати на виготовлення і монтаж таких конструкцій можуть бути вищими, ніж у випадку зі стандартними віконними блоками, довгострокова економія на енерговитратах виправдовує ці витрати. Зниження витрат на опалення та кондиціонування, що досягається завдяки покращеним теплоізоляційним властивостям, дозволяє повернути вкладені кошти за кілька років експлуатації.

Крім того, впровадження енергоефективних технологій у будівництво є важливим кроком у напрямку до сталого розвитку та зменшення викидів парникових газів. Зменшення споживання енергії на опалення і охолодження будівель сприяє зниженню навантаження на енергетичну інфраструктуру і зменшенню екологічного впливу.

4.1. Інтенсивність втрати інертного газу зі склопакетних конструкцій впродовж тривалого періоду експлуатації

Наразі українське законодавство керується стандартом ДСТУ Б EN 1279-3:2013, що регламентує методологію випробування довговічності та

нормативи щодо втрати газу. Цей документ є ідентичним європейському EN 1279-3:2002.

За вимогами стандарту, річна втрата газу L_i , % для концентрацій понад 15% не повинна перевищувати 1%. Водночас примітка зазначає, що реальні показники після десятирічної експлуатації зазвичай суттєво нижчі за лабораторні дані.

Показовим є досвід польських досліджень, де заміри газонаповнення десятирічних віконних конструкцій продемонстрували десятикратно кращі результати порівняно з лабораторними тестами за DIN 52293. Аналіз методики штучного старіння за СТБ EN 1279-3-2014 виявив подібність до українського стандарту.

Практика свідчить: конструкції з початковою втратою $L_i < 1$ % щорічно демонструють сумарні втрати менше 5% за 25-річний термін. Консервативна оцінка передбачає подвоєння швидкості витоку щодесятиліття.

Математичне вираження частки втрат інертного газу L_i описується формулою:

$$L = 1 + 0,6 \cdot (N - 1), \quad (4.1)$$

де N – позначає рік експлуатації від моменту монтажу.

4.2. Динаміка теплозахисних властивостей центральної зони склопакета з врахуванням міграції аргону

Оптимізаційні розрахунки для м. Кропивницького визначили оптимальну конфігурацію 5M1-12Ar-5M1-12Ar-5i. Базово було прийнято, що заводський вміст аргону в склопакетах становить 100%. Моделювання в середовищі Window 7.7 було виконано, виходячи із наявної інформації та досвіду експлуатації.

Таблиця 4.1 – Характер зміни базових характеристик склопакета з урахуванням дифузії аргону з плином часу

Рік експлуатації	$L, \%$	Вміст аргону, %	Вміст повітря, %	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$R_{\text{св}}, (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$	$t_{\text{св}}, ^\circ\text{C}$
1	1,00	99,00	1,00	0,0164200	0,9890	15,60
5	3,40	96,60	3,40	0,0165620	0,9840	15,50
10	6,40	93,60	6,40	0,0167760	0,9780	15,50
15	9,40	90,60	9,40	0,0169310	0,9780	15,50
20	12,40	87,60	12,40	0,0172070	0,9650	15,40
25	15,40	84,60	14,40	0,0174250	0,9590	15,40
30	18,40	81,60	18,40	0,0176440	0,9530	15,40

За результатами досліджень, початковий опір теплопередачі 0,991 ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ знизився до 0,953 ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$, що відповідає нормативам міста. Загальне зниження ефективності становить 3,83%. Тобто, даний вид склопакетів може бути рекомендований до широкого впровадження в адміністративних будівлях міста.

Висновки до розділу 4

1. Використання склопакетів з низько-емісійним склом і заповненням камер аргонм є ефективним способом значного зменшення теплових втрат через вікна. низько-емісійне покриття відображає інфрачервоне випромінювання, що дозволяє утримувати тепло всередині приміщення, а заповнення камер аргонм значно знижує теплопередачу. це дозволяє забезпечити комфортні температурні умови в приміщеннях при мінімальних витратах енергії.

2. Економічна ефективність в довгостроковій перспективі: хоча початкові витрати на монтаж таких склопакетів можуть бути вищими, ніж для стандартних конструкцій, значна економія на витратах на енергію, зокрема на

опалення та кондиціювання, дозволяє окупити ці витрати протягом кількох років. зниження витрат на енергоспоживання також сприяє зменшенню навантаження на енергетичні ресурси, що є важливим аспектом в умовах глобального зростання попиту на енергію.

3. Вплив на екологічну ситуацію: підвищення енергоефективності будівель є важливою складовою стратегії зменшення викидів парникових газів. використання енергоефективних технологій, таких як склопакети з низько-емісійним склом і заповненням аргонном, дозволяє скоротити споживання енергії, що в свою чергу знижує викиди CO_2 , особливо в країнах, де енергетика базується на викопних видах палива. це має важливе значення для досягнення цілей щодо сталого розвитку та боротьби зі зміною клімату.

4. Збільшення комфорту та зниження шумового забруднення: одним з додаткових переваг таких склопакетів є покращення звукоізоляції. заповнення камер аргонном та герметичність конструкцій склопакетів дозволяє значно зменшити рівень шуму, що проникає ззовні, особливо в умовах міського середовища. це сприяє покращенню якості життя мешканців, зокрема в районах з високим рівнем шуму, що є важливим аспектом для здоров'я та добробуту людей.

Таким чином, застосування склопакетів з низько-емісійним склом і заповненням камер аргонном є не лише технічним рішенням для поліпшення теплоізоляційних властивостей будівель, але й економічно доцільним та екологічно важливим кроком для досягнення більш сталого, енергоефективного та комфортного середовища.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі досліджено методи підвищення рівня енергоефективності адміністративних будівель. Особливу увагу приділено аналізу технічних, організаційних та економічних аспектів впровадження енергоефективних заходів, враховуючи специфіку адміністративних будівель в Україні.

Отримано наступні основні результати:

1. Адміністративні будівлі, займають значну частку в загальному енергоспоживанні, що складає близько 40%. При цьому втрати енергії в таких будівлях є суттєвими та потребують особливої уваги для підвищення ефективності використання ресурсів. Аналіз поточної ситуації з енергоефективністю в Україні виявив нераціональне використання енергетичних ресурсів. Рівень енергетичної залежності перевищує 50%, що є значно вищим, ніж у країнах ЄС і більшості інших розвинутих держав, де цей показник є набагато нижчим.

2. Оцінка енергоефективності адміністративних будівель в Україні показала, що основні тепловтрати через огорожувальні конструкції складають близько 70%, у той час як у країнах з розвинутою економікою цей показник варіюється від 38% до 44%. Однак існує великий потенціал для зниження цих втрат, що може досягати 50%. Детальний аналіз теплових втрат у будівлях вказує на те, що найбільші енергетичні втрати виникають через світлопрозорі огорожувальні конструкції фасадів, зокрема через склопакети, які складають 35% від загальних втрат енергії. Тому зменшення втрат через ці елементи є ключовим напрямком для покращення енергоефективності будівель.

3. Методологія дослідження теплофізичних процесів у світлопрозорих конструкціях є важливим інструментом для оцінки енергетичної ефективності та теплопередачі цих конструкцій. Врахування різних параметрів, таких як властивості матеріалів, конструктивні особливості та умови навколишнього середовища, дозволяє отримати точні моделі теплообміну та забезпечити

оптимізацію характеристик конструкцій. Використання сучасних програмних комплексів, таких як Window 7.7 і MathCad, надає можливість проводити складні розрахунки та симуляції, що забезпечують високу точність результатів. Вони дозволяють враховувати різноманітні фактори, включаючи зміну характеристик газу в камерах склопакетів, що є важливим для розвитку енергозберігаючих технологій у будівництві.

4. Методи планування експериментів і статистичного аналізу, що використовуються для оптимізації параметрів конструкцій, дозволяють забезпечити точність і надійність отриманих результатів. Планування експериментів дає змогу визначити кількість та умови проведення випробувань, необхідних для досягнення заданої точності, а статистичний аналіз в програмі «STATISTICA» допомагає оцінити значимість коефіцієнтів регресії та перевірити адекватність математичних моделей. Такий комплексний підхід дозволяє ефективно вирішувати задачі, пов'язані з поліпшенням енергетичної ефективності та оптимізацією теплофізичних характеристик світлопрозорих конструкцій у сучасному будівництві.

5. Результати комп'ютерного моделювання у середовищі Window 7.7 виявили залежність термічного опору R_{ce} від характеристик газового наповнення камер, які змінюються під впливом температурного режиму довкілля та приміщення. У конструкціях зі склом M_1 зниження зовнішньої температури при незмінних внутрішніх умовах спричиняє охолодження міжскляного простору та підвищення термоопору. Натомість, склопакети з I -склом демонструють протилежну тенденцію - зниження термічного опору при охолодженні зовнішнього середовища. Встановлено домінування радіаційної складової теплопередачі над конвективною, при цьому низькоемісійні покриття суттєво знижують радіаційні тепловтрати.

6. Розроблено методику визначення нормативного термоопору центральної зони склопакетів для м. Кропивницький з урахуванням геометричних параметрів віконних конструкцій. За результатами аналізу поелементних вимог теплозахисту м. Кропивницький встановлено

невідповідність склопакетів без низькоемісійного покриття чинним нормативам. Техніко-економічна оптимізація засвідчила доцільність застосування конструкції 5M1-12Ar-5M1-12Ar-5i, що забезпечує термоопір центральної зони $0,987 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$ при вартості 4370 грн/м². Запропоновано математичну модель для прогнозування втрат інертного газу. Розрахунки показують зниження термоопору центральної зони склопакета 5M1-12Ar-5M1-12Ar-5i на 3,83% впродовж 30-річного терміну експлуатації.

7. Використання склопакетів з низько-емісійним склом і заповненням камер аргоном є ефективним способом значного зменшення теплових втрат через вікна. низько-емісійне покриття відображає інфрачервоне випромінювання, що дозволяє утримувати тепло всередині приміщення, а заповнення камер аргоном значно знижує теплопередачу. це дозволяє забезпечити комфортні температурні умови в приміщеннях при мінімальних витратах енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кращі практики та поради щодо створення енергоефективних ЦНАП в ОТГ. Посібник “U-LEAD з Європою” – 2019, 176 с. Режим доступу: <https://tsnap.ulead.org.ua/wp-content/uploads/2019/11/Posibnyk-z-energoefektyvnosti-ta-stalogo-rozvytku.pdf>
2. Закон України “Про енергетичну ефективність будівель”. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>
3. Наказ Міністерства розвитку громад та територій України №261 від 27.10.20
4. ДСТУ Б В.2.6-23:2009. Конструкції будинків і споруд. Блоки віконні та дверні. Загальні технічні умови : ДСТУ Б В.2.6-23:2009 – [Чинний від 2009-08-01]. – К. : ВАТ Український зональний науково-дослідний і проективний інститут по цивільному будівництву, 2009. – IV, 36 с. – (Національний стандарт України)
5. Будівельні матеріали. Склопакети клеєні будівельного призначення. Технічні умови: ДСТУ Б В.2.7-107:2008. – [Чинний від 01.01.2010]. К. : Держ. Ком. України у справах містобудування і архітектури, 2010. – 38 с. – (Нац. стандарт України).
6. Фаренюк Є.Г. Тепловий режим світлопрозорих огорожувальних конструкцій сучасних багатоповерхових будівель: дисертація канд. техн. наук: 05.23.01 / Нац. унів. водного господарства та природокористування. Рівне, 2015. 172 с.
7. ДСТУ Б В.2.7-107:2008. Будівельні матеріали. Склопакети клеєні будівельного призначення. [На заміну ДСТУ Б В.2.7-107-2001 (ГОСТ 24866-99); чинний від 01.01.2010]. Вид. офіц. Київ: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2009. 32 с.
8. Пластиковые окна. Информационный портал [Електронний ресурс]: Виды стеклопакетов пластиковых окон– Режим доступу: <https://okna-biz.ru/steklopaket-i-stekla/vidy-steklopaketov-plastikovyyh-okon/>

9. Досвід країн Євросоюзу з підвищення енергоефективності, енергоаудиту та енергоменеджменту з енергоощадності в економіці країн. Режим доступу: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/Pidvyshhennya-energoefektyvnosti-v-YES.pdf>

10. National Energy Efficiency Action Plan. Through 2020 / [U.S. Department of Energy]. – Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, 2014. – 112 с.

11. База даних енергетичних сертифікатів (станом на 04.02.2021 року)

12. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель / [Мінрегіон України]. – Київ: Міністерство розвитку громад та територій України, 2021. – 90 с.

13. BMWi Brochure Energy Efficiency Strategy for Buildings / [BMWi]. – Berlin: Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, 2018.

14. Buildings Energy Efficiency in China, Germany, and the United States / [Koehler, M., et al.]. – Berlin: Springer, 2020.

15. Energy Efficiency Policies in the German Energy Transition / [Löschel, A., et al.]. – Munich: Springer Vieweg, 2019.

16. Nadel, S., Elliott, N., Langer, T. Energy Efficiency in the United States: 35 Years and Counting / [Nadel, S., et al.]. – Washington, D.C.: American Council for an Energy-Efficient Economy, 2015.

17. Energy Information Administration - EIA - Official Energy Statistics from the U.S. Government (EIA 2015c) / [EIA]. – Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, 2015.

18. Department of Energy in USA (DOE 2012) / [DOE]. – Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, 2012.

19. Energy Efficiency Trends in Buildings in Europe / [European Commission]. – Brussels: European Commission, 2020.

20. Upgrading of the Non-Residential Building Stock Towards nZEB Standard / [Euroconstruct]. – Paris: Euroconstruct, 2018.

21. Energy Performance of Buildings Directive: Policies and Impact / [European Commission]. – Brussels: European Commission, 2019.
22. International Energy Agency: The Future of Energy Efficiency / [IEA]. – Paris: International Energy Agency, 2017.
23. Енергоефективність в муніципальному секторі. Навчальний посібник для посадових осіб місцевого самоврядування /А.Максимов та ін./ Асоціація міст України – К., ТОВ «ПІДПРИЄМСТВО «ВІ ЕН ЕЙ», 2015. –184 с.
24. Arasteh, D., H. Goudey, and C. Kohler. Highly Insulating Glazing Systems using NonStructural Center Glazing Layers. in 2008 Annual ASHRAE Meeting. 2008.
25. ISO, NS-ISO 15099 – Thermal performance of windows, doors and shading devices – Detailed calculations. 2003, International Organization for Standardization.
26. Christensen, T., Levetid for gasfyldte isoleringsruter, E.f. 81, Editor. 1983, Jydsk Teknologisk Institut: Århus
27. Gustavsen, A., B.P. Jelle, D. Arasteh, and C. Kohler, State-of-the-art highly insulating window frames - research and market review, SINTEF Building and Infrastructure, Project report 6, ISBN:978-82-536-0958-4. 2007.
28. Elmahdy, A.H. and S.A. Yusuf, Determination of Argon Concentration and Assessment of the Durability of High-Performance Insulating Glass Units Filled with Argon Gas. ASHRAE 1995. 101: p. 1026-1040.
29. Standardiseringsråd, D., Determination of the ability of sealed glazing units to resist accelerated climatic strains, in DS 1094.4. 1983.
30. Olsson-Jonsson, A. Energy-efficient windows - for how long? Gas concentration in sealed glazing units. in Proceedings of the 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries. 2005. The Icelandic Building Research Institute, Reykjavik.

31. ASTM, G173 - 03(2012) "Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface". 2012: PA 2012.
32. Jelle, B.P., Solar radiation glazing factors for window panes, glass structures and electrochromic windows in buildings - Measurement and calculation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2013. 116: p. 291-323.
33. Світлопрозорі огорожувальні конструкції: проектування та монтаж / [Чернишенко О.В., Козлов І.С.]. – Київ: Вища школа, 2021. – 230 с.
34. Сучасні матеріали для виготовлення віконних конструкцій / [Заболотний В.П., Мельниченко О.М.]. – Львів: Новий Світ, 2018. – 142 с.
35. Білоус О.М. Конструктивні принципи забезпечення енергоефективності світлопрозорих огорожувальних конструкцій/ О.М. Білоус, Є.С. Колесник: Сучасне промислове та цивільне будівництво, 2011, Том 7, номер 4.
36. Оптимізація параметрів світлопрозорих конструкцій/ [Марущак У.Д., Позняк О.Р., Солтисік Р.А, Проць Є]: *Theory and Building Practice*, Vol.1, No.2, – 2019.
37. Міщенко Р.А. Теплопровідність склопакетів у світлопрозорих огорожувальних конструкціях: Полтавський НТУ ім. Юрія Кондратюка.
38. Мартинюк М.О. Енергоефективні рішення у модернізації адміністративних будівель // *Технічні науки та енергетика*, №5, 2020.
39. Brown L., Davis K. Solar Integration in Administrative Facilities // *Renewable Energy Journal*, Vol.39, No.4, 2020.
40. Smith J., Johnson P. Energy Efficiency Optimization in Office Buildings // *Journal of Building Physics*, Vol.45, No.2, 2021.
41. Müller H., Schmidt P. Passive Building Design for Administrative Structures // *Sustainable Construction Research*, Vol.12, No.3, 2020.
42. Towards energy efficiency: Retrofitting existing office buildings using smart technologies / [Vasilis, A., King, J., Perry, C.] // *Journal of Engineering and Applied Science* – 2023.

43. Factors influencing energy-efficiency retrofits in commercial and institutional buildings: A systematic literature review / [Ortiz, M., Maslesa, E., Paone, A., Hashempour, R.] // *Journal of Facility Management Education and Research* – 2022.

44. Enhancing energy efficiency in office buildings: Analysis of smart technologies / [Albornoz, F., Smith, L., Wei, X.] // *Sustainable Cities and Society*, Vol. 52 – 2020

45. Green retrofitting strategies for non-residential buildings / [Sharma, A., Kumar, A., Dubey, R.] // *Energy and Buildings*, Vol. 178 – 2021.

46. The role of building automation systems in achieving energy efficiency goals / [Liang, Z., Andersson, C., Green, P.] // *Renewable Energy Reviews* – 2022.

47. Assessing the impact of passive design measures on office building energy consumption / [Medal, B., Kim, J.] // *Energy Procedia*, Vol. 147 – 2020.

48. Comprehensive analysis of renewable energy integration in commercial buildings / [Park, S., Müller, T., Tran, H.] // *Energy Reports*, Vol. 6 – 2021.

49. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель: [ДБН В.2.6-31:2021]. – Київ: Мінрегіон України, 2021.

50. Будівлі та споруди. Захист від тепловтрат: [ДСТУ-В.2.6-146:2010]. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2010.

51. Конструкції будівель і споруд. Теплофізичні характеристики: [ДСТУ Б В.2.6-17-2000]. – Київ: Мінбуд України, 2000.

52. Склопакети для будівель. Визначення теплових характеристик: [ДСТУ EN 673:2009]. – Київ: ДП "Укрархбудінформ", 2009.

53. Планування експерименту в дослідженнях технологічних процесів / [Громов В.І., Козлов С.М., Сидоренко О.Л.]. – Київ: Наукова думка, 2018. – 256 с.

54. Методи математичного планування експерименту / [Гусєв О.О., Лобанов М.В., Михайлюк Ю.М.]. – Харків: ХНУРЕ, 2016. – 312 с.

55. Теорія і практика планування експерименту / [Смоляр Л.Г., Рудакевич А.С.]. – Львів: Видавництво ЛНУ, 2018. – 300 с.

56. Склопакети для будівель. Теплотехнічні характеристики. Розрахунок теплового опору та коефіцієнта теплопередачі / [ДСТУ Б EN ISO 10077]. – Київ: Мінрегіон України, 2018.

57. Математичне планування експерименту: навчальний посібник / [Омельченко О.А., Павлюк В.В.]. – Київ: КНЕУ, 2017. – 240 с.

58. Будівельні конструкції. Конструкції будинків і споруд. Навантаження та впливи / [ДСТУ Б В.2.6-23-2009]. – Київ: ДП "Укрархбудінформ", 2009.

59. Конструкції будинків і споруд. Вікна і двері. Загальні технічні умови / [ДСТУ Б В.2.6-15-2011]. – Київ: Мінрегіон України, 2011.

ДОДАТКИ

Додаток А. Охорона праці

А.1. Охорона праці в контексті енергоефективності будівель

Підвищення енергоефективності в будівельному секторі є одним із основних напрямів сучасної архітектури та інженерії. Водночас, з впровадженням нових технологій і матеріалів виникають нові ризики для здоров'я та безпеки працівників. Охорона праці є важливим елементом будь-якого будівельного процесу, зокрема під час модернізації або реконструкції адміністративних будівель. Врахування норм і вимог охорони праці має вирішальне значення для успішної реалізації енергоефективних рішень і забезпечення безпечних умов для робітників.

Одним з найбільших факторів ризику є фізичне навантаження на працівників під час виконання робіт, пов'язаних з установкою та заміною вікон, утепленням фасадів, а також монтажем та налаштуванням інженерних систем, що використовуються для підвищення енергоефективності. Наприклад, робота на висоті при встановленні віконних конструкцій, особливо під час заміни старих вікон на нові енергозберігаючі, може спричиняти травми. Важливо також враховувати ймовірність виникнення нещасних випадків під час робіт з важким обладнанням та матеріалами, що часто використовуються в будівництві.

Особливості охорони праці при використанні енергозберігаючих матеріалів

Інтеграція енергозберігаючих матеріалів у будівництво підвищує вимоги до охорони праці, оскільки робота з такими матеріалами часто вимагає спеціальних навичок і знань. Наприклад, при монтажі теплоізоляційних матеріалів, таких як пінополістирол або екструдований пінополістирол, може виникати небезпека для здоров'я працівників через виведення шкідливих часток у повітря, особливо при їх розрізанні чи монтажі. Відповідно до стандартів, працівники повинні бути забезпечені

засобами індивідуального захисту, такими як респіратори, захисні окуляри та рукавички, щоб мінімізувати ризики для здоров'я.

Що стосується роботи зі склопакетами, то їх монтаж потребує особливої уваги через важкість та розміри конструкцій. У разі невірної транспортування або установки великих віконних конструкцій можуть виникати травми, пов'язані з фізичними перевантаженнями або ударом об тверді поверхні. Враховуючи високі вимоги до міцності та надійності склопакетів, також існує ймовірність їх пошкодження під час встановлення, що може призвести до травм працівників.

Також вкрай важливим є контроль за правильним зберіганням і транспортуванням енергозберігаючих матеріалів, таких як віконні конструкції з низькоемісійним склом або ізоляційні панелі. Неправильне зберігання таких матеріалів може призвести до їх пошкодження або зниження енергоефективних властивостей, а також може мати негативний вплив на безпеку працівників. Відповідно, зберігання повинно здійснюватися в сухих і захищених від фізичних впливів приміщеннях, а транспортування – з використанням відповідних засобів для запобігання механічних пошкоджень.

Підвищення безпеки при використанні інженерних систем енергозбереження

Інженерні системи, що використовуються для підвищення енергоефективності, є важливою складовою частиною будівельних об'єктів. До таких систем належать вентиляційні установки з рекуперацією тепла, системи кондиціонування, а також системи обігріву з високим рівнем автоматизації. Однак, під час монтажу і налаштування таких систем необхідно дотримуватись вимог безпеки, оскільки можливе виникнення небезпеки у разі неправильної установки або неконтрольованих випробувань технічного обладнання.

Монтаж і налаштування таких систем вимагають застосування спеціалізованих інструментів та техніки, що може спричиняти додаткові небезпеки. Наприклад, при роботі з електричними системами або з

обладнанням, яке працює під високим тиском або температурою, важливо забезпечити максимальну безпеку робітників. У разі порушення технічних вимог при роботі з такими системами можуть виникнути нещасні випадки, пов'язані з електричними ударами, опіками, а також механічними травмами.

Проблеми, пов'язані з впливом нових технологій на здоров'я працівників

Впровадження нових енергозберігаючих технологій може негативно впливати на здоров'я працівників, особливо через специфічні фактори, що виникають у процесі роботи з такими матеріалами. Так, наприклад, при роботі з новими теплоізоляційними матеріалами можуть виникати респіраторні проблеми через виділення пилу або хімічних речовин у процесі розпилення матеріалів. У разі використання в будівництві нових складів газів, таких як аргон, заповнюються камери склопакетів, робітники можуть піддаватися впливу інертних газів, що може бути небезпечним у разі поганого провітрювання приміщень.

Порушення технології при роботі з такими матеріалами може призвести до шкідливих для здоров'я наслідків. Зокрема, потрапляння пари або випарів токсичних речовин на шкіру або в органи дихання може викликати алергічні реакції, запалення чи інші серйозні проблеми. Тому працівники повинні бути забезпечені необхідними засобами індивідуального захисту, а також проходити обов'язкові інструктажі щодо безпечної роботи з новими енергозберігаючими матеріалами.

Оцінка ризиків і розробка заходів безпеки

Для кожного типу будівельних робіт з енергозберігаючими матеріалами необхідно проводити оцінку ризиків та розробку відповідних заходів безпеки. Оцінка ризиків включає в себе не лише технічні аспекти, пов'язані з монтажем енергозберігаючих матеріалів, але й врахування фізичних, хімічних та екологічних ризиків, що можуть виникати при використанні нових технологій. Усі ці фактори повинні бути ретельно проаналізовані і враховані на етапі планування робіт, що дозволить мінімізувати можливі небезпеки.

Для зниження ризиків важливо не лише використовувати сучасні засоби захисту, але й організувати спеціалізоване навчання для працівників. Наприклад, проведення тренінгів по роботі з новими матеріалами та технологіями дозволяє підвищити обізнаність робітників про потенційні небезпеки та навчити їх правильно реагувати в разі виникнення непередбачених ситуацій.

Підвищення енергоефективності будівель потребує комплексного підходу, що включає не тільки використання сучасних технологій і матеріалів, але й забезпечення належного рівня охорони праці. При цьому важливо враховувати специфічні небезпеки, пов'язані з роботою з новими енергозберігаючими матеріалами, а також з монтажем

Ризики, пов'язані з впливом кліматичних факторів на ефективність енергозберігаючих технологій

Одним з важливих аспектів, що визначають безпеку на енергозберігаючих будівельних об'єктах, є вплив кліматичних факторів. Особливо важливим є правильне планування та монтаж будівельних конструкцій, які мають високий рівень енергоефективності, з огляду на погодні умови регіону. Наприклад, для України, яка має різноманітні кліматичні зони (від поміркованого до субтропічного), важливо враховувати перепади температур, вологість і інші фактори при виборі відповідних матеріалів.

Особливо великий вплив на безпеку та енергоефективність мають системи, пов'язані з вентиляцією та кондиціонуванням повітря. Неправильний монтаж таких систем може призвести до утворення конденсату в утеплених конструкціях, що спричинить розвиток грибка та плісняви, а також зниження ефективності енергозбереження. Працівники, що займаються установкою і налаштуванням таких систем, повинні мати відповідні знання та навички, а також використовувати засоби індивідуального захисту для запобігання тривалому впливу вологи та хімічних речовин.

Крім того, температурні перепади можуть спричиняти розширення і стиснення матеріалів, що в свою чергу впливає на термічну ефективність конструкцій. Це важливо не тільки для енергоефективності, але й для безпеки працівників, оскільки неправильне розширення матеріалів може призвести до їх пошкодження або навіть обрушення конструкцій. Врахування цих факторів дозволяє знижувати ризики під час експлуатації та забезпечує високий рівень енергоефективності будівель.

Організація безпечних умов праці при впровадженні інноваційних енергозберігаючих технологій

Інноваційні енергозберігаючі технології вимагають нових підходів до організації робочих процесів і забезпечення безпеки працівників. Наприклад, при впровадженні автоматизованих систем регулювання енергоспоживання важливо забезпечити кваліфікацію працівників, які займаються налаштуванням таких систем. Оскільки більшість сучасних енергозберігаючих систем базується на інтеграції високотехнологічних компонентів, таких як інтелектуальні терморегулятори, системи управління освітленням та іншими автоматизованими системами, помилки під час монтажу або налаштування можуть призвести до порушення норм безпеки, підвищення енергоспоживання або навіть пожежі.

Інженери, які працюють з такими системами, повинні мати спеціалізовану підготовку та регулярно проходити курси підвищення кваліфікації. Важливою частиною такої підготовки є вивчення роботи з високовольтним електричним обладнанням, програмними системами, а також правильне використання інструментів для монтажу й налаштування таких технологій. Крім того, усі ці системи повинні бути оснащені необхідними захисними елементами, такими як автоматичні вимикачі, системи аварійного відключення, а також бути зручно доступними для персоналу у разі непередбачених ситуацій.

З метою забезпечення безпеки на будівництві важливо також враховувати виведення та утилізацію побічних продуктів, що виникають під час монтажу нових енергозберігаючих технологій. Зокрема, йдеться про шкідливі пари та випаровування, що можуть утворюватися при роботі з деякими новими матеріалами, такими як полімери, пінопласт або інші синтетичні матеріали, які використовуються для теплоізоляції. Для уникнення виникнення небезпечних ситуацій необхідно забезпечити належну вентиляцію та вентиляційні системи, що відповідатимуть вимогам охорони праці.

Важливість системи моніторингу та контролю за безпекою

Одним із ефективних способів підвищення рівня безпеки в будівництві є впровадження сучасних систем моніторингу та контролю за робочими умовами. Ці системи дозволяють постійно спостерігати за параметрами навколишнього середовища на будівельному майданчику, зокрема за температурними показниками, рівнем вологості, наявністю токсичних газів або пилу. Завдяки таким системам можна оперативно реагувати на зміни робочих умов і вчасно вжити заходів для зниження потенційних ризиків для працівників.

Моніторинг температури, вологості та рівня CO₂ дозволяє своєчасно виявити перевищення норм, що може бути небезпечним для здоров'я працівників. Наприклад, підвищена вологість може сприяти утворенню плісняви, а високий рівень вуглекислого газу свідчить про проблеми з вентиляцією. Ці аспекти мають велике значення для будівель, які проходять реконструкцію в рамках енергозбереження, оскільки вони пов'язані з використанням нових матеріалів і технологій, які потребують специфічних умов експлуатації.

Нормативно-правова база охорони праці в енергозберігаючому будівництві

Охорона праці в будівництві, зокрема під час використання нових енергозберігаючих технологій, регулюється низкою законодавчих актів та нормативних документів. Це включає в себе як загальні вимоги охорони праці на будівельних майданчиках, так і спеціалізовані норми щодо роботи з енергозберігаючими матеріалами та технологіями.

Основними нормативними документами є Кодекс законів про працю України, Закон України "Про охорону праці", а також ряд Державних будівельних норм (ДБН) та Державних стандартів (ДСТУ), які регламентують безпечні умови роботи на будівельних майданчиках. Ці нормативи містять вимоги щодо використання засобів індивідуального захисту, організації безпечних робочих місць, а також регулярного проведення інструктажів і навчань для працівників.

Також для забезпечення безпеки на будівництві важливо враховувати Європейські норми безпеки, зокрема Директиви ЄС щодо безпеки праці та нормативи енергоефективності будівель, які включають вимоги до мінімальних стандартів енергоефективності. Вони сприяють розвитку стандартів безпеки в будівництві та оптимізації витрат енергії на різних етапах життєвого циклу будівлі.

Отже, впровадження енергозберігаючих технологій в будівництво сприяє зниженню енерговитрат і підвищенню екологічної стійкості, але також створює нові виклики для безпеки працівників. Для ефективного управління ризиками в процесі впровадження таких технологій необхідно приділяти належну увагу не лише технічним аспектам, а й питанням охорони праці. Це включає в себе не тільки дотримання існуючих нормативів, але й постійне навчання персоналу, впровадження нових інструментів для моніторингу та забезпечення належних умов праці.