

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА  
ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

На правах рукопису

**Фаренюк Єгор Геннадієвич**

УДК 699.865:692.86

**ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ СВІТЛОПРОЗОРИХ  
ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ СУЧАСНИХ  
БАГАТОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ**

05.23.01 - «Будівельні конструкції, будівлі та споруди»

Дисертація на здобуття наукового ступеню  
кандидата технічних наук

Науковий керівник:  
доктор технічних наук, професор  
Калюх Юрій Іванович

Рівне – 2015

## ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	5
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. СВІТЛОПРОЗОРИ ОГОРОДЖУВАЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ ЯК ЕЛЕМЕНТ ФОРМУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ БУДІВЕЛІ	14
1.1. Конструктивні рішення сучасних світлопрозорих огороджувальних конструкцій будинків	14
1.2. Конструктивні заходи з підвищення термічних властивостей світлопрозорих конструкцій	24
1.3. Дослідження впливу повітропроникності світлопрозорих огороджувальних конструкцій на їх теплові характеристики	33
1.4. Дослідження процесів тепломасопереносу у світлопрозорих конструкціях	37
1.5. Висновки за розділом	41
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ СВІТЛОПРОЗОРИХ КОНСТРУКЦІЙ	43
2.1. Основні положення методичної структури проведення досліджень	43
2.2. Математичне обґрунтування переносу теплоти через світлопрозорі огородження	48
2.2.1. Витрати теплоти на нагрів повітря, що інфільтрується	48
2.2.2. Особливості визначення параметрів теплообміну	50
2.3. Методика експериментальних досліджень	58
2.3.1. Дослідження опору теплопередачі конструкцій	58
2.3.2. Дослідження повітропроникності світлопрозорих конструкцій	64

2.3.3.	Визначення показників світлопропускання світлопрозорих конструкцій	67
2.3.4.	Дослідження довговічності склопакетів	68
2.4.	Висновки за розділом	74

### РОЗДІЛ 3. АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СВІТЛОПРОЗОРИХ КОНСТРУКЦІЙ 76

3.1.	Алгоритм інженерного методу розрахунків показників енергоефективності світлопрозорих огорожувальних конструкцій	76
3.2.	Розрахунковий метод визначення показників енергоефективності світлопрозорих конструкцій у холодний період року	78
3.3.	Визначення впливу теплових характеристик світлопрозорих конструкцій на показники енергоефективності	80
3.4.	Особливості формування температурного режиму стійкоригельних елементів світлопрозорих фасадних конструкцій	86
3.5.	Дослідження закономірностей формування теплотехнічних показників склопакетів віконних та фасадних конструкцій	100
3.6.	Вплив температури газового середовища і перепаду температур на теплотехнічні характеристики склопакетів	104
3.7.	Висновки за розділом	109

### РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТА ТЕПЛОВИХ ПОКАЗНИКІВ СВІТЛОПРОЗОРИХ КОНСТРУКЦІЙ 112

4.1.	Залежність теплотехнічних показників склопакетів від молярної маси та температури газового заповнення міжскляного простору	112
4.2.	Дослідження показників довговічності газонаповнених склопакетів	117
4.3.	Результати експериментальних досліджень теплового стану конструкцій світлопрозорих фасадів	121

4.4.	Експериментальні дослідження теплотехнічних показників світлопрозорих огорожувальних конструкцій з вентиляційними провітрювачами	125
4.5.	Дослідження теплової ефективності конструкцій пасивних геліоконструкцій зі світлопрозорим фасадом	131
4.6.	Висновки за розділом	137
	<b>РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СВІТЛОПРОЗОРИХ КОНСТРУКЦІЙ З ПІДВИЩЕНИМИ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ</b>	<b>139</b>
5.1.	Методичні основи оцінювання економічної ефективності сучасних світлопрозорих огорожувальних конструкцій	139
5.2.	Економічна ефективність застосування віконних конструкцій з високим рівнем опору теплопередачі	141
5.3.	Рекомендації з проектування сучасних світлопрозорих огорожувальних конструкцій	146
5.4.	Висновки за розділом	149
	<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ РОБОТИ</b>	<b>150</b>
	<b>ДОДАТКИ</b>	<b>153</b>
	<b>ДОДАТОК А. Довідка про використання результатів дисертаційної роботи в нормативних документах, що розробляються за планом Мінрегіонбуду України</b>	<b>153</b>
	<b>ДОДАТОК Б. Довідка від Мінрегіонбуду України про використання результатів дисертаційної роботи автора</b>	<b>155</b>
	<b>ДОДАТОК В. Довідка про впровадження результатів дисертаційної роботи автора в практику</b>	<b>157</b>
	<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	<b>160</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

- $\tau$  - температура конструкції, виробу, К (°С);  
 $x, \delta$  - лінійна координата, товщина шару конструкції, матеріалу, м;  
 $z$  - час, с;  
 $t, T$  - температура середовища (повітря), відповідно °С, К;  
 $\rho$  - густина, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\lambda$  - теплопровідність, Вт/(м·К);  
 $c$  - питома теплоємність, Дж/(кг·К), Дж/(м<sup>3</sup>·К);  
 $a$  - коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с;  
 $R_{\Sigma}$  - опір теплопередачі конструкції, м<sup>2</sup>·К/Вт;  
 $R_{\Sigma np}$  - приведений опір теплопередачі конструкції, м<sup>2</sup>·К/Вт;  
 $R$  - термічний опір конструкції, м<sup>2</sup>·К/Вт;  
 $K$  - коефіцієнт світлопропускання;  
 $q$  - густина теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $U$  - коефіцієнт теплопередачі огорожувальної конструкції, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $F$  - площа, м<sup>2</sup>;  
 $I_r$  - інтенсивність сонячної радіації, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $J_{ov}$  - потужність системи опалення будинку, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $G, g$  - витрати повітря, кг/с, м<sup>3</sup>/с;  
 $A_b$  - амплітуда коливань температури внутрішнього повітря, °С;  
 $Q_E$  - питомі тепловтрати, кВт·год/м<sup>2</sup>, кВт·год/м<sup>3</sup>;  
 $R_g$  - опір повітропроникності, м<sup>2</sup>·год·Па/кг;  
 $\Delta t$  - різниця температур повітря та поверхні конструкції, К (°С);  
 $h$  - питома ентальпія, Дж/кг;  
 $\alpha$  - коефіцієнт теплообміну, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $v$  - швидкість руху повітря, м/с;  
 $в, з$  - внутрішній, зовнішній;

- $C_G(\tau)$  - сумарні економічні витрати, грн. (г.о.);
- $C_I$  - початкові економічні витрати (вартість конструкції), грн. (г.о.);
- $Nu$  – критерій Нусельта;
- $Pr$  - критерій Прантля;
- $Gr$  - критерій Грасгофа;
- $Fo$  - критерій Фур'є;
- $r_\tau$  - коефіцієнт термічної однорідності конструкцій;
- СОК - світлопрозорі огорожувальні конструкції;
- СК - світлопрозорі конструкції.

## ВСТУП

Рішення проблеми енергозбереження багато в чому визначає строки виходу України із тривалої економічної кризи. Максимальна економія енергії знижує залежність від країн-постачальників паливно-енергетичних ресурсів, зменшує енергоємність національних товарів. Будівельна галузь національної економіки є традиційно затратною в енергетичному відношенні із значними витратами енергії [1], як для створення об'єкту будівництва – будинку або споруди, так і на його експлуатацію на протязі всього життєвого циклу.

Проектування сучасної будівлі вимагає опрацювання на стадії проекту всіх вузлів огорожувальних конструкцій, а оцінка теплотехнічних характеристик світлопрозорих елементів зовнішніх стін і примикань цих елементів до непрозорих ділянок багато в чому визначає загальну енергоефективність будівлі. Відповідно, важливим є подальший розвиток методів розрахунку теплотехнічних показників світлопрозорих конструкцій та їх експериментального визначення.

**Актуальність теми.** Конструктивно-архітектурні рішення сучасних громадських будівель все більше реалізуються з використанням скла в оздобленні фасаду. У традиційних будівлях житлового та громадського призначення площа вікон у 3-5 разів менша від площі глухих стінових огорожувальних конструкцій, а тепловтрати або практично однакові, або тепловтрати крізь вікна перевищують тепловтрати крізь глухі стінові конструкції. Для сучасних багатоповерхових будівель площа світлопрозорих конструкцій (СК) має набагато більшу питому вагу, що зумовлює необхідність спеціального аналізу впливу світлопрозорих огорожувальних конструкцій (СОК) на формування енергетичних показників будівель у цілому. Тому пріоритетними є проблеми розробки раціональних інженерних методів оцінювання та проектування стінових огорожувальних конструкцій з великими коефіцієнтами скління фасадів багатоповерхових будівель.

До важливих функцій, які виконують СОК, належать освітлення приміщень і забезпечення прямого зорового контакту між інтер'єром і

зовнішнім середовищем. Велике значення для формування нормального середовища за вимогами гігієнічних показників має провітрювання приміщень, зниження можливості конденсації вологи на огорожувальних конструкціях. Це зумовлює потребу в розгляді комплексу показників, що визначають характеристики теплоізоляції та повітропроникнення СОК. Особливість СК полягає в тому, що вони є не тільки елементом тепловтрат, а й джерелом теплонадходжень у приміщення в зимовий період року. Тому ці питання є актуальними та потребують аналізу при виборі конструктивних рішень світлопрозорих елементів теплоізоляційної оболонки будинків для забезпечення їх енергоефективності.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота пов'язана з виконанням завдань, визначених Енергетичною стратегією України на період до 2030 року, що затверджена розпорядженням Кабінету Міністрів України № 1071 від 27 липня 2013 р.; Галузевою програмою підвищення енергоефективності у будівництві на 2010–2014 роки, яка затверджена наказом Мінрегіонбуду України № 257 від 30 червня 2009 р., положеннями Директиви Європейського Парламенту і Ради 2010/31/ЄС від 19 травня 2010 р. щодо енергетичної ефективності будівель.

Окремі дослідження виконувались в рамках науково-дослідних робіт:

- Розроблення проекту зміни № 1 ДБН Б В.2.6-31:2006 «Теплова ізоляція будівель» (договір № 2060/Н-10/123-2012, державний реєстраційний номер 0112U003611);

- «Дослідження сучасних теплоізоляційних систем та розробка принципів будівельно-технічних рішень термореконструкції фасадів житлових будинків 1960–1995 років забудови з метою підвищення їх енергоефективності та зниження рівня споживання енергоресурсів будівель житлового фонду» (договір № 2398/Н-14/276-2012, державний реєстраційний номер 0112U005721);

- Розроблення проекту ДСТУ «Навісні фасади» (відповідно до EN 13830:2003)» (договір № 3303/Н-12/319-2013, державний реєстраційний



номер 0113U007972 ).

**Мета і завдання дослідження.** *Метою* дисертаційної роботи є підвищення енергетичних параметрів будинків за рахунок установавання закономірностей формування теплового режиму сучасних світлопрозорих огорожувальних конструкцій, удосконалення методів розрахункового та експериментального визначення їх теплотехнічних показників.

Для досягнення мети було поставлено такі наукові *завдання*:

– удосконалити інженерну методику розрахунку теплового балансу СОК на основі аналітичних досліджень параметрів, що визначають загальне перенесення теплоти у світлопрозорих огорожувальних конструкціях;

– здійснити аналітичні дослідження та виявити особливості формування температурного режиму вузлів примикання елементів СОК до непрозорих конструкцій фасаду будівель;

провести експериментальні дослідження:

– теплотехнічних показників конструкцій з різними типами скла за ступенем їх чорноти, світлопрозорістю, товщиною, типом газового прошарку, різними температурними умовами навколишнього середовища;

– показників довговічності газонаповнених склопакетів;

– теплотехнічних показників вентиляційних провітрювачів та їх впливу на повітрообмін приміщень багатоповерхових будівель;

– світлопрозорих пасивних геліоконструкцій для визначення їх ефективності у холодний період року в кліматичних умовах України;

– розробити рекомендації з проектування сучасних конструктивних рішень світлопрозорих конструкцій багатоповерхових будинків.

*Об'єкт дослідження* – сучасні світлопрозорі огорожувальні конструкції.

*Предмет дослідження* – фізичні явища та процеси, що впливають на теплотехнічні параметри СОК та показники їх енергоефективності.

*Методи дослідження.* У процесі дисертаційного дослідження використовувалися аналітичні та експериментальні методи наукові методи:

перенесення теплоти в СОК, фізичне моделювання шляхом камерних випробувань, кореляційно-регресійний аналіз експериментальних результатів.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає в тому, що:

*уперше*

– проведено аналітично-експериментальні дослідження впливу температур навколишнього середовища на опір теплопередачі склопакетів;

– виявлено емпіричні залежності опору теплопередачі склопакетів від молярної маси газової суміші;

– експериментально отримано результати визначення показників довговічності газонаповнених склопакетів;

– експериментально визначено теплотехнічні показники СОК з вентиляційними провітрювачами та встановлено умови повітрообміну приміщень залежно від типів модифікацій провітрювачів;

*набули подальшого розвитку*

– особливості формування температурного режиму сучасних СОК, з урахуванням яких розроблено рекомендації з підвищення їх теплотехнічних показників;

– рекомендації щодо забезпечення необхідного рівня енерговитрат будівель за рахунок раціонального проектування світлопрозорих елементів теплоізоляційної оболонки;

– *удосконалено* інженерну методику розрахунку енергоефективності СОК.

**Практичне значення отриманих результатів.** Результати досліджень використані:

– при розробленні таких нормативних документів: ДБН В.2.6-31:2006 «Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будівель»; ДБН В.2.6-33:2008 «Конструкції будинків і споруд. Конструкції зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією. Вимоги до проектування, улаштування та експлуатації»; ДСТУ Б В.2.2-19:2007 «Метод визначення повітропроникності огорожувальних конструкцій в натурних умовах»; ДСТУ Б В.2.6-101:2010 «Метод визначення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій»;

ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007 «Проектування. Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорту будинків при новому будівництві та реконструкції»; ДСТУ Б А.2.2-8:2010 «Розділ «Енергоефективність» у складі проектної документації об'єктів»; ДСТУ Б В.2.6-189:2013 «Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель»; ДСТУ Б EN 13830:2014 (EN 13830:2003, IDT ) «Фасади навісні. Технічні умови»;

– у процесі розроблення відповідних рекомендацій щодо підвищення температур внутрішніх поверхонь розглянутих конструкцій за результатами аналітичних розрахунків три- та двовимірних температурних полів вузлів світлопрозорої покрівлі ТРЦ «Ocean Plaza» (м. Київ, вул. Антоновича, 176);

– під час підготовки відповідних рекомендацій щодо забезпечення нормального тепловологісного режиму світлопрозорого фасаду за результатами натурних обстежень та аналітичних розрахунків двовимірних температурних полів і вологісного режиму вузлів світлопрозорого фасаду і його примикання до відкритої тераси офісного центру IQ (м. Київ, вул. С.Струтинського, 13-15);

– у процесі виконання роботи «Дослідження сучасних теплоізоляційних систем та розробка принципів будівельно-технічних рішень термореконструкції фасадів житлових будинків 1960–1995 років забудови з метою підвищення їх енергоефективності та зниження рівня споживання енергоресурсів будівель житлового фонду» на замовлення Мінрегіону України.

Результати дисертації впроваджені в Державному підприємстві «Український науково-дослідний і проектний інститут цивільного будівництва «УкрНДПЦивільбуд» (м. Київ) і враховані під час виконання відповідних проектувальних робіт.

Акти та довідки впровадження наведені в додатках А і Б дисертації.

**Особистий внесок автора.** Основні положення дисертаційної роботи розроблені автором самостійно. В опублікованих роботах із співавторами здобувач у статтях: [2] – здійснив розрахунки, аналіз впливу перепаду температур на теплотехнічні характеристики склопакетів; [3] – встановив необхідні характеристики теплоізоляції світлопрозорих ділянок стін для

забезпечення умов комфортності приміщень; [4; 5; 6] – провів експериментальні дослідження та здійснив аналіз конструктивних рішень сучасних СК; [7; 10] – виконав розрахунки двовимірних температурних полів конструкцій та взяв участь у підготовці аналітичних висновків; [8] – здійснив аналіз процесів теплопередачі через світлопрозору частину конструкцій; [9] – виконав розрахунки розподілу сонячного випромінювання по поверхні конструкцій в різних кліматичних регіонах країни; у патенті [11] – провів випробування теплового режиму конструкції, що підтвердило ефективність винаходу; у ДБН [12] – узагальнив результати експериментальних досліджень склопакетів та визначив доцільний нормативний опір теплопередачі світлопрозорих конструкцій для двох кліматичних зон України; у ДБН [13] та ДСТУ [19] – взяв участь у підготовці вимог до теплоізоляції збірних систем з комбінованим світлопрозорим фасадом; у ДСТУ: [14; 15] – взяв участь у розробці методики проведення досліджень теплотехнічних показників конструкцій; [16; 17] – взяв участь у розробці розрахункової методики теплонадходжень від сонячної радіації через світлопрозорі конструкції при оцінці енергоефективності будівель; [18] – узагальнив розрахункові дані впливу розміщення СОК на приведений опір теплопередачі стін; [20-24] – наукові розробки належать автору і отримані їм самостійно.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації апробовані та схвалені на міжнародних конференціях та конференціях за міжнародною участю: «Економія теплоти та енергії в проектуванні та будівництві» (Полтава, 1996); «Енергозбереження в будинках та спорудах» (Чернігів, 1998); «Підвищення енергоефективності будівель і споруд – методологія, конструктивні принципи, ефективні конструкції, матеріали та інженерне обладнання» (Яремче, 2012); «Современные технологии энергосбережения» (Мінськ, Республіка Белорусь, 2013); «Енергозбереження у будівництві. Сучасні конструктивні системи, ефективні матеріали та інженерне обладнання» (Київ, 2013); 4 Global Green Economy Prosperity Forum (Пекін, Китай, 2013); «Инновационные технологии жизненного цикла объектов

жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения» (Гаспра, 2013); «Підвищення енергоефективності будівель і споруд – методологія, конструктивні принципи, ефективні конструкції, матеріали та інженерне обладнання» (Закопане, Польща, 2014); «Енергоефективність у будівництві. Сучасні конструктивні системи, ефективні матеріали та інженерне обладнання» (Київ, 2014).

**Публікації.** Основний зміст дисертації викладено у 23 наукових працях (з них 5 одноосібні), з яких 5 опубліковані у наукових фахових виданнях, включених до переліку ВАК України, одній зарубіжній публікації в періодичному виданні, восьми нормативних документах та одному патенті на винахід.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 180 сторінок, обсяг основного тексту – 154 сторінки. Робота містить 78 рисунків, 16 таблиць, 3 додатки на 8 сторінках. Список використаних джерел складається із 167 найменувань.

## РОЗДІЛ 1. СВІТЛОПРОЗОРИ ОГОРОДЖУВАЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ ЯК ЕЛЕМЕНТ ФОРМУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ БУДІВЕЛЬ

### 1.1. Конструктивні рішення сучасних світлопрозорих огорожувальних конструкцій будинків

Основні вироби із скла, які застосовуються в сучасних віконних конструкціях, це склопакети - об'ємні вироби, що складаються з двох або трьох листів скла, з'єднаних між собою по контуру за допомогою дистанційних рамок з металу або пластику та герметиків, утворюючих одну чи більше ізольованих від зовнішнього повітря камер, що заповнені висушеним повітрям або іншим газом [25]. Склопакети повинні забезпечувати пропускання максимальної кількості світла і, при цьому, мінімально впливати на витрати енергії на обігрів або охолодження приміщення. Застосування скла з різним функціональним призначенням дозволяє отримувати сучасний склопакет з різними функціональними характеристиками (рис.1.1). Склопакети, в залежності від кількості камер, поділяють на однокамерні та двокамерні. Типи і конструкція склопакетів наведені на рис. 1.2.

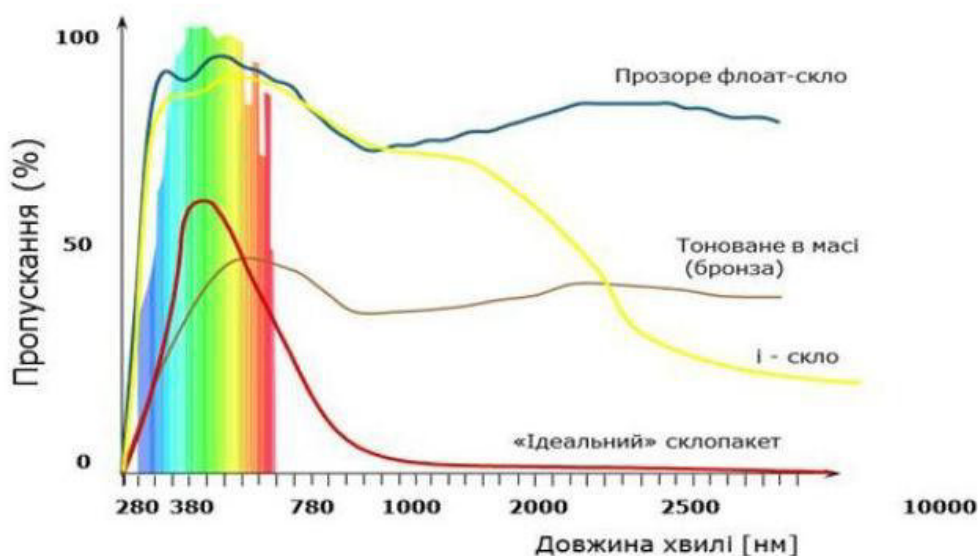


Рис.1.1. Приклади скла з різним функціональним призначенням

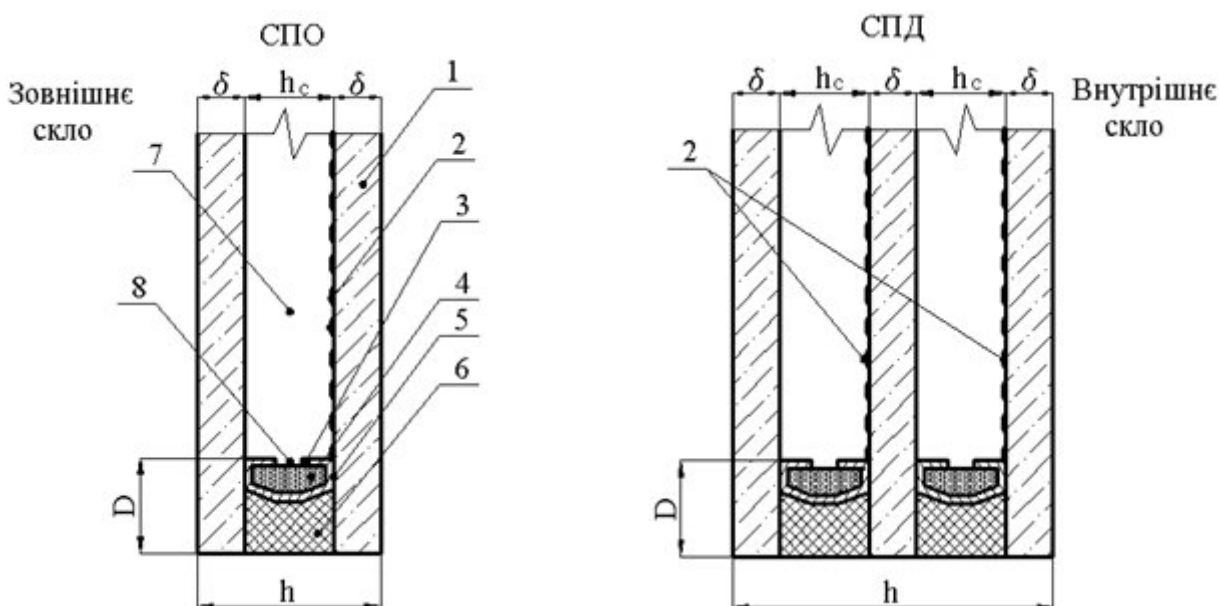


Рис.1.2. Типи і конструкції склопакетів: 1– скло; 2 – рекомендовані варіанти розташування низькоемісійного покриття у разі його застосування; 3- дистанційна рамка; 4 – вологопоглинач; 5 – нетвердіючий герметик; 6 – твердіючий герметик; 7 – повітряний прошарок (міжскляна відстань); 8 – дегідративні отвори:  $\delta$  – товщина скла;  $h$  – товщина склопакета;  $h_c$  – відстань між шарами скла;  $D$  – глибина герметизуючого шару

Камери склопакетів можуть бути заповнені висушеним повітрям, інертним газом (аргон –  $Ar$ , криптон –  $Kr$ , ксенон –  $Xe$ , або їхніми сумішами) [26]. Заповнення прошарку аргоном, криптоном або сумішшю газів потребує визначення складу газів, але існуючі методи цього контролю [25] є недостатньо точними і потребують багато часу для проведення випробувань [27].

Склопакети, в залежності від призначення, поділяються на склопакети загальнобудівельного призначення, склопакети будівельного призначення із спеціальними властивостями, стійкі при механічній дії, енергозберігаючі, сонцезахисні енергозберігаючі, морозостійкі, шумозахисні [25]. Предметом вивчення дисертації є властивості світлопрозорих конструкцій з енергозберігаючими склопакетами.

Крім стандартного прозорого скла використовують, особливо у склопакетах, спеціальне будівельне скло. Останнє підрозділяють на дві групи:

пофарбоване в масі (теплопоглинальне) та із плівковими покриттями (теплопоглинальні й тепловідбивні).

До першої групи відноситься скло із різних хімічних складових, до другої – скло звичайного складу, але властивості якого змінюються завдяки нанесенню на його поверхню тонких прозорих плівок з різних елементів. Енергія, що поглинається у товщі скла, трансформується в теплову, через що скло нагрівається. Чим вище теплопоглинальна здатність скла, тем сильніше воно нагрівається. Нагріте скло саме починає випромінювати акумульовану в ньому енергію у вигляді вторинного теплового випромінювання з довжиною хвилі 7-10 мк, яке інтенсивно поглинається звичайним склом. Для підвищення ефективності роботи теплопоглинального скла використовують комбінацію звичайних шибок у вигляді подвійних ізольованих склопакетів з повітряним прошарком, при цьому ефективність сонцезахисту підвищується на 10-15%.

Теплопоглинальне скло має високе світлопропускання і більш високе поглинання теплових променів (60-70)% і, відповідно, в більшій мірі нагрівається, ніж відбиваюче скло [28]. Таке скло слід застосовувати у районах з помірним кліматом, де кількість сонячних днів обмежена і необхідно забезпечити високий рівень освітленості приміщень. Тому в подальшому в роботі поняття скло енергозберігаюче розглядається як скло з нанесеними на його поверхню сумішами тонких шарів металів, які відбивають електромагнітні хвилі в інфрачервоному секторі спектру.

Основні складові частини світлопрозорих конструкцій традиційні [6]: склопакет або скло; елементи кріплення світлопрозорої частини (рами, стулки, стойки, ригелі, тримачі, фіксатори тощо); фурнітура; ущільнювачі; герметики. Віконна конструкція складається з дерев'яного, пластикового, скловолокнистого пластику або металевого каркаса, що несе механічне навантаження, і вмонтованих нього шарів скла або склопакетів.

*Вікна із ПВХ.* Системою профілів називається набір конструктивно пов'язаних між собою елементів, розроблених для певної сфери застосування.



Розрізняють віконні системи для житлових і адміністративних будівель, підсобних приміщень, зимових садів тощо.

Система профілів (рис.1.3), як мінімум, складається із рами, імпоста, штапика, набору армуючих профілів, ущільнювачів, підкладок під склопакети, фурнітури. Більш широко система профілів може бути представлена кутовими з'єднувачами, розширюючими профілями, накладками, підвіконним профілем тощо.

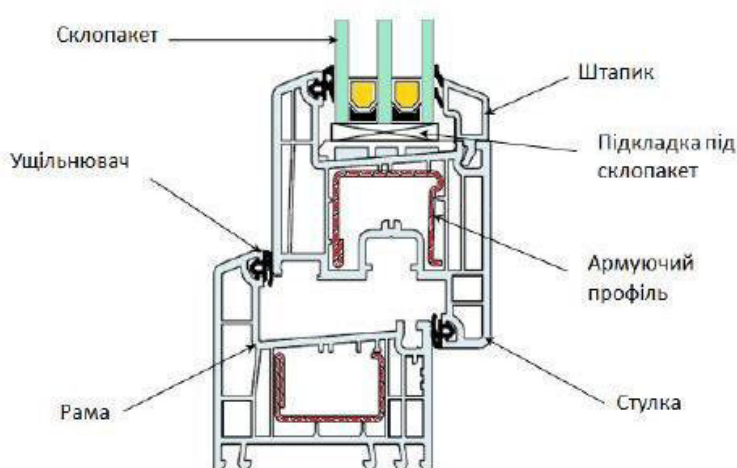


Рис. 1.3. Розріз вікна із ПВХ

Високі теплотехнічні характеристики профільних систем досягаються завдяки ефективному конструктивному рішенню, а саме: багатокамерної конструкції профілів, монтажної ширини профілів та наявності трьох рівней герметизації. Заснована в системах профілів монтажна ширина забезпечує високу експлуатаційну надійність, міцність та жорсткість віконних конструкцій.

*Вікна із дерева..* Вікна, рами яких виготовляють з дерева, можуть бути розділені на дві категорії.

Перша – з цілісного бруса. Безсумнівна перевага такого матеріалу – висока екологічність і, як правило, прийнятна вартість. Проте недолік даних конструкцій полягає в тому, що раму може «повести» під впливом вологи і перепадів температур.



Рис. 1.4. Розріз вікна з дерев'яною рамою

Другу категорію дерев'яних рам виготовляють з клеєного бруса, який складається з декількох шарів дерева. Перевагою такого матеріалу є більша стабільність конструкції, пов'язана з кращою підготовкою матеріалу.

Дерево прийнято поділяти на тверді і м'які породи. До твердих належать цінні породи: дуб, бук, ясь, тощо. Вироби з твердої деревини стійкі, більш міцні та довговічні. Однак необхідно враховувати, що опір теплопередачі таких вікон буде меншим, ніж у виробках із сосни, ялини, ялиці, модрина і кедру за умови однакової товщини рами і стулки.

*Вікна із алюмінію.* Алюміній, як будівельний матеріал, має безліч позитивних властивостей: малу масу (майже в три рази меншу, ніж у сталі); високу корозійну стійкість; довговічність і технологічність; досить високу міцність для застосування не тільки в огорожувальних, але і в несучих конструкціях. Алюмінієві вікна, в порівнянні з пластиковими або дерев'яними, більш стійкі до ультрафіолетового випромінювання і атмосферних впливів. Міцність алюмінієвих сплавів зберігається при низьких температурах.

Основним недоліком алюмінію є його теплопровідність –  $220 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , що в 1200 разів перевищує теплопровідність ПВХ або дерева [29]. Тому в конструкціях з алюмінієвих профілів доводиться застосовувати спеціальні вставки (термомістки) для досягнення нормативного значення опору теплопередачі. Термоміст (рис.1.5) для алюмінієвого віконного і стійково-

рігельного профілю – це полімерний з'єднувальний профіль, що виконує функції теплоізолятора між зовнішньою і внутрішньою частинами алюмінієвого профілю.

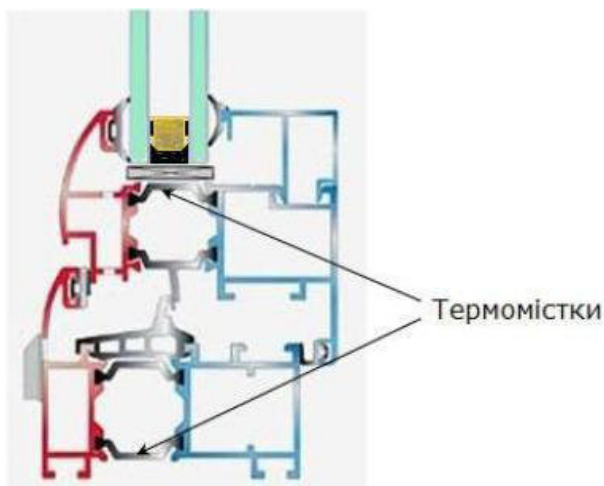


Рис. 1.5. Приклад термомістка

Алюмінієвий профіль з термовкладищем невеликої ширини, менше 16-20 мм, має суттєво гірші, порівняно з пластиком або деревиною, теплозахисні властивості –  $0,30-0,40 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ . Більш «теплі» алюмінієві профілі мають термоміст шириною понад 30 мм, або багатокамерний термоміст, у якому проміжок між поліамідними пластинами заповнюється додатковим теплоізолятором, наприклад, пінополіуретаном. В результаті для такого профілю досягається значення опору теплопередачі  $0,5-0,6 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ , що не набагато гірше від відповідних характеристик профілів з дерева або ПВХ.

До основних архітектурних принципів кінця 20-го сторіччя та початку 21-го сторіччя слід віднести широке застосування конструкцій будинків із скляними фасадами [28]. У практиці будівництва з'явився зовсім новий конструктивний принцип – світлопрозорі фасадні системи. При цьому система може бути і не повністю світлопрозора, а складатися з комбінації світлопрозорих і непрозорих елементів утеплення, хоча ззовні опорядження будинку виглядає повністю виробленим із скла. Це обумовлює необхідність особливого аналізу конструктивних рішень утеплення фасадів із світлопрозорих конструкцій.

Конструкції стін з опорядженням прозорими індустріальними елементами складаються зі світлопрозорих елементів, несучого каркасу, до складу якого входять стійки, ригелі, елементи кріплення, непрозорих елементів і підрозділяються на системи з суцільним світлопрозорим фасадом, в якому масивною теплоізоляцією захищені тільки елементи перекриттів (рис. 1.6 а) та з комбінованим фасадом із світлопрозорими і непрозорими ділянками (рис.1.6 б). [29]

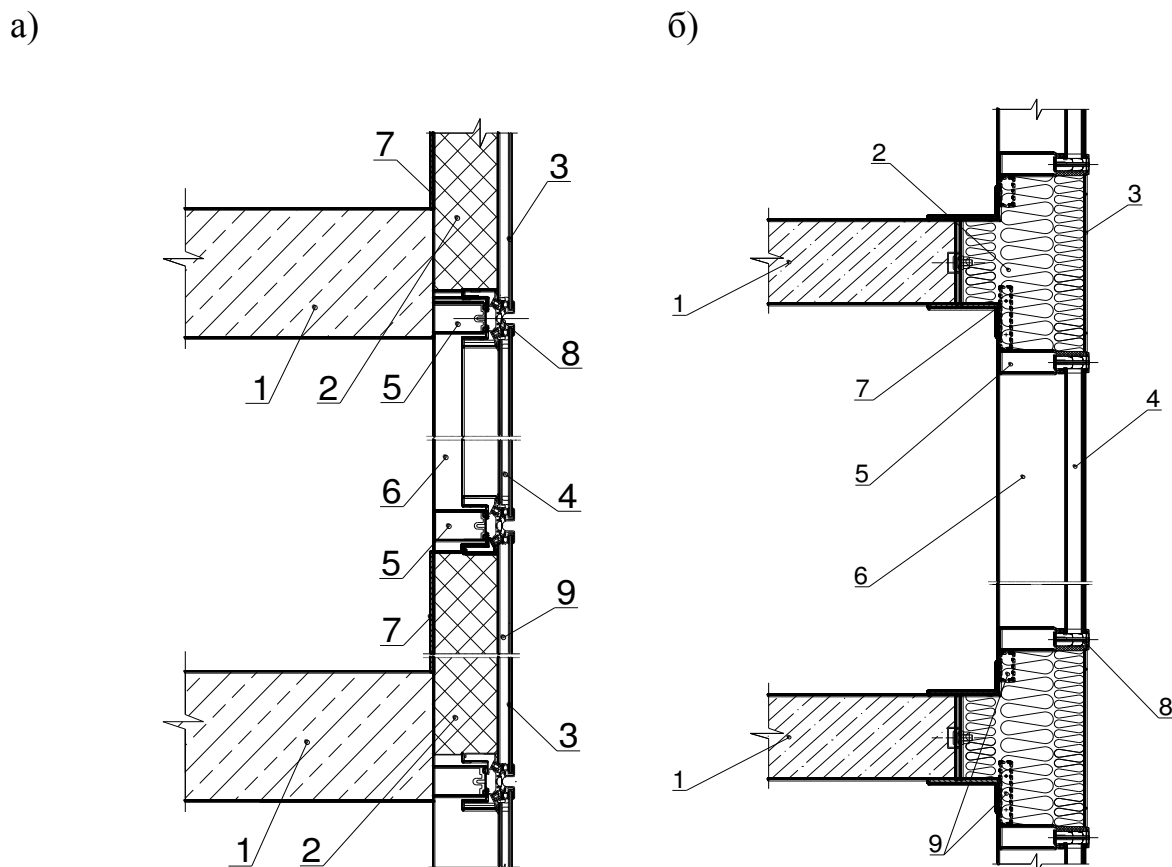


Рис.1.6. Конструктивна схема зовнішніх стін з комбінованим світлопрозорим фасадом (а) та з суцільним світлопрозорим фасадом з термоізоляцією плит перекриттів (б):

1 – плита перекриття, 2 – утеплювач, 3 – личкувальний світлопрозорий шар, 4 – склопакети, 5 – елементи несучого каркасу (ригелі), 6 – елементи несучого каркасу (стійки), 7 – кронштейн, 8 – елемент кріплення світлопрозорого личкувального шару, 9 – з'єднувальні елементи

За конструктивним рішенням та технологією зведення світлопрозорого

оздоблювального захисного шару конструкції підрозділяються на стійко-ригельні; з структурним та напівструктурним застосуванням; системи зі спайдерним склінням; подвійні фасадні системи [30,31].

Стійково-ригельні системи (рис.1.7) характеризуються наявністю виражених елементів кріплення, що здійснюється механічним способом за допомогою штапиків і спеціальних планок. Заповнення комірки між несучими конструкціями може здійснюватися глухим склінням, стулками, що відкриваються, чи непрозорими сендвіч-панелями із застосуванням різних теплоізоляційних матеріалів (комбіновані системи).

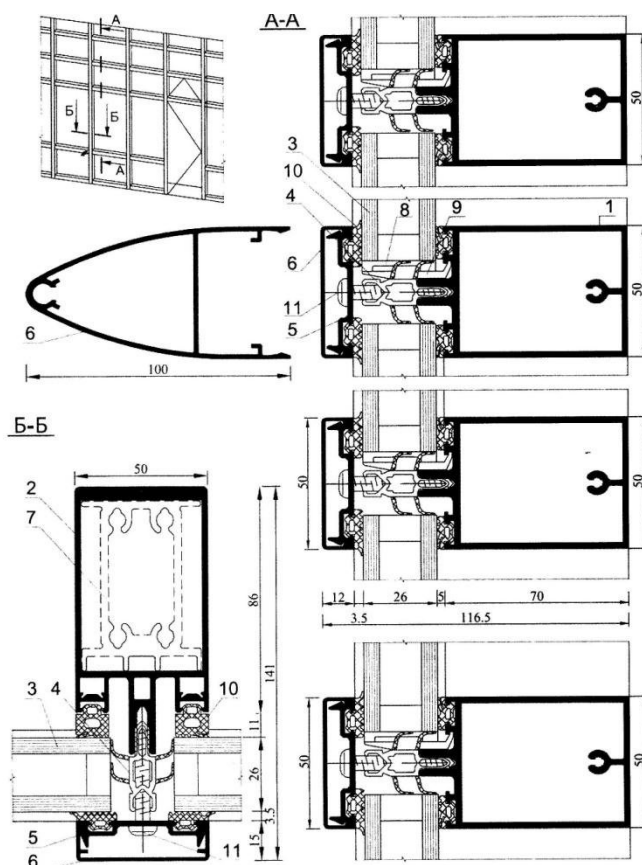


Рис. 1.7. Стійково-ригельна фасадна система з алюмінію

1 – ригель; 2 – стійка; 3 – склопакет; 4 – термоізоляційний міст; 5 – прижимний профіль; 6 – декоративна накладка; 7 – підсилювальний профіль; 8 – підкладка склопакета; 10 – ущільнювач склопакета; 11 – саморіз

Під структурним заскленням (рис.1.8) розуміють [32] систему скління, коли скло (склопакети) щільно прилягають одне до одного і не мають зовнішніх металевих накладок. Склопакети прикріплюють до алюмінієвої рами за допомогою клеєних з'єднань, вставляють в стійково-ригельний каркас або прикріплюють безпосередньо до несучого каркасу.

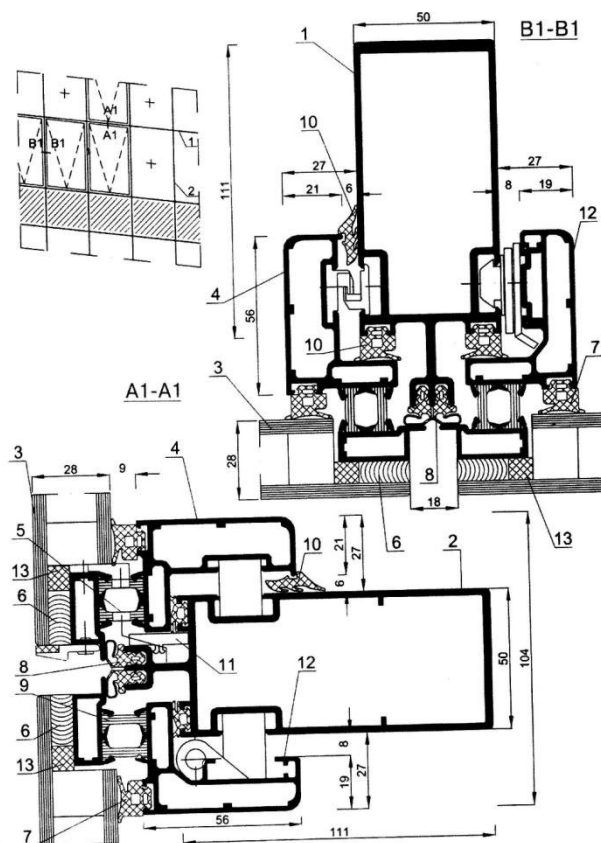


Рис.1.8. Фасадна система з структурним заскленням:

1 – стійка; 2 – ригель; 3 – склопакет; 4 – рама касети; 5 – отвір для відводу конденсату; 6 – структурний клей; 7 – ущільнювач; 8 – ущільнювач; 9 – термоізоляційний міст; 10 – ущільнювач; 11 – опора касети; 12 – стулка; 13 – обмежувач шпари для клею

«Спайдерне скління» - новий напрям у світлопрозорих системах. Герметизація досягається не шляхом прилягання склопакетів до профілів стійково-ригельної системи, а шляхом заливання спеціальним герметиком проміжку між склопакетами. Самі склопакети тримаються на спеціальних

кронштейнах – спайдерах, які у свою чергу прикріплюють до несучого каркасу. Цей тип застосування отримав назву «Spider Glass».

Подвійними чи розставленими фасадами називаються системи, що мають два контури скління [32,33]. До того ж перший контур – це звичайне одинарне скління, а другий – стандартне термоізолюване. Вони бувають близько розставленими (на 150-300мм) і коридорного типу (близько 1000 м).

Перед звичайним зовнішнім облицюванням будівлі (умовно «первинний фасад») зводиться друге облицювання – так звані вторинні фасади. Для скління первинного фасаду використовують енергозберігаюче скло нейтрального відтінку, а вторинного – просту віконну систему. У проміжку між оболонками монтуєть сонцезахисні пристрої. У вторинному фасаді монтуєть стулки і кватирки відповідних розмірів – для створення природної вентиляції [34].

Структурні й напівструктурні системи виконують з металевих профілів (алюміній + сталь), а в стійково-ригельних системах можуть використовуватись як алюмінієві, так і комбіновані (ПВХ + алюміній + сталь) профілі.

Особливістю в тепловому відношенні конструкцій фасадної теплоізоляції зі світлопрозорим зовнішнім шаром є те, що цей вид огорожувальних конструкцій визначає одночасно як тепловтрати приміщення, так і його теплопостачання. Для непрозорих конструкцій тепловий потік в холодну пору року завжди направлений у бік зовнішнього середовища, для прозорих конструкцій тепловий потік має в сонячну погоду двосторонню направленість і в залежності від властивостей перерахованих вище конструктивних елементів системи утеплення баланс теплових потоків (теплопритоки-тепловтрати) може бути позитивним і при низьких температурах зовнішнього повітря [6].

По тепловому принципу роботи стіни із світлопрозорим зовнішнім шаром є пасивними геліоконструкціями, які можна використовувати як елементи теплопостачання. Особливо це стосується комбінованих систем. Тому важливим є проведення досліджень по впливу на енергетичні властивості будівель теплового режиму комбінованих світлопрозорих конструкцій в зимові сонячні дні.

## 1.2. Конструктивні заходи з підвищення термічних властивостей світлопрозорих конструкцій

Термічні властивості світлопрозорих конструкцій залежать від комплексу неоднорідних елементів віконного блоку, його сполучення із основною частиною огорожувальної конструкції, фільтрації повітря через нещільності, зміни теплофізичних властивостей повітря в повітряному прошарку залежно від температурних умов зовнішнього й внутрішнього середовищ. Підвищення термічних характеристик СОК можливе шляхом збільшення числа шарів листового скла та утворення більшого числа повітряних прошарків (трьох-, чотирьохшарові). Але цей шлях є недостатньо ефективним, тому що при збільшенні шарів скла світлопропускання конструкції істотно знижується у порівнянні з двошаровим склінням (при тришаровому склінні - на 25%, при чотирьохшаровому - на 43%) [35], тому необхідне для забезпечення потрібного рівня освітлення збільшення площі скління в ряді випадків зводить нанівець отриманий теплоізоляційний ефект [36].

Цікавим напрямом підвищення теплоізоляційних властивостей світлопрозорих конструкцій є використання світлопрозорої ізоляції [37, 38] на основі кремнеземних аерогельних частинок, розміри яких становлять  $124 \text{ \AA}^0$ , що набагато менше довжини видимого світла і тому мають мале розсіювання. Теплоізоляційна властивість таких частинок обумовлена тим, що аерогель складається на 97% з повітряних пор, розмір яких менший ніж вільний пробіг молекул повітря, тому теплопровідність дорівнює  $0,019 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Якщо таку ізоляцію розмістити між шибамі скла, то теплопередача здійснюється за рахунок тільки променевої складової та теплопровідності. При заміні повітря сумішшю ( $\text{CO}_2 + \text{CCl}_2\text{F}_2$ ) теплопровідність може бути зменшена до  $0,011 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  і вікно з аерогелем товщиною 20 мм матиме опір теплопередачі  $1,98 \text{ м}^2\cdot\text{К/Вт}$ .



До недоліків аерогельного вікна варто віднести вимогу герметизації, труднощі при виготовленні однорідної монолітної маси аерогеля й тривалий процес виготовлення.

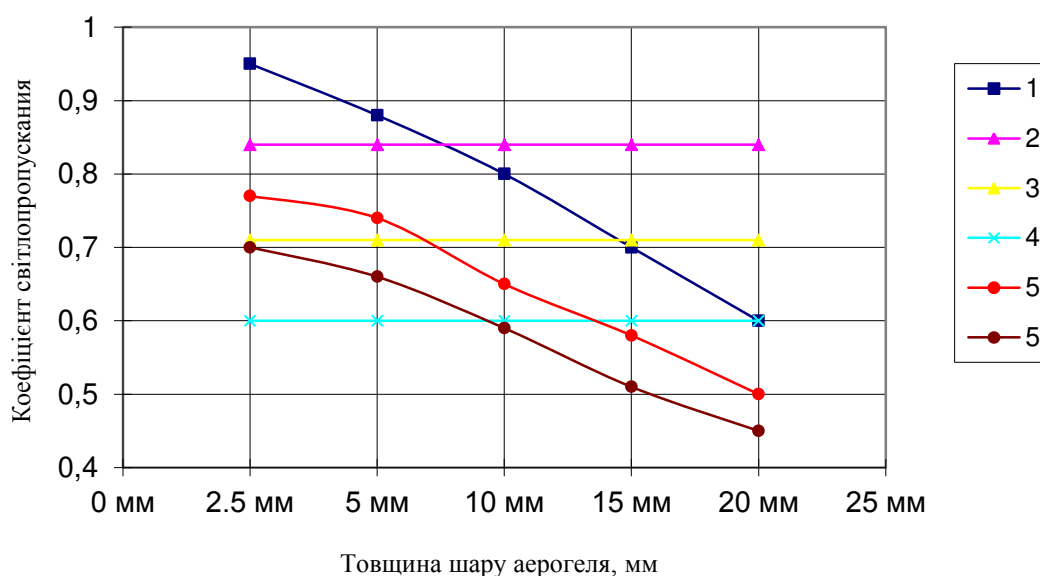


Рис.1.9. Графік зміни світлотехнічних властивостей склопакета з аерогелем кремнезему:

1 – аерогель; 2 - одношарове скління; 3 - двошарове скління; 4 - тришарове скління; 5 - аерогельне вікно ( аерогель між двома шарами скла).

Застосування скла з низьким випромінюванням суттєво підвищує загальні теплотехнічні властивості світлопрозорих конструкцій [38, 39, 40]. Скло з низькою тепловипромінювальною здатністю було відоме давно, однак мало істотні недоліки, тому що виготовляли його з використанням дорогіших металів, що мають низьку адгезію до скла. З розвитком технології виготовлення почали випускати скло з довговічним багатошаровим покриттям з недорогого матеріалу.

Низький коефіцієнт випромінювання скла з покриттям зменшує радіаційні втрати вікна. Таке покриття товщиною від 4000 до 6000 Å<sup>0</sup> пропускає світлові

промені в діапазоні 0,3-0,77 мкм і відбиває інфрачервону радіацію в діапазоні 2-100 мкм.

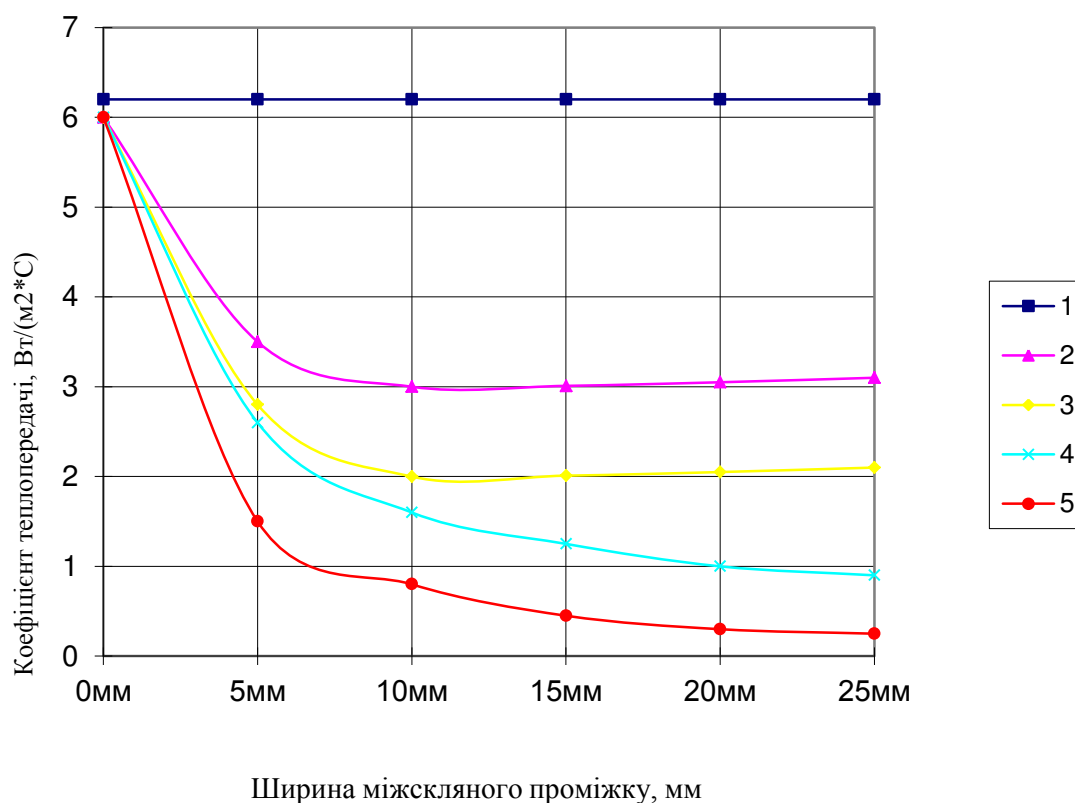


Рис. 1.10. Графік зміни теплотехнічних властивостей склопакета з аерогелем кремнезему у порівнянні із звичайними конструкціями вікон:

1 – одинарне скління; 2 – подвійне скління; 3 – подвійне скління з тепловідбиваючим покриттям; 4 – аерогельне вікно з атмосферним тиском у міжскляному проміжку; 5 – те ж, з тиском 10,1 кПа

На рис. 1.11 показана схема проходження променів через склопакет фірми “Glasson”, де 86% тепловипромінювання затримується в приміщенні [31].

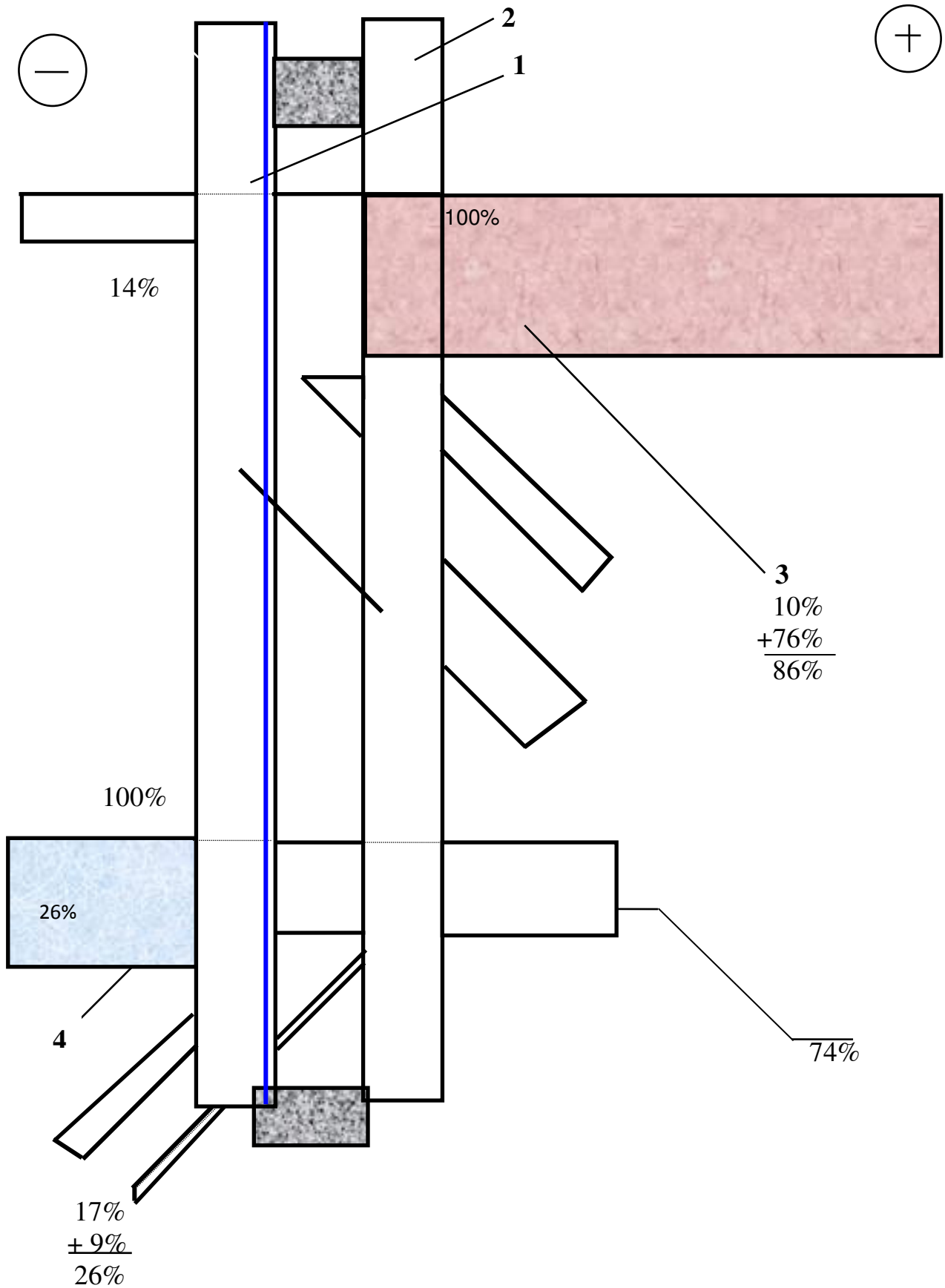


Рис. 1.11. Схема проходження променів через склопакет з тепловідбиваючим покриттям

На рис. 1.11:

1 – скло з покриттям; 2 – звичайне скло; 3 – довгохвильове теплове випромінювання поверхонь приміщення; 4 – короткохвильове видиме світло.

У табл. 1.1 наведені значення опору теплопередачі подвійного склопакета із селективним покриттям при обліку впливу алюмінієвого дистанцера з різними газовими заповненнями склопакета. Випромінювальна здатність одного скла – 0,1, іншого – 0,85.

Таблиця 1.1

**Залежність опору теплопередачі склопакета від газонаповнення та товщини між скляного прошарку**

Газ, яким наповнюється проміжок між шарами скла	Теплопровідність, Вт/м·К	Відстань між стеклами, мм			
		6	9	12	15
		Опір теплопередачі, м <sup>2</sup> ·К/Вт			
Повітря	0,025	0,39	0,46	0,53	0,54
Фторид сірки	0,013	0,36	0,37	0,38	0,39
Аргон	0,016	0,46	0,55	0,62	0,63
Криптон	0,0085	0,62	0,71	0,72	0,73

У цей час проводяться дослідження з матеріалами, що мають ще більшу довговічність, такими як  $Ti$  і  $Ti_9O_y$ , однак покриття з них не мають оптимальних оптичних властивостей. При дослідженнях використовують технологію напилювання в плазмі [41].

Розрізняють дві технології виготовлення скла з покриттям: шляхом осадження окисів металу на поверхню скла після його виготовлення (так зване м'яке покриття) і нанесення покриття з окислів олова в процесі виготовлення скла (тверде покриття, К-скло) [27]. По першій технології виготовлення скла з покриттям здійснюється осадження металу на склі у вакуумній камері за допомогою високовольтної напруги. Друга технологія (Pyrolitic-coated), розроблена в 1981 р. у Бельгії й використовується в США останні два роки.

Піролітичне покриття роблять у процесі виготовлення скла на одній і тій же машині шляхом набризкання окислу олова на розплавлене скло таким чином, що воно стає частиною скла, тому що його молекули міцно з'єднуються з молекулами скла. Таке покриття має більшу міцність.

У табл.1.2 [42] наведені основні характеристики склопакетів, що широко застосовуються у світовій практиці виготовлення віконних конструкцій. Очевидно, що теплотехнічні характеристики покриттів, виконаних по першій технології, вищі, ніж по другій, однак виготовлення склопакетів обходиться дорожче, тому що через можливість їхнього руйнування від вологи необхідна герметизація по краях склопакета. Крім того, скло з м'яким покриттям повинне бути встановлене в склопакет протягом шести місяців після виготовлення, в іншому випадку воно руйнується. Велика перевага при виготовленні К-скла - висока міцність зчеплення покриття зі склом. Склопакет із цього скла з повітряним прошарком товщиною 12,5 мм пропускає 76% сонячної енергії, або  $486 \text{ Вт/м}^2$ , а склопакет зі скла з Low-E покриттям -  $371 \text{ Вт/м}^2$ , тому такі вікна мають переваги з погляду пасивного використання сонячної енергії. Необхідно відзначити, що підвищення опору теплопередачі у вікнах зі склом, виготовленим по першій технології, не завжди приводить до зниження енерговитрат, тому що поверхневе покриття знижує світлопрозорість.

Розгляд переваг і недоліків покриттів на окремих поверхнях вікна (нумерація поверхні – зовні усередину) показує, що перша поверхня ніколи не має покриття через можливість корозії й руйнування; на другій поверхні внаслідок нанесення покриття одержують найвищий опір теплопередачі склопакета й низький коефіцієнт світло пропускання; при розміщенні покриття на третій поверхні одержують трохи менший опір теплопередачі виробу, чим на другій, але через відбиття довгохвильової радіації зростає температура міжскляного проміжку, тому в зимовий час збільшується комфорт у приміщенні, і ризик появи конденсату на четвертій поверхні зменшується; при нанесенні покриття на четверту поверхню одержують менший опір теплопередачі, менші комфорт і небезпека руйнування покриття.

**Основні фізичні характеристики склопакетів, що виготовлені за різними технологіями**

Фірма-виробник	Технологія	Коефіцієнт відбиття	Коефіцієнт світло пропускання	Відсоток пропускання сонячної енергії, %	Опір теплопередачі, $\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$
“Airco”	I	0,1 - 0,15	0,71	50	0,54
“Cardinal IG”		-	0,64	47	0,54
“Ford”		0,13	0,81	58	0,54
“Guardian”		0,1	0,71	52	0,54
“AFG”	II	-	0,79	55	0,46
“Ford”		0,35	0,86	76	0,44
“Glaverbel”		0,13 – 0,15	0,68	59	0,51
“PPG”		0,31 – 0,35	0,79	51	0,44

Останнім часом у технології виробництва ефективних вікон з'явилася новинка – теплове дзеркало, у якому прозора полістиролова або етиленпропіленова плівка товщиною 0,013 – 0,13 мм із покриттям, що відбиває довгохвильову радіацію (зі зразковою структурою: діелектрик ( $\approx 30$  нм)/метал ( $\approx 10-20$  нм)/діелектрик ( $\approx 30$  нм)/метал і т.д.), розміщується в міжскляному проміжку склопакета [5]. Ці покриття, кількість яких коливається від 8 до 12 залежно від типу плівки і її функціонального призначення, наносяться на плівку методом вакуумного магнетронного напилювання для надання необхідних спектрально-селективних властивостей. Шар металу (золото, срібло, оксид індію та ін.) забезпечує селективне пропускання електромагнітних хвиль у спектрі випромінювання, прозорі для випромінювання шари діелектричних покриттів захищають метали від окислювання. Внаслідок установаження натягу

такої плівки в міжскляному проміжку зменшується не тільки конвекція, але й істотно відтинаються величезні (70%) втрати теплоти шляхом випромінювання, які скорочуються зі зменшенням ступеня чорноти плівки (коефіцієнт довгохвильового відбиття такого теплового дзеркала варіюється від 0,04 до 0,15), що у свою чергу збільшує опір теплопередачі конструкції скління на 30%-60%.

Підвищення опору теплопередачі склопакета з подвійним склінням до  $0,43 - 0,73 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  відбувається через поділ повітряного міжскляного проміжку на дві частини, що в значній мірі наближає до тришарового скління без збільшення маси вікна й практично з незначним збільшенням його вартості. У деяких випадках застосовують двошарову плівку, що створює в склопакеті опір теплопередачі  $0,5 - 0,85 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ . Існує 12 видів плівки «Теплове Дзеркало™» різної колірної гами від прозорої, блакитної і зеленої до бронзової й золотавої. Плівки маркуються залежно від світлопропускної здатності - НР 38, НР 28, НР 18 а також НМ88, ТС88, SC75, НМ77, НМ22, де цифрою позначене пропускання видимого світла у відсотках. Цей ряд наведений від відносно низькою (для цих плівок) здатності, що відбиває теплове випромінювання (60%) і високої світлопрозорості (88%) плівки НМ88, до максимально затіненої НМ22 (22% пропускання видимого світла й 90% відбиття ІФК випромінювань). Застосування цих вікон можливе в будь-яких будівлях, де необхідний додатковий обігрів приміщень та високі теплозахисні характеристики вікон - це житлові й промислові будинки, школи, лікарні, дитячі установи.

Однак, проблеми при виготовлення склопакетів «Теплове Дзеркало», пов'язані із придбанням і налагодженням спеціального дорогого устаткування (печі для термоусадки плівки, стіл для розмотування, насос-екструдер), контроль якості продукції, недовговічність органічної плівки, поки не сприяють масовому розвитку цієї технології у світі, що обмежується лише поодинокими виробниками.

Вакуумний склопакет - розробка Дослідницького інституту по

використанню сонячної енергії в США [41]. На рис. 1.12 представлено порівняння теплотехнічної ефективності вікон з одно - і двошаровим склінням, склопакета з поверхневим покриттям скла та вакуумних вікон, які по теплозахисту можуть порівнюватись з добре ізольованими стінами та забезпечують при цьому можливість використання сонячної радіації.

Впровадженню цих конструкцій заважають такі проблеми:

1 - руйнування вакуумного скла від вітрового навантаження, атмосферного тиску й різних температурних деформацій;

2 - випадання конденсату в місцях контакту скляних кульок зі склом.

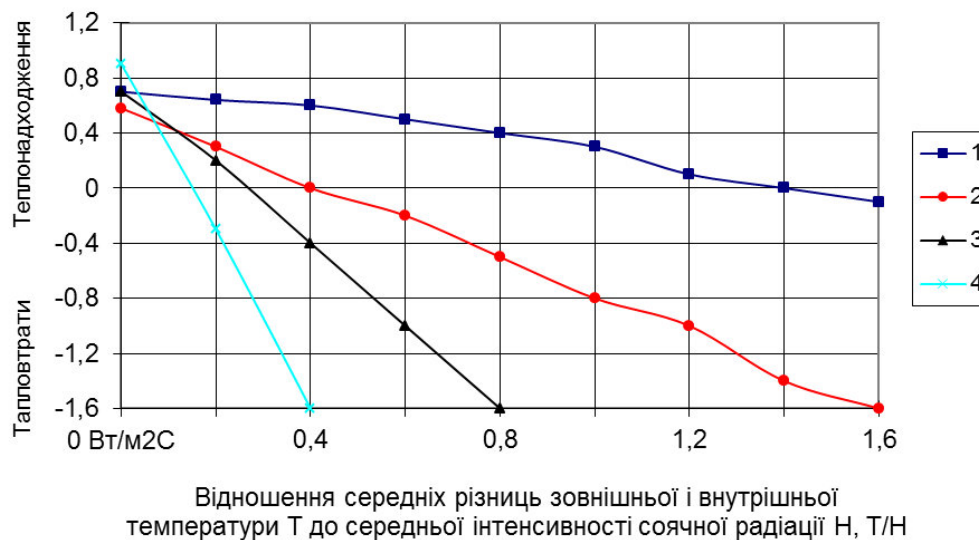


Рис. 1.12. Порівняльні теплотехнічні характеристики віконних конструкцій:

1 – вакуумне вікно; 2 – тришарове скління з поверхневим покриттям; 3 – двошарове скління; 4 – одношарове скління

Підвищення мінімальної температури внутрішньої поверхні скління склопакетів можливе при застосуванні дистанційних рамок типу TPS, Termix, Swiggle Strip, рамок з нержавіючої сталі, ПВХ тощо. Результати теоретичних та експериментальних випробувань [42,43,44,45] свідчать про можливість суттєвого підвищення температури внутрішньої поверхні скління в крайових зонах та визначеному збільшенні приведенного опору теплопередачі склопакетів з подібними дистанційними рамками.



Для комплексної оцінки теплотехнічної ефективності дистанційних рамок різного конструктивного рішення пропонується [42] введення поняття приведенного конструктивного коефіцієнта теплопровідності –  $\lambda_{np}$ , який враховує більшість з перерахованих факторів і для комбінації «рамка – шар герметика» має вигляд:

$$R_{np} = \frac{\sum(2d_1 \cdot \lambda_1 + d_2 \cdot \lambda_2)}{b}, \quad (1.1)$$

де  $d_1, d_2$  - товщина стінок рамки, м;

$\lambda_1, \lambda_2$  - теплопровідність матеріалу стінок рамки, Вт/(м·К).

Характеристики матеріалу непрозорої частини вікон впливають на теплозахисні показники. З усіх матеріалів найкращі теплозахисні властивості має дерево (рис.1.5). Значення опору теплопередачі віконної конструкції змінюється в таких діапазонах в залежності від типу скління: подвійного – (0,36...0,37) м<sup>2</sup>·К/Вт; подвійного з тепловідбиваючим покриттям на стеклах – (0,51...0,60) м<sup>2</sup>·К/Вт; потрійного – (0,41...0,63) м<sup>2</sup>·К/Вт. В той же час, сучасні вимоги до опору теплопередачі віконних конструкцій становлять 0,75 м<sup>2</sup>·К/Вт [12], що можливе лише при використанні склопакетів з енергоефективними покриттями та збільшенні товщини дерев'яного обрамлення або кількості камер в ПВХ-системах [45,46].

### **1.3. Дослідження впливу повітропроникності світлопрозорих огорожувальних конструкцій на їх теплові характеристики**

Повітропроникність огорожень є причиною підвищення витрат теплоти на забезпечення необхідних температур внутрішнього повітря. В той же час інфільтрація зовнішнього повітря забезпечує в певній мірі необхідну вентиляцію приміщень. Проходячи через товщу огорожень та щілини вікон, повітря дещо нагрівається і таким чином витрата тепла на його нагрів знижується по відношенню до нагріву повітря, що подається в приміщення системою вентиляції або аерації. В холодний період року фільтрація повітря

крізь елементи огороджувальних конструкцій приводить до інтенсифікації тепловтрат. Комплекс робіт з вивчення цих процесів тепломасообміну в огороджувальних конструкціях, у тому числі світлопрозорих, були проведені у минулому сторіччі [47 - 62].

При фільтрації повітря відбувається зміна умов конвективного тепломасообміну на поверхнях огорожень. Так, при інфільтрації повітря на внутрішній поверхні коефіцієнт конвективного теплообміну зменшується, а на зовнішній поверхні – збільшується. Через притвори та стики зовнішнього скла повітря подається в міжскляний проміжок, де нагрівається, а потім через нещільності внутрішньої рами попадає в приміщення. Тепловтрати при цьому збільшуються через зниження температури на поверхні внутрішнього скла. Додаткові витрати тепла в приміщенні виникають, якщо температура інфільтраційного повітря нижча від температури внутрішнього повітря (тепловтрати від інфільтрації прийнято розраховувати окремо).

Вікна з склопакетами володіють меншою повітропроникністю ніж звичайні рами. На відміну від старих вікон, що не забезпечували щільну ізоляцію, сучасні вікна у закритому стані перешкоджають природному некерованому обміну повітря. Це призводить не лише до погіршення санітарних якостей повітря (у сучасних екологічних умовах рівень сумарного хімічного забруднення повітряного середовища житлових і громадських будинків у 1,84 рази перевищує забрудненість зовнішнього повітря), але і до накопичування у ньому надлишків вологи, що утворюється в процесі життєдіяльності [63].

Надмірна вологість у приміщеннях є причиною появи цвілі на меблях, стінах і стелях, негативно позначається на самопочутті людей, випадає у вигляді конденсату на вікнах і відкосах. При встановленні вікон з ПВХ-профілів, що мають підвищену герметичність, але недостатню теплоізоляцію (з однокамерними склопакетами із звичайного скла і з заповненням сухим повітрям), випадіння конденсату спостерігається майже за будь-яких від'ємних температурах зовнішнього повітря, якщо фрамуги не відкриті [64].

Для забезпечення припливу повітря в сучасних вікнах слід застосовувати додаткові вентиляційні прилади, що забезпечують режим мікропровітрювання приміщень. За своїм конструктивним вирішенням додаткові вентиляційні системи, що застосовуються з віконними системами, можна умовно поділити на 4 основні типи [65]: частково повітропроникні ущільнювачі; вентиляційні заслінки, планки, а також канали, що встановлюють у рами; вентиляційні прилади, що встановлюють під нижньою чи над верхньою частинами рами; різноманітні обмежники відкривання вікон, що входять до комплекту віконної фурнітури.

При способі вентиляції за допомогою повітропроникних ущільнювачів для кожного периметру стулки розраховується довжина частини стандартного ущільнювача, яка підлягає заміні на ущільнювач, що забезпечує проміжок між рамою та стулкою близько 2 мм (рис.1.13).

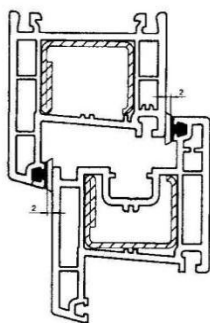


Рис. 1.13. Частково повітропроникні ущільнювачі

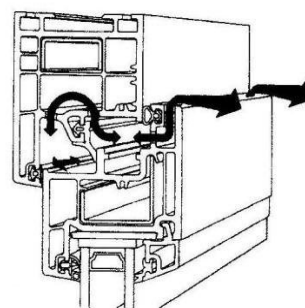


Рис. 1.14. Вентиляційні канали, що встановлюються в рами

Вентиляційні прилади, що встановлюються в рами, являють собою спеціальні профілі з ПВХ, що мають спеціальні вентиляційні канали (рис. 1.14), чи окремі планки, що монтується у вифрезерований (у дерев'яних вікнах) паз. Аналогічною є конструкція і вентиляційних пристроїв, що встановлюються над чи під рамою.

Організація повітрообміну в житлових квартирах має ряд суттєвих недоліків:

- економічність систем природної вентиляції низька, теплота повітря, що

виходить з квартири, повністю втрачається; цю проблему можна вирішити шляхом установки утилізаторів теплоти повітря, яке виходить в припливно-витяжній системі вентиляції, та тим самим знизити втрати теплоти з повітрям, що виходить, на 15%;

- максимальне ущільнення вікон і балконних дверей приводить до того, що практично всюди усунуто нещільності, тим самим зупинено в значній мірі притік повітря, отже, перестає працювати система природної вентиляції.

Для вирішення цієї проблеми слід у будівлях нового будівництва виконувати вимушену припливно-витяжну вентиляцію з установкою утилізаторів теплоти витяжного повітря пластинчастого типу з перехресною схемою руху теплоносія або регенеративного типу.

Дослідження інфільтрації повітря через віконні блоки в основному носять експериментальний характер та визначають залежності між кількістю інфільтраційного повітря та опором теплопередачі [66-70]. Кількісний зв'язок між цими величинами дає можливість оцінювати ступінь зниження температури на внутрішній поверхні скла, а також мінімально допустиму ступінь герметизації та в зв'язку з цим обирати необхідні герметичні матеріали.

Вбудовані в зовнішні стіни будівель сучасні віконні блоки часто мають вузькі віконні коробки [71]. При цьому не враховується спільна робота стіни та вікна, в результаті чого при експлуатації будівлі з вузькими віконними коробками утворюються підвищені тепловтрати будівлі через віконні відкоси зовнішніх стін, враховуючи утворення на них конденсату, а інколи і їх промерзання. Для усунення даної проблеми зазвичай виконується зміщення вікон вглиб перерізу за допомогою спеціальних профілів або утеплення відкосів стін.

Дослідження впливу температурного режиму зовнішнього повітря на повітропроникність ПВХ вікон проводились у лабораторії НДІБФ РААБН [72]. За нормальних умов випробувань повітропроникність відповідала класу «А». При проведенні випробувань при  $t_3 = -20$  °С приріст повітропроникності при  $\Delta p = 100$  Па мав всього  $0,41 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$ , проте із пониженням температури до

-30 °С відбувся її різкий стрибок до 3,6 м<sup>3</sup>/(год·м<sup>2</sup>), який понижує клас повітропроникності на ступінь. При  $\Delta T = 70$  °С приріст повітропроникності мав 7 м<sup>3</sup>/(год·м<sup>2</sup>). Таким чином, при пониженні температури зовнішнього повітря і, відповідно, температури зовнішньої поверхні ПВХ профілів та ущільнювачів повітропроникність віконної конструкції суттєво зростає.

Використовуючи концепцію нормування повітропроникності, що прийнята в [12], для визначення нормованого опору повітропроникності,  $R_{gn}$ , (м<sup>2</sup>·год·Па)/кг, та фактичного опору повітропроникності  $R_g$ , (м<sup>2</sup>·год·Па)/кг, світлопрозорих конструкцій маємо такі формули:

$$R_{gn} = \frac{(\Delta p / \Delta p_0)^{2/3}}{G_n}, \quad (1.2)$$

$$R_{gn} = \frac{(\Delta p / \Delta p_0)^n}{G_s}, \quad (1.3)$$

де  $G_n$  та  $G_s$  – відповідно нормована [12] та експериментально визначена [77] повітропроникність конструкції при  $\Delta p_0 = 10$  Па, кг/(м<sup>2</sup>·год); 2/3 – нормований показник режиму фільтрації [12,78,79,80];  $n$  - показник режиму фільтрації конструкції, що визначається експериментально по [73].

Наведені розрахункові співвідношення можуть розглядатися як базові при нормуванні повітропроникності СОК, що в свою чергу дозволить по-новому оцінити значимість сучасних світлопрозорих конструкцій у створенні внутрішнього мікроклімату будівель, особливо коли проектується енергоефективні будівлі [74-78].

#### **1.4. Дослідження процесів тепломасопереносу у світлопрозорих конструкціях**

Питання досліджень та подальшого управління процесами теплообміну в світлопрозорих конструкціях мають як теоретичне, так і велике прикладне значення при розробленні нових віконних конструкцій [80]. При розробленні нових віконних конструкцій треба вирішувати проблему низьких температур

внутрішнього скління в холодний період року в порівнянні з температурами поверхонь інших елементів огорожувальних конструкцій в приміщенні, що призводить до наявності дискомфортних зон для знаходження людей поблизу вікон.

Результати досліджень складного тепломасопереносу у сучасних багатошарових віконних конструкціях наведені у роботах [72, 76, 80-86]. Одним з ефективних способів підвищення температури внутрішнього скління є електричний обігрів вікон [87], що особливо ефективно спільно з тепловідбивним покриттям на поверхні скління [88, 89, 90]. У роботах [91, 92] представлені результати експериментального дослідження обігріву та впливу тепловиділення в міжскляному просторі на теплові характеристики потрійного скління.

Питання процесів тепломасообміну при застосуванні інфрачервоних обігрівачів вивчались у роботі [93], але дослідження були направлені на конструкції приміщень виробничих будівель.

Основною особливістю склопакета з електрообігрівуючим склом є використання електропровідного шару "твердого" покриття або к-скла [94,95,96]. Інший варіант конструкції електрообігрівуючого вікна передбачає обігрів міжскляних повітряних прошарків. Даний варіант електрообігрівуючих вікон більш простий у виготовленні.

Результати детальних досліджень особливостей формування температурного режиму віконних конструкцій в залежності від їх розміщення по перерізу у прорізу стіни проведені у роботі [80], але ці дослідження здійснювались для кліматичних умов Сибіру.

Властивості скляних елементів вивчались у роботі [97], але експеримент був направлений тільки на визначення теплового розширення.

Питання скорочення енерговитрат і створення комфорту приміщень будівель з використанням фасадних заскленних систем відображені в роботі [98], в якій аналізується модель взаємодії клімату і внутрішнього середовища, викладаються питання використання сонячної і вітрової енергії,

співвідношення площі заскленої частини до загальної площі стіни, а також залежність енерговитрат від площі засклення і орієнтації приміщень.

У роботі [85] досліджувалась актуальна проблема забезпечення енергоефективності світлопрозорих огорожувальних конструкцій шляхом вибору оптимального конструктивного рішення вузла примикання віконного (дверного) блоку до непрозорої частини стіни. Розрахунки лінійного коефіцієнта теплопередачі проводились для вузлів примикання однієї конструктивної системи з ПВХ профілю до декількох типів зовнішньої непрозорої стінової конструкції.

Інша можливість зниження тепловтрат - використання рухомих екранів і жалюзей з тепловідбивним покриттями. Ефективність використання екранів і жалюзей з тепловідбивним покриттями в конструкціях вікон досліджена в роботах [99,100]. Використання екранів і жалюзі з тепловідбивними покриттями крім скорочення теплових втрат призводить і до збільшення температури внутрішнього скління, що значно підвищує комфортність всередині приміщень.

Натурні вимірювання на звичайному вікні з двошаровим склінням показали, що установка жалюзі в міжрамну зону в 1,5 рази зменшила теплові втрати, а встановлення екрану привела до зниження в 2,6 рази [101]. Перехідний процес збільшення температури поверхні внутрішнього скла і зниження щільності теплового потоку через скління при опусканні екрану і закритті жалюзі відбувався досить швидко і завершувався протягом півгодини, що пов'язано з малою тепловою інерційністю віконних конструкцій.

Конструктивні рішення організації всередині вікна повітряних потоків для комплексного вирішення питань вентиляції приміщень на початку 70-х років минулого століття почали реалізовуватися в ряді європейських країн [75,82] у вигляді конкретних конструкцій. Таке вікно дозволяє знизити втрати тепла і підвищити температуру внутрішнього скла в холодний період року, а також зменшити перегрів і скоротити витрату енергії на кондиціонування приміщень влітку. Інтерес до вивчення різних особливостей вікон, що вентилюються,

відображений у ряді вітчизняних та зарубіжних робіт [102-119].

Вікна, вентиляровані повітрям з приміщення, в зарубіжній літературі частіше називають "витяжні вікна". У таких вікнах звичайно повітря з приміщення проходить міжскляний прошарок і видаляється через вентиляційний канал (див. рис. 1.15 а), або безпосередньо видаляється в навколишнє середовище (див. рис. 1.15 б). У холодну пору року вікна, вентиляровані внутрішнім повітрям, дозволяють частково утилізувати теплоту повітря, що видаляється з приміщення, і знизити необхідну потужність системи опалення. У теплу пору року такі вікна зменшують надходження в приміщення тепла, в результаті чого знижується навантаження на систему кондиціонування.

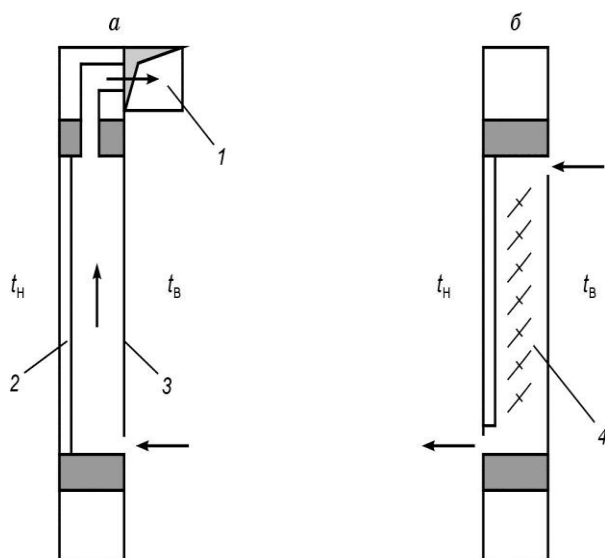


Рис. 1.15. Вікна, вентиляровані повітрям з приміщення: а – повітря видаляється системою вентиляції; б - природна витяжка повітря;

1 - витяжний повітропровід, 2 - склопакет, 3 - скло, 4 - міжрамні жалюзі.

Збільшення температури повітря в прошарку вікна при його вентиляванні призводить до значного зростання температури внутрішнього скла із зростанням витрат повітря. Особливо помітне збільшення температури спостерігається в нижній зоні скління, де температура поверхні скла збільшується на 5-11 °С. У роботі [108] отримано, що опір теплопередачі скління вентиляваного вікна збільшувався із зростанням витрат повітря, що



вентиліює, і зі зменшенням товщини вентиляованого прошарку. Слід зазначити, що темп збільшення опору теплопередачі уповільнювався із зростанням витрат вентиляованого повітря. Цей фактор має значення при виборі оптимальної витрати повітря через вентиляоване вікно [110,111].

### **1.5. Висновки за розділом**

1. Основні функції світлопрозорих огорожувальних конструкцій полягають у забезпеченні відповідного режиму освітлення приміщень, необхідних ізоляційних властивостей теплоізоляційної оболонки будинків, а також забезпечення нормативних енергетичних показників будинків. Забезпечення виконання цих різних за фізичним змістом функцій в одній конструкції потребує спеціального аналізу її процесів переносу енергії.

2. Ці процеси вивчаються шляхом експериментальних досліджень методами фізичного моделювання процесів тепломасопереносу у світлопрозорих огорожувальних конструкціях у кліматичних камерах і визначення фактичних їх показників в умовах експлуатації, а також шляхом математичного моделювання цих фізичних процесів.

Загальний алгоритм дисертаційних досліджень наведений на рис. 1.16, за яким встановлювались технічні можливості підвищення енергетичних параметрів будинків з високим коефіцієнтом скління фасаду житлових та громадських багатоповерхових будівель.



Рис.1.16. Методичний алгоритм дисертаційних досліджень

## **РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ СВІТЛОПРОЗОРИХ КОНСТРУКЦІЙ**

### **2.1. Основні положення методичної структури проведення досліджень**

В основу досліджень покладений системний принцип оцінки теплових показників світлопрозорих огорожувальних конструкцій. Дослідження передбачали аналітичний аналіз процесів теплопередачі крізь світлопрозорі елементи ізоляційної оболонки будинків та експериментальні дослідження їх основних експлуатаційних показників. В основу експериментальних досліджень були покладені положення методик [14, 15, 73, 120-123] з урахуванням положень методик [124-126].

Експериментальні дослідження проводились в лабораторних умовах шляхом моделювання процесів тепломасопереносу крізь огорожувальні світлопрозорі конструкції в умовах експлуатації конструкцій. За результатами експериментальних досліджень визначався вплив конструктивних параметрів конструкцій на їх теплотехнічні властивості.

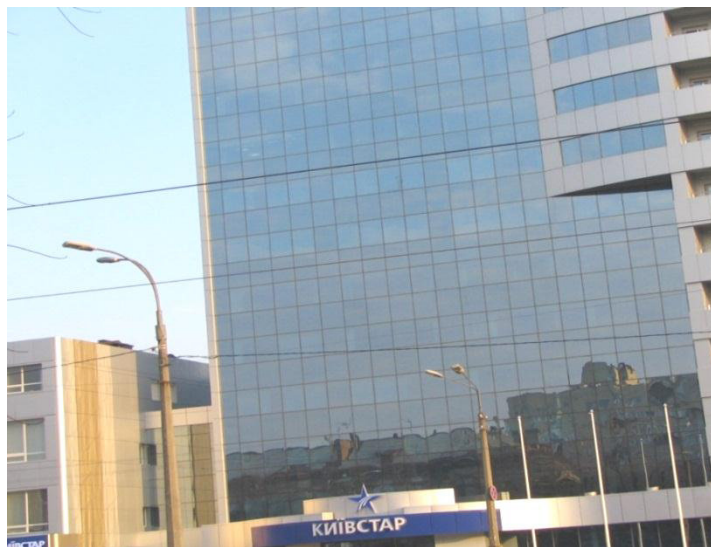
Аналітичні дослідження включали удосконалення інженерного розрахунку для оцінки енергетичних характеристик світлопрозорих конструкцій та визначення особливостей формування теплового режиму стінових фасадних конструкцій житлових будівель, що було основою для визначення технічних принципів забезпечення позитивного теплового балансу конструкцій.

Критеріями відбору будівлі для проведення натурних експериментальних досліджень були конструктивні особливості теплоізоляційної оболонки будівлі - ступінь скління фасаду; конструктивні типи світлопрозорих та непрозорих елементів фасаду; поверховість; кліматична зона експлуатації; термін експлуатації будівлі. Згідно цих критеріїв для проведення експериментальних натурних досліджень було обрано будівлю готельного комплексу, що

експлуатується у 1-й температурній зоні України (м. Харків). Загальний вид фасаду будівлі наведено на рис. 2.1. Конструктивний тип будівлі – монолітно-каркасний є одним з найбільш поширених в Україні для нового будівництва багатоповерхових будинків.



а



б

Рис. 2.1. Види фасаду будівлі, де проводились натурні експериментальні дослідження: а – м. Харків; б – м. Київ

Теплоізоляційна оболонка будівлі складалась з чотирьох конструктивних типів світлопрозорих конструкцій та непрозорої частини з газобетонної кладки з вентиляваним фасадним облаштуванням. Поєднання на одній будівлі сучасних конструктивних типів на її фасаді і обумовило вибір цього об'єкту для проведення експериментальних досліджень властивостей огорожувальних конструкцій.

Типи світлопрозорих конструкцій, що досліджувались у натурних умовах експлуатації: 1 – стійково-ригельний фасад вітражного типу, світлопрозора частина якого була засклена однокамерними склопакетами загальною товщиною 36 мм з енергозберігаючим покриттям на внутрішньому склі (8 – 20Ar – 8 Low-e); 2 – структурний фасад вітражного типу; 3 – спайдерний фасад; 4 – світлопрозорі віконні конструкції.

Алгоритм експериментальних досліджень в натурних умовах експлуатації, розроблений з урахуванням мети досліджень, наведений на рис.2.2.

Об'єктом досліджень теплового режиму сучасних світлопрозорих конструкцій, що проводились у натурних умовах експлуатації та у лабораторних умовах, була будівля, вид якої наведений на рис. 2.1 б (м. Київ).

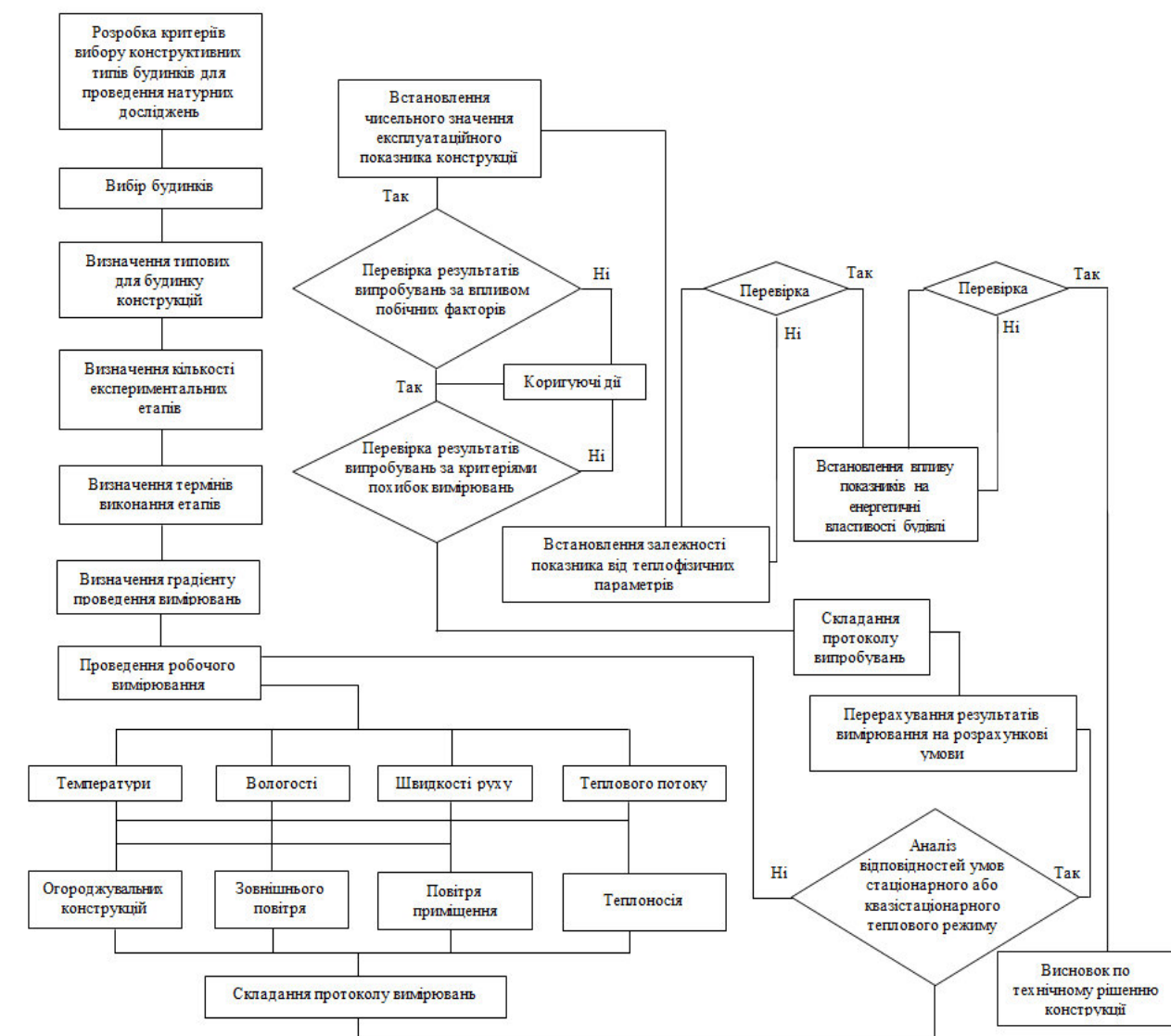


Рис. 2.2. Алгоритм експериментальних досліджень світлопрозорих конструкцій в натурних умовах експлуатації

Комплексні дослідження у натурних умовах експлуатації, в умовах фізичного моделювання у кліматичній камері, а також шляхом математичного моделювання температурних режимів конструкцій наведеного об'єкту дозволили оцінити вплив різних факторів на формування теплових властивостей конструкцій світлопрозорого фасаду. Алгоритм експериментальних досліджень в умовах фізичного моделювання процесів теплопередачі наведений на рис. 2.3.

Дослідження в умовах експлуатації проводились при температурно-вологісних параметрах, які були на час проведення вимірювань і які відрізнялись від розрахункових проектних умов. Тому під час лабораторних досліджень проводилось точне оцінювання параметрів конструкцій на їх відповідність нормативним вимогам.

Детальні методичні положення експериментальних досліджень в умовах фізичного моделювання процесів тепломасопереносу у світлопрозорих конструкціях наведені у розділі 2.3.

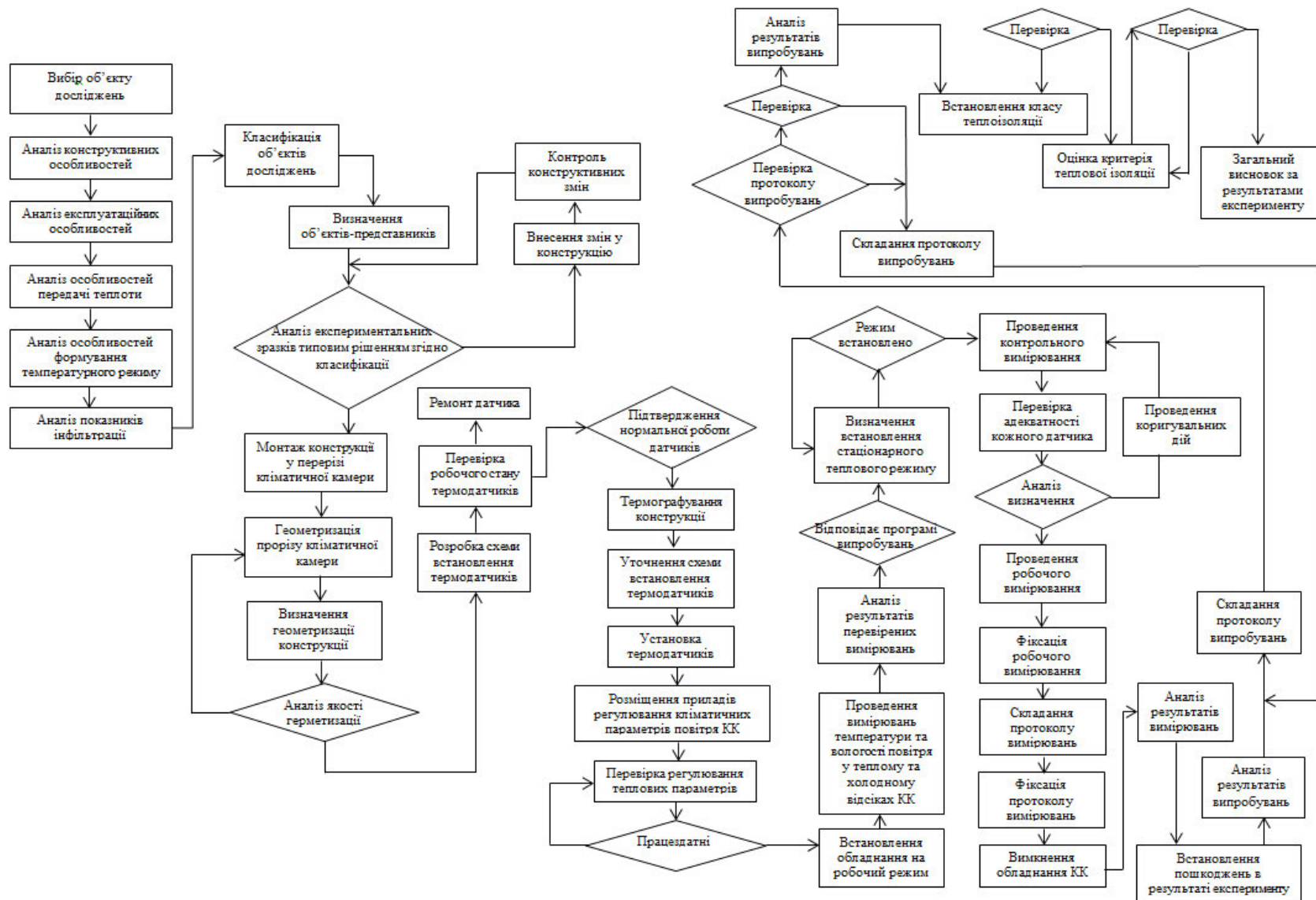


Рис. 2.3. Алгоритм лабораторних камерних досліджень теплових характеристик світлопрозорих огорожувальних конструкцій

## 2.2. Математичне обґрунтування переносу теплоти через світлопрозорі огороження

### 2.2.1. Витрати теплоти на нагрів повітря, що інфільтрується

Для сучасних вікон повітропроникність зазвичай невелика, але для дерев'яних вікон зі спареними і роздільними рамами, що виготовляються за традиційними технологіями [5, 21], повітропроникність дуже значна. Збільшення тепловтрат вікна при повітропроникності відбувається в результаті нагрівання повітря і внаслідок зниження температури внутрішнього скління. Загальна картина температурного поля перетину огороження в зоні повітропроникного стику показана на рис. 2.4 [59]. Через щілину в стику всередину проходить і нагрівається повітря. Температура повітря на виході з щілини залишається нижче температури на внутрішній поверхні огороження  $\tau_x$  близько щілини.

Додаткові тепловтрати при врахуванні повітропроникності у вигляді додаткового потоку  $\Delta q$ , віднесеного до 1 м<sup>2</sup> вікна [59], становлять:

$$\Delta q = \Delta q_{\tau} + \Delta q_j = (\tau_B - \tau_{B,i})/R_B + C_B \cdot G \cdot (t_B - t_{m,ck}), \quad (2.1)$$

де  $\tau_B - \tau_{B,i}$  - температури поверхні внутрішнього скла відповідно без та при інфільтрації, °С;

$R_B$  - опір тепловіддачі від внутрішнього скла до повітря, м<sup>2</sup>·К/Вт;

$t_{m,ck}$  - температура повітря в міжскляному проміжку, °С;

$C_B$  - питома теплоємність повітря, Дж/(кг·К);

$G$  - кількість повітря, що проходить через одиницю площі вікна в одиницю часу, коефіцієнт повітропроникності, кг/(м<sup>2</sup>·год).

Величину  $\Delta q$  можна виразити через розрахункову різницю температур ( $t_B - t_3$ ), ввівши коефіцієнти [59]:



$$A_G = \frac{t_B - t_{M,CK}}{t_B - t_3}, \quad (2.2)$$

$$A_\tau = \frac{\tau_B - \tau_{B,i}}{R_B \cdot c_B \cdot G \cdot (t_B - t_3)}, \quad (2.3)$$

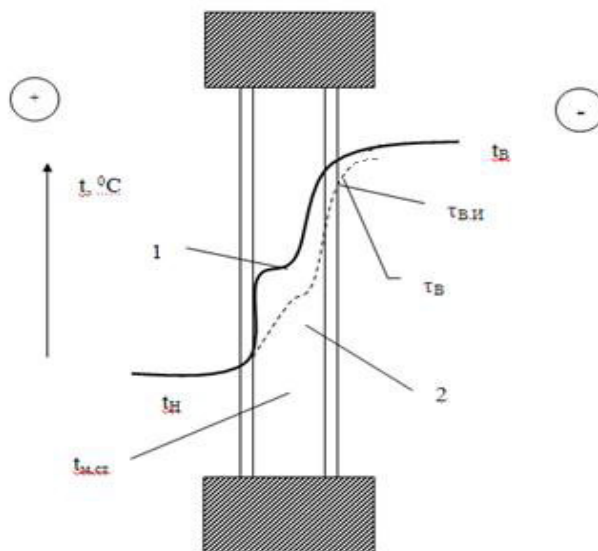


Рис. 2.4. Розподіл температурного поля вікна з подвійним склінням  
1 - без інфільтрації; 2 - при інфільтрації.

В результаті одержуємо:

$$\Delta q = A_\tau \cdot c_B \cdot G \cdot (t_B - t_3) + A_G \cdot c_B \cdot G \cdot (t_B - t_3) = A_{\text{вік}} \cdot c_B \cdot G \cdot (t_B - t_3), \quad (2.4)$$

де  $A_{\text{вік}}$  – коефіцієнт, що показує частку від повних витрат тепла на нагрів повітря, що витрачається на додаткові втрати тепла при повітропроникності через вікно;

$A_j$ ,  $A_\tau$  - частки збільшення тепловтрат від інфільтрації через, відповідно, нагрів повітря і пониження температури внутрішнього скла.

Кількість повітря, яке надходить в приміщення  $G$ , залежить від різниці тисків по обидві сторони вікна і його конструкції. Розрахункову різницю тисків  $\Delta p$  на відміну від стандарту [12] пропонується визначати за формулою [74], що дає осереднене значення для всієї будівлі:

$$\Delta p = 0,55H(\gamma_3 - \gamma_B) + 0,03\gamma_B v^2, \quad (2.5)$$

де  $H$  – висота будівлі (від поверхні землі до верху карнизу), м;

$v$  – максимальна із середніх швидкостей вітру по румбам за січень, повторення котрих становить 16% і більше, приймається згідно з [133];

$\gamma_3$  та  $\gamma_B$  – питома вага відповідно зовнішнього та внутрішнього повітря, Н/м<sup>3</sup>, що визначається за формулою:

$$\gamma = 3463 / (273 + t), \quad (2.6)$$

де  $t$  - температура повітря: внутрішнього (для визначення  $\gamma_B$ ), зовнішнього (для визначення  $\gamma_3$ ), °С.

За аналогією з теплообміном, можна записати, що кількість повітря, яке проходить через одиницю поверхні світлопрозорі огорожувальної конструкції, пропорційна різниці тисків, обернено пропорційна опору повітропроникності і дорівнює

$$G = \Delta p / R_g, \quad (2.7)$$

де  $R_g$  - опір повітропроникності, м<sup>2</sup>·год·Па/кг.

Аналіз та обробка даних літературних джерел показує [59], що опір повітропроникності віконних конструкцій можна визначити із залежності

$$R_g = \Delta p^{1/3} / B, \quad (2.8)$$

де  $B$  – коефіцієнт проникання повітря для конструкцій вікон з металевими та дерев'яними рамами. Значення коефіцієнта  $B$  залежить від ущільнення притворів віконних рам.

Таким чином, теплонадходження або тепловтрати внаслідок фільтрації повітря  $Q_\phi$  розраховуються за формулою [59]:

$$Q_\phi = A_{\text{вік}} c_B G F (t_B - t_3), \quad (2.9)$$

### 2.2.2. Особливості визначення параметрів теплообміну

В енергетичному відношенні враховується, що через СОК не тільки втрачається теплова енергія, але і крізь них поступають теплові надходження в приміщення у вигляді короткохвильової сонячної радіації. Ця особливість і

була врахована при визначенні впливу СОК на формування енергетичних властивостей будівель в цілому.

Теплопередача світлопрозорої конструкції здійснюється шляхом: у внутрішніх поверхонь скління – конвекцією та випромінюванням крізь сучасні рами із численними повітряними прошарками – теплопровідністю, конвекцією, випромінюванням, а через скло, герметики, ущільнювачі конструкції - тільки теплопровідністю.

Тепловий баланс будь-якої поверхні в приміщенні в стаціонарних умовах може бути представлений на основі закону збереження енергії рівнянням:

$$q_m + q_k + q_n = 0. \quad (2.10)$$

Кондуктивна ( $q_m$ ), конвективна ( $q_k$ ) та променева ( $q_n$ ) складові теплообміну на поверхні можуть змінюватися у часі, мати різні значення та знаки, але рівняння (2.10) залишається незмінним для усіх поверхонь в стаціонарних та нестаціонарних умовах теплообміну.

Розрахунок складових, наведених у формулі (2.10), здійснювався таким чином.

В основу математичного опису процесу кондукції (теплопровідності) покладено диференціальне рівняння теплопровідності [127,129], що у загальному випадку має вигляд:

$$c\rho \frac{\partial \tau}{\partial z} = -div q + q_v, \quad (2.11)$$

де  $\tau$  – температура конструкції, К;  $\rho$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $q_v$  – густина теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>.

З огляду на те, що світлопрозорі конструкції малоінерційні в тепловому відношенні, в основу аналізу їхнього теплового режиму можна приймати закони стаціонарної теплопередачі. У цьому випадку рівняння (2.11) матиме вид:

$$\nabla^2 \tau = 0, \quad (2.12)$$

Оскільки лінійні розміри віконної конструкції в напрямку осі  $Oy$  набагато менші розмірів у напрямках осей  $Ox$  і  $Oz$ , при заданих умовах температура скла

буде змінюватися тільки в напрямку, перпендикулярному площині вікна ( $Oy$ ), а в напрямках  $Ox$  і  $Oz$  буде залишатися практично постійною. У зв'язку із цим диференціальне рівняння теплопровідності запишеться у вигляді:

$$\frac{\partial^2 \tau}{\partial y^2} = 0, \quad (2.13)$$

З граничними умовами 3-го роду для  $i$ -го шару віконної конструкції:

$$x = x_i \quad \frac{\partial t}{\partial x} = \frac{\alpha_i}{\lambda} (t_i - \tau_i), \quad (2.14)$$

де  $t_i, \tau_i$  і  $\alpha_i$  - відповідно температури повітря, поверхні скла і коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від повітря до поверхні скління в  $i$ -му шарі світлопрозорого огороження.

Рішення рівняння (2.13) із граничними умовами (2.14) дає для кожного шару віконної конструкції рішення у вигляді

$$q = k_{i-i+1} (t_i - t_{i+1}), \quad (2.15)$$

де

$$k_{i-i+1} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_{i-i+1}}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{i+1}}}, \quad (2.16)$$

Слід зазначити, що термічний опір  $R = \delta/\lambda$  шарів скління незначний у порівнянні з величиною опору теплообміну повітряних прошарків і шарів повітря, що прилягають до поверхні скління. Тому тепловтрати через світлопрозору конструкцію в основному визначаються не теплопровідністю усередині скла, а з умов конвекції повітря біля поверхонь скління й у повітряних прошарках, а також умовами променистого теплообміну. Із цих же умов визначаються величини  $t_i, \tau_i$  і  $\alpha_i$  для внутрішніх шарів скління, тому що вони не можуть бути наперед заданими.

Механізм утворення вільної конвекції біля холодної ізотермічної поверхні скління такий. Прилягаючі до скління охолоджені шари мають густину більшу, ніж повітря в приміщенні. Охолоджені шари повітря витісняють менш щільні, в результаті чого виникає його рух зверху вниз. Температура в прикордонному

шарі монотонно підвищується від  $t = \tau_y$  до  $t = t_b$ . Біля теплої поверхні скління механізм утворення вільної конвекції аналогічний, з тією лише різницею, що прилягаючі до скління шари мають меншу щільність, чим навколишнє повітря, і підйомно-опускний рух повітря відбувається напроти руху біля холодної поверхні.

Профілі швидкості, температури й інтенсивність теплообміну залежать від режиму руху повітря в прикордонному шарі.

Конвективний теплообмін можна описати системою диференціальних рівнянь прикордонного шару, що виводяться на основі законів збереження маси, імпульсу і енергії [127]. Авторами [129, 130] показано наближене рішення завдання ламінарної вільної конвекції методом теорії граничного шару. Узагальнені чисельні експериментальні дані для турбулентної природної конвекції [131, 132] представлені критеріальним рівнянням

$$\text{Nu}_x = 0,135(\text{Gr}_x \text{Pr})^{\frac{1}{3}} \quad (2.17)$$

при  $\text{Pr} = 0,71$  (для повітря) визначається локальний коефіцієнт тепловіддачі конвекцією

$$\alpha = \bar{\alpha} = 1,45\sqrt[3]{t_b - \tau_b} \quad (2.18)$$

При розрахунках передачі тепла випромінюванням, що є третьою складовою в формулі (2.10), враховані такі припущення. Променевий теплообмін відбувається між окремими елементами світлопрозорих огорожувальних конструкцій та оточуючими тілами. У зимовий період року передача теплоти випромінюванням відбувається від внутрішніх огорожувальних конструкцій до внутрішньої поверхні скління, температура якої у нічний час та у безхмарні дні нижча від оточуючих поверхонь, а у сонячні дні при прямій радіації потік теплоти може йти від скління до приміщення, від зовнішньої поверхні скління у навколишнє середовище (сусіднім будинкам, атмосфері) і між поверхнями скління, розташованими один до одного [69].

Приймається розрахункове рівняння у вигляді:

$$q_{\text{п}} = q_{1-2} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (2.19)$$

де  $T_1, T_2$  - абсолютні температури поверхонь 1 та 2, К;

$C_0$  – коефіцієнт випромінювання та поглинання абсолютно чорного тіла;

$\varepsilon_{\text{пр}}$  - приведений коефіцієнт випромінювання, що визначається за формулою:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}, \quad (2.20)$$

де  $\varepsilon_1$  та  $\varepsilon_2$  - коефіцієнт випромінювання поверхні 1 та 2 відповідно.

Підсумовуючи наведений аналіз складових формули (2.10) можна констатувати, що сумарний тепловий потік дорівнює сумі двох останніх складових. Одночасно, маючи справу з двома різними механізмами переносу енергії, зручніше визначати тепловий потік випромінюванням, як еквівалентний тепловий потік конвекцією [69]:

$$\begin{aligned} q_{\text{к}} &= \alpha_{\text{к}} (t_1 - t_2) \\ q_{\text{п}} &= \alpha_{\text{п}} (t_1 - t_2) \end{aligned}, \quad (2.21)$$

де  $\alpha_{\text{п}}$  – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, що дорівнює [129]:

$$\alpha_{\text{п}} = \frac{\varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{t_1 - t_2}, \quad (2.22)$$

Для інженерних розрахунків приймаємо величину

$$b = \frac{\left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4}{t_1 - t_2}, \quad (2.23)$$

так званий температурний коефіцієнт, що визначається за [69]

З урахуванням спрощень коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням розраховується за формулою [71]:

$$\alpha_{\text{п}} = 4,9\varepsilon_{\text{пр}}b, \quad (2.24)$$

Слід звернути увагу на те, що коефіцієнт конвективної тепловіддачі залежить від різниці температур, а коефіцієнт променевої тепловіддачі – від абсолютних значень температур. Отже  $\alpha_{\text{п}}$  зменшується зі зниженням абсолютних значень температур. Тому у багатошарових світлопрозорих конструкціях теплозахисні властивості повітряного прошарку, розташованого зі сторони зовнішнього повітря, вищі, ніж у прошарку, розташованому зі сторони внутрішнього повітря.

У теплообміні також бере участь теплота сонячної радіації, що проникає через світлопрозорі огорожувальні конструкції. Прямі сонячні промені нагрівають окремі частини внутрішніх огорожувальних конструкцій  $Q_{\text{нагр}}$  і також поглинаються заповненням світлового прорізу  $Q_{\text{погл}}$  [76,77]

$$Q_{\text{нагр}} = (I_{\text{пр}}rK_{1\text{пр}} + I_{\text{р}}K_{1\text{р}})(F - F_{\text{пр}}), \quad (2.25)$$

де  $I_{\text{пр}}, I_{\text{р}}$  – відповідно інтенсивність прямої та розсіяної сонячної радіації, що падає на світлопрозорі огорожувальні конструкції, Вт/м<sup>2</sup>;

$r$  – коефіцієнт опромінення світлового прорізу потоком сонячної радіації;

$K_{1\text{пр}}, K_{2\text{р}}$  – відповідно коефіцієнт наскрізних теплонадходжень від прямої та розсіяної сонячної радіації;

$F_{\text{пр}}$  – площа притворів, м<sup>2</sup>.

У загальних випадках для розрахунку теплонадходжень в результаті радіації пропонується використовувати прості формули, в котрих не розділяються потоки прямої та розсіяної сонячної радіації, а розглядається потік загальної сонячної радіації [76]:

$$Q_{\text{нагр}} = I\beta F, \quad (2.26)$$

де  $\beta = \beta_1 \cdot \beta_2$  – коефіцієнт проникання сонячної радіації через світлопрозорі огорожувальні конструкції (з урахуванням затінення сонцезахисними пристроями);

$\beta_1$  – коефіцієнт проникнення сонячної радіації через заповнення світлового прорізу без урахування сонцезахисних пристроїв;

$\beta_2$  – коефіцієнт затінення світлового прорізу сонцезахисними пристроями.

Поглинуті теплונнадходження  $Q_{\text{погл}}$  обчислюються за формулою [76]:

$$Q_{\text{погл}} = (I_{\text{пр}} r K_{2\text{пр}} + I_{\text{р}} K_{2\text{р}}) (F - F_{\text{пр}}), \quad (2.27)$$

де  $K_{2\text{пр}}$ ,  $K_{2\text{р}}$  – коефіцієнти поглинутих теплונнадходжень відповідно від прямої та розсіяної сонячної радіації.

Таким чином, теплопередача через заповнення світлового прорізу складається з узагальненого опису таких теплових потоків:

– теплові надходження у результаті сонячної радіації, що поглинається заповненням  $Q_{\text{погл}}$  і безпосередньо проникаючої у приміщення  $Q_{\text{погл}}$ ;

– теплові надходження або тепловтрати внаслідок різниці температур внутрішнього і зовнішнього повітря ( $Q_{\text{T}}$ );

– теплові надходження або тепловтрати внаслідок фільтрації повітря через стіни і по контуру примикання заповнення до стіни, зумовлені різницею тиску і температури всередині і ззовні будівлі  $Q_{\text{ф}}$ .

Схема теплового балансу конструкції з подвійним склінням вікна представлена на рис. 2.5 [76], у відповідності з якою рівняння теплового балансу світлопрозорої конструкції можна записати у вигляді:



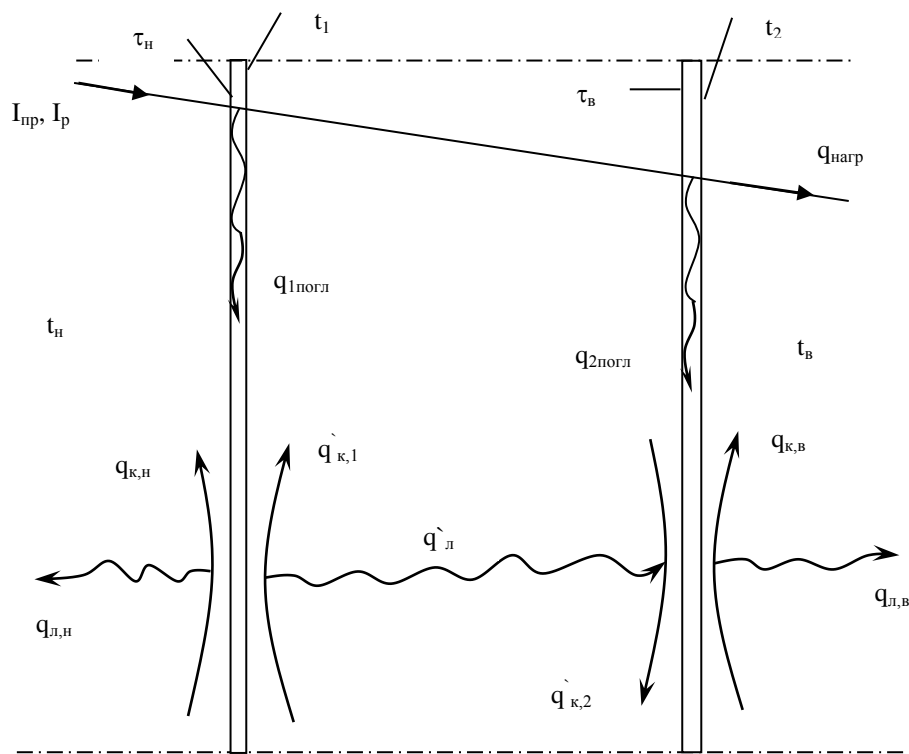


Рис. 2.5. Схема теплового балансу світлопрозорої конструкції

$$\begin{cases} q_{к,з} + q_{п,з} + q_{к,1} + q_{п} - q_{1\text{погл}} = 0 \\ q_{к,в} + q_{п,в} - q_{к,2} - q_{п} - q_{2\text{погл}} = 0 \end{cases} \quad (2.28)$$

де,  $q_{1\text{погл}}$ ,  $q_{2\text{погл}}$  – кількість теплоти короткохвильової радіації, поглинутої відповідно першим і другим склом, Вт/м<sup>2</sup>;

$q_{п,з}$  – променистий потік теплоти між зовнішньою поверхнею першого скла і «оточенням», Вт/м<sup>2</sup>;

$q_{к,з}$  – конвективний потік теплоти між зовнішньою поверхнею першого скла і зовнішнім повітрям, Вт/м<sup>2</sup>;

$q_{к,1} = q_{к,2}$  – конвективний потік теплоти у міжскляному прошарку, Вт/м<sup>2</sup>;

$q_{п}$  – променевий потік теплоти між поверхнями, які обмежують прошарок, Вт/м<sup>2</sup>;

$q_{к,в}$ ,  $q_{п,в}$  – відповідно конвективний і променевий (довгохвильова радіація) потоки теплоти на внутрішній поверхні другого скла, Вт/м<sup>2</sup>.

Результати наведеного аналізу покладені в основу інженерного розрахунку визначення енергетичних показників СОК, що викладені в розділі 3.

## **2.3. Методики експериментальних досліджень**

### **2.3.1. Дослідження опору теплопередачі конструкцій**

В основу експериментальних досліджень покладене фізичне моделювання процесів теплопереносу за допомогою кліматичної камери. Схема кліматичної камери наведена на рис.2.6. Дослідження проводились на світлопрозорих конструкціях, що безпосередньо монтувались у прорізі кліматичної камери, та на стінових конструкціях з віконним та/або дверним прорізами з відповідними дослідними світлопрозорими конструкціями, які монтувались в кліматичній камері.

В експериментах використовувалась перевага кліматичної камери, в якій монтується огорожувальна конструкція у натуральну її величину, є забезпечення можливості фізичної імітації теплової роботи світлопрозорої конструкції у складі зовнішньої стіни та визначення особливостей формування теплового режиму на внутрішній поверхні як світлопрозорого елемента стіни, так і непрозорої частини в зонах стикових з'єднань цих елементів стінової конструкції.

Випробування теплових характеристик світлопрозорих конструкцій проводились на експериментальній установці, схема якої наведена на рис.2.7. Дослідження з використанням цієї кліматичної камери, яка має незначну теплову інерцію, дозволяють в оперативному режимі проводити випробування різних конструктивних типів світлопрозорих конструкцій.

Вид дослідних конструкцій під час проведення випробувань в кліматичній камері згідно схеми на рис.2.6 наведено на рис. 2.8, 2.9, в кліматичній камері згідно схеми рис.2.7 – на рис. 2.10.

При дослідженнях з імітацією розрахункових теплових умов випробування проводились з регулюванням температур внутрішнього і зовнішнього повітря згідно вимог [124].

Вимірювання теплових параметрів проводились термоелектричними перетворювачами [134] з характеристиками перетворення згідно з [135] та первинними термоелектричними перетворювачами теплового потоку згідно з [136]. Як вторинна вимірювальна апаратура для термоелектричних

перетворювачів застосовувались мілівольтметри згідно з [137]. Обробка результатів первинних вимірювань з визначенням значень коефіцієнтів теплообміну здійснювалась згідно з [138].

Дослідження з метою встановлення особливостей формування температурного поля на внутрішній поверхні конструкцій (рис. 2.11) в натурних умовах проводились в періоди року, коли існує такий сталий температурний режим і температурний напір, що є не меншим, ніж 15 К.

Дослідження у натурних умовах проводились при швидкості вітру на вулиці не більше ніж 4 м/с, відносній вологості повітря не більше ніж 80 % за температури 20 °С; атмосферному тиску від 84 кПа до 106,7 кПа.

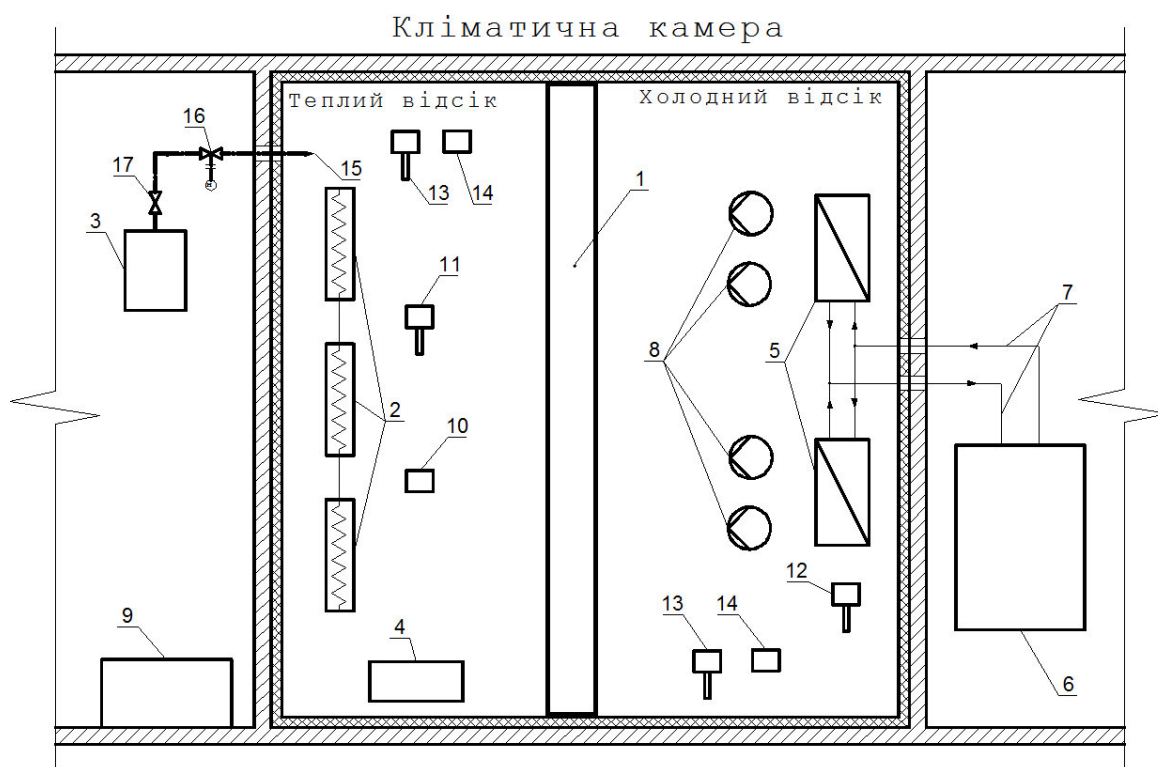


Рис. 2.6. Схема експериментального обладнання кліматичної камери для випробувань фасадних конструкцій:

1 – досліджувана конструкція; 2 – нагрівники; 3 – парозволожувач; 4 – кондиціонер; 5 – охолоджуючі батареї; 6 – холодильне обладнання; 7 – трубопроводи холодоагенту; 8 – вентилятори; 9 – система автоматичного збору даних; 10 – датчик регулювання вологості повітря теплого відсіку; 11, 12 – датчики регулювання температури повітря теплого та холодного відсіків; 13 –

датчики контролю температури; 14 – датчики контролю вологості; 15 – паропровід; 16 – регулююча заслінка; 17 – запірний кран.

При проведенні натурних досліджень вимірювання показників зовнішнього середовища (температури, відносної вологості, швидкості руху повітря та тиску) проводились поблизу будівлі на відстані не більше 20 м, на висоті 1,5 м від поверхні землі. Вимірювання температури та відносної вологості повітря всередині будівлі проводились в центральній зоні приміщення на висоті від 1 м до 1,5 м від підлоги.

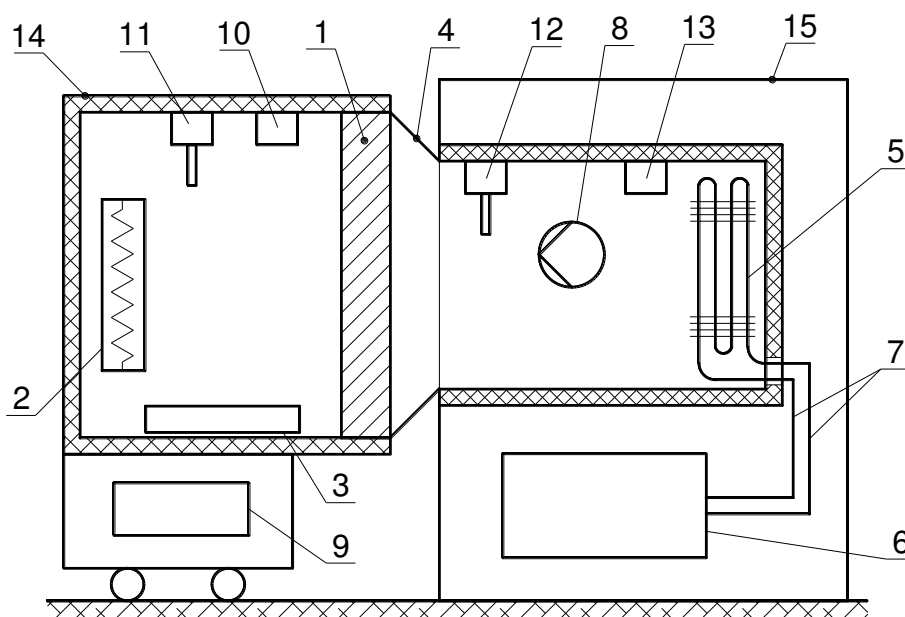


Рис. 2.7. Схема експериментального обладнання кліматичної камери для випробувань світлопрозорих конструкцій:

1 – досліджувана конструкція; 2 – нагрівники; 3 – посудина з розчином для підтримання вологості; 4 – перехідна діафрагма; 5 – випарник; 6 – холодильне обладнання; 7 – трубопроводи холодоагенту; 8 – вентилятор; 9 – система автоматичного збору даних та регулювання; 10 – датчик контролю вологості повітря в приставному теплому відсіку; 11 – датчик контролю та регулювання температури повітря в приставному теплому відсіку; 12 – датчик контролю та регулювання температури повітря в робочому об'ємі кліматичної камери; 13 – датчик контролю та регулювання вологості в робочому об'ємі кліматичної камери; 14 – приставний теплий відсік; 15 – кліматична камера.

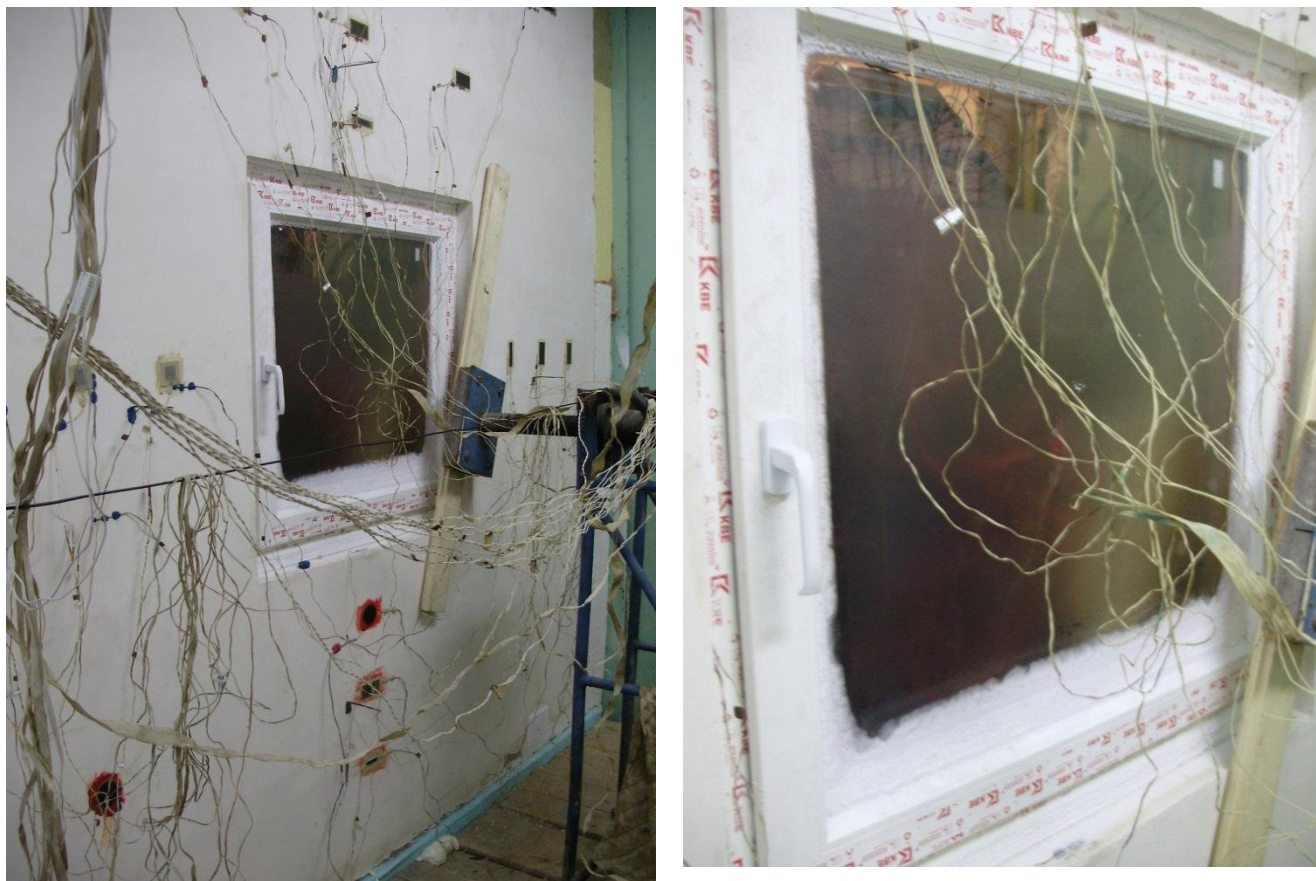


Рис. 2.8. Вид дослідної стінової конструкції з вікном під час експерименту.



Рис. 2.9. Вид дослідної фасадної світлопрозорої конструкції під час експерименту

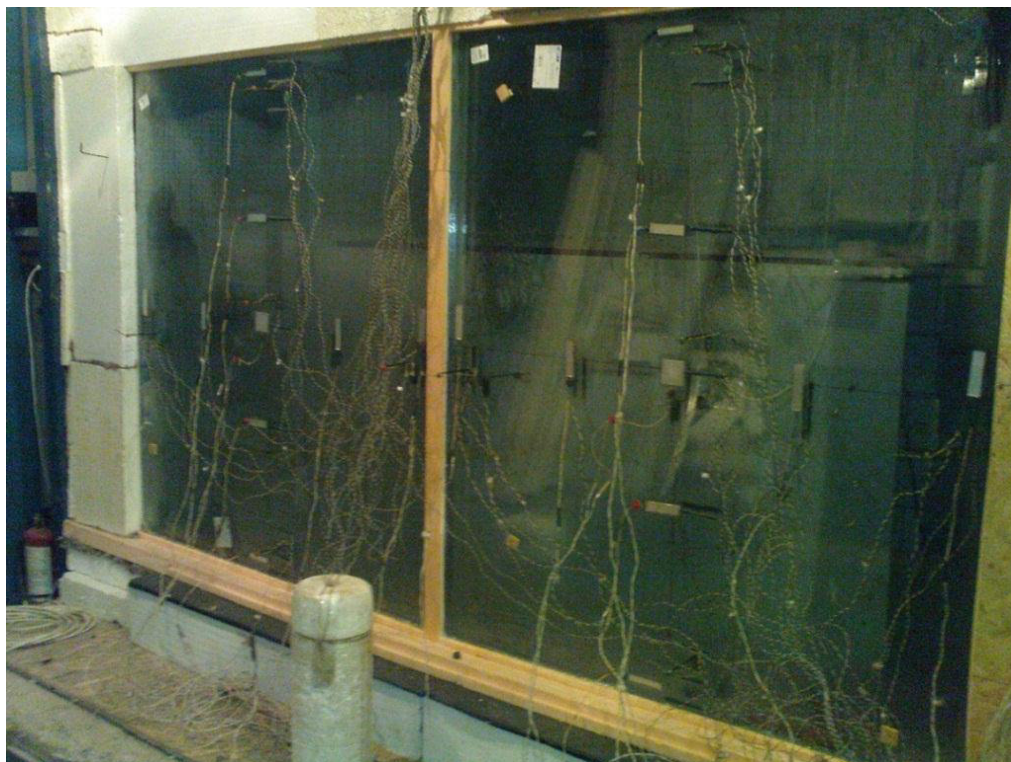


Рис. 2.10. Вид дослідних склопакетів під час експерименту

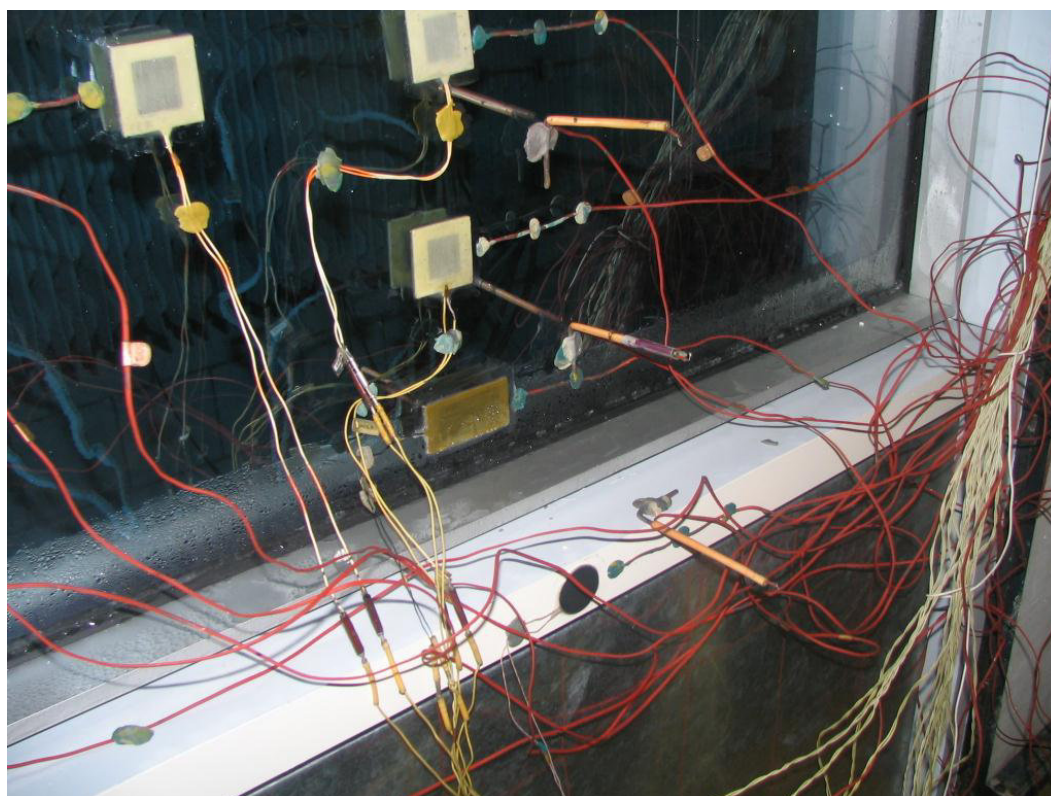


Рис. 2.11. Дослідження фасадної світлопрозорі конструкцій в натурних умовах

СОК завжди є термічно неоднорідними, тому їх тепловою характеристикою є приведений тепловий опір – усереднене за розрахунковою площею поверхні значення, яке обчислюється за формулою:

$$R_{OK,np} = \sum_{n=1}^N A_n / \sum_{n=1}^N (A_n / R_{OK,n}), \quad (2.29)$$

де  $N$  – кількість термічно однорідних ділянок в неоднорідній ОК;

$A_n$  – площа однорідної ділянки  $n$ -го типу;

$R_{ok}$  – тепловий опір [167] однорідної ділянки  $n$ -го типу, що обчислюють за формулою

$$R_{\Sigma} = (T_{П.ВН.} - T_{П.ЗОВ}) / q, \quad (2.30)$$

де  $T_{П.ВН.}$ ,  $T_{П.ЗОВ}$  – температури внутрішнього та зовнішнього повітря відповідно.

Приведений опір теплопередачі конструкції обчислюють за формулою:

$$R_{пр} = \frac{1}{\alpha_b} + R_{вік} + \frac{1}{\alpha_3} R_{мш.з}, \quad (2.31)$$

де  $\alpha_b, \alpha_3$  – коефіцієнти теплообміну, що за умови усталеного стаціонарного теплового режиму [139] відповідно визначаються за формулами:

$$\alpha_b = q / (T_{нс.в} - \tau_b) \quad \text{та} \quad \alpha_3 = q / (\tau_3 - T_{нс.з}) \quad (2.32)$$

де  $q$  – густина теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>К.

Визначення стандартних невизначеностей результатів багатократних вимірювань температури та густини теплового потоку під час проведення випробувань кожної конструкції здійснювалось за формулою:

$$u_A(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n (\bar{x} - x_j)^2}, \quad (2.33)$$

де  $n$  – кількість багатократних вимірювань;

$\bar{x}$  – усереднене значення вхідної величини;

$x_j$  – значення вхідної величини при  $j$ -му вимірюванні.

Визначення стандартних невизначеностей оцінок вхідних величин здійснювалось за умови, що в межах своїх границь їх похибки розподілені

рівномірно. Для вхідних величин з невиключеною систематичною похибкою з границею  $\pm \theta$ , невизначеність обчислюється за формулою:

$$u_A(\bar{x}) = \frac{\theta}{\alpha}, \quad (2.34)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт, що відповідає прийнятому закону розподілу між границями НСП, для рівномірного (або невідомого) закону розподілення, приймається  $\alpha = \sqrt{3}$  та  $\mu = \sqrt{3}$ .

Основна невизначеність вимірювання температури не перевищувала 0,2 К.

Границі абсолютної похибки вимірювання густини теплового потоку визначались за формулою:

$$\Delta q_i = \frac{\delta q \cdot \bar{q}_i}{100}, \quad (2.35)$$

де  $\delta q$  – границя допустимої основної відносної похибки вимірювання густини теплового потоку;

$\bar{q}_i$  – середнє значення густини теплового потоку  $i$ -ої зони дослідної конструкції, Вт/м<sup>2</sup>; та не перевищували  $\pm 6\%$ .

Визначення внеску невизначеності кожної вхідної величини у невизначеність величини, що визначається (теплового опору), обчислювалось за формулою:

$$u_s(\bar{y}) = c_i \cdot u(\bar{x}_i) \quad (2.36)$$

Враховуючи відсутність кореляції між вхідними величинами, визначалась сумарна невизначеність вихідної величини за формулою:

$$u(Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2(\bar{y})}. \quad (2.37)$$

Відповідно загальна невизначеність приведенного опору теплопередачі дослідних конструкцій не перевищувала 10%, що відповідає вимогам [124].

### 2.3.2. Дослідження повітропроникності світлопрозорих конструкцій

Суть використаного методу полягає в тому, що через об'єкт, який випробовується, пропускається потік повітря і після встановлення стаціонарного



поток вимірюються витрати повітря та перепад тиску між протилежними поверхнями конструкції випробовуваного об'єкта. Блок-схема проведення досліджень наведена на рис. 2.12. Блок-схема експериментальної установки для випробувань конструкцій у лабораторних умовах наведена на рис. 2.13. Вид експериментальної установки з дослідними зразками наведено на рис. 2.14.

Порядок підготовки зразків для проведення досліджень, проведення вимірювань та обробки їх результатів здійснювалось згідно з положеннями [73, 120, 126].

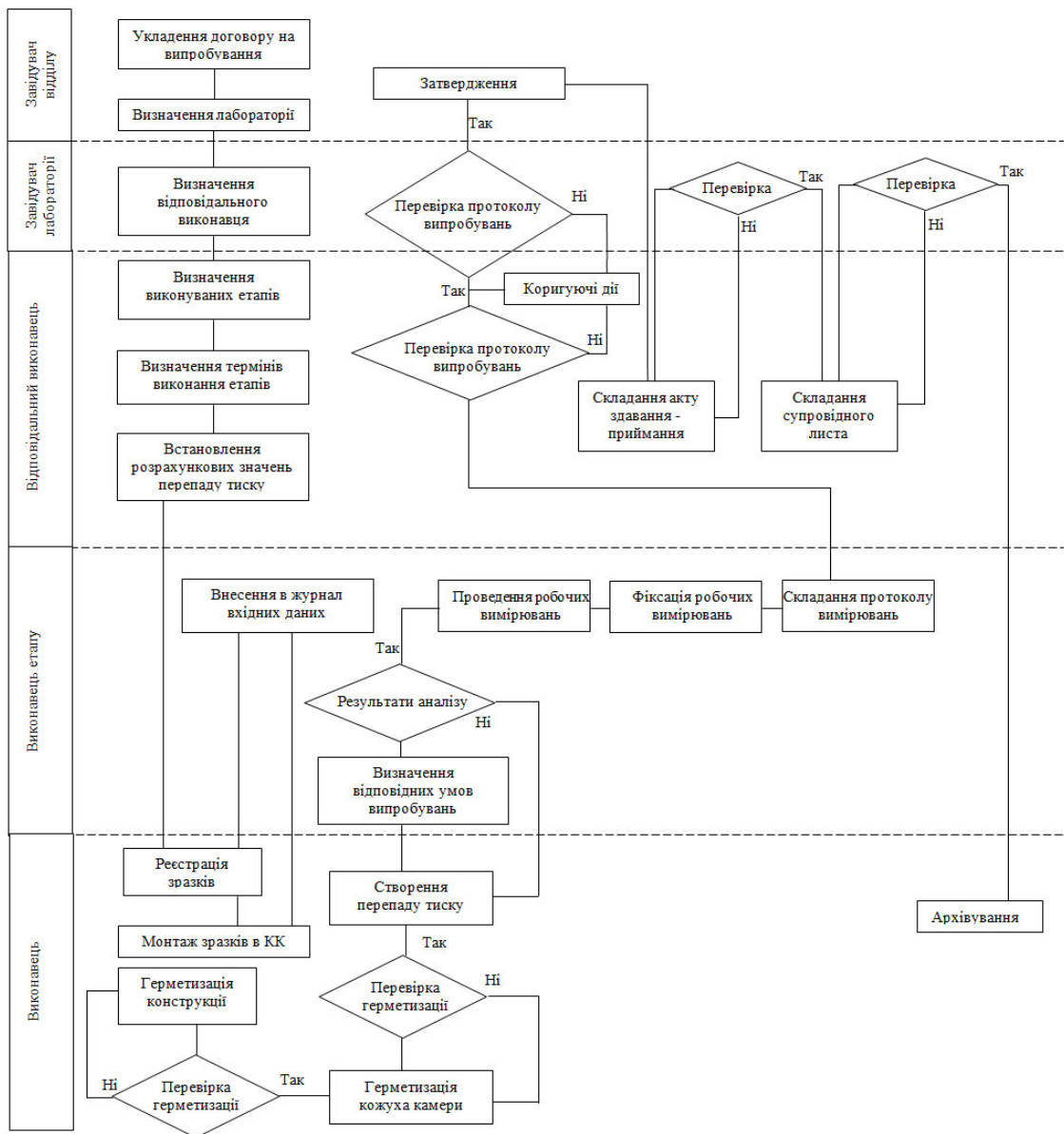


Рис. 2.12. Блок-схема проведення досліджень

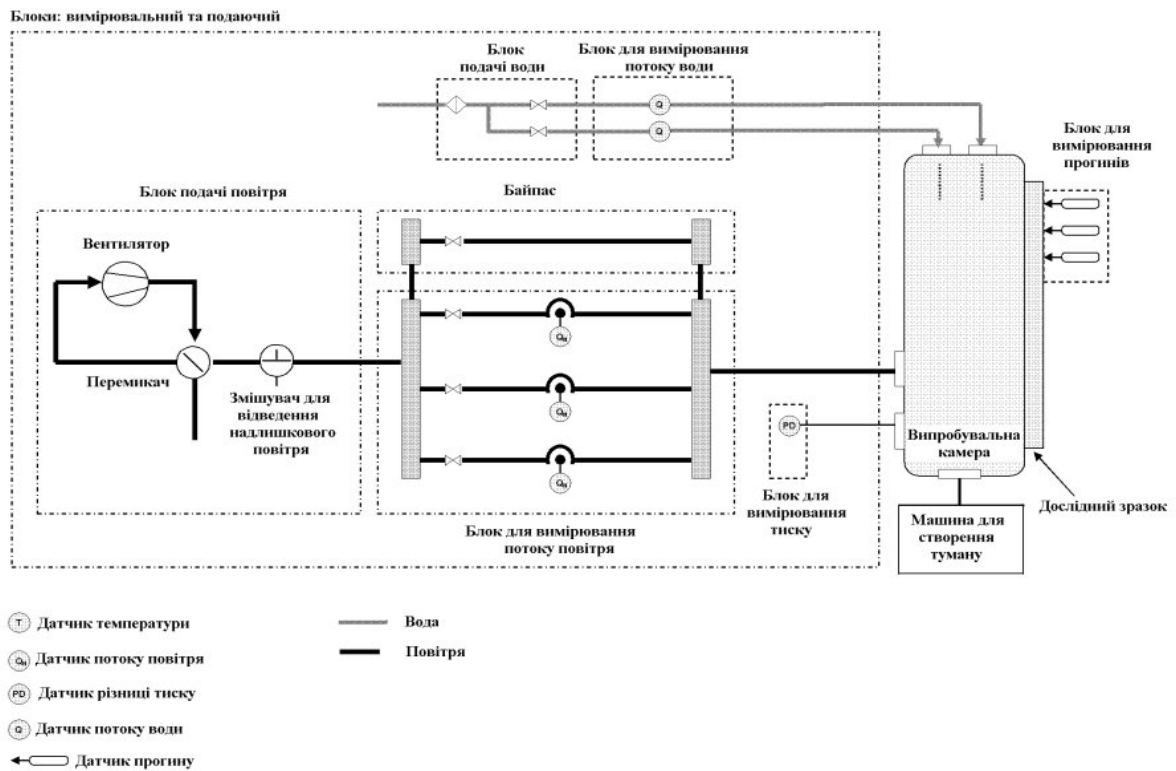


Рис. 2.13. Блок-схема експериментальної установки для випробувань повітропроникності світлопрозорих конструкцій



Рис. 2.14. Експериментальні дослідження світлопрозорих конструкцій на повітропроникність

### 2.3.3. Визначення показників світлопропускання конструкцій

Показники світлопрозорості склопакетів та віконних конструкцій визначались згідно з методикою [140] на експериментальній установці, загальний вид якої наведений на рис. 2.15.

Фізична суть методу досліджень полягає у визначанні загального коефіцієнту пропускання світла через склопакет або віконну конструкцію. Вид дослідних зразків у експериментальній установці наведений на рис. 2.16.

Випробування проводились для склопакетів та віконних конструкцій для визначення показників енергоефективності з забезпечення теплового балансу світлопрозорих конструкцій тепловтрати–теплонадходження і їх результати використовувались при розрахунках за моделлю, що наведена у розд. 2.2.



Рис. 2.15. Загальний вид експериментальної установки з визначення коефіцієнту направлено пропускання світла

а)



б)



Рис. 2.16. Вид дослідних зразків у експериментальній установці: а – склопакета; б – віконної конструкції

#### **2.3.4. Дослідження довговічності сучасних світлопрозорих конструкцій**

Зміна властивостей сучасних СОК (див. розд. 1.1) у найбільшому ступені можлива шляхом зміни теплофізичних характеристик склопакетів. Особливо це стосується склопакетів з газонаповненням, в яких втрата певної кількості важкого газу обумовлює значне зниження опору теплопередачі конструкції в цілому. Тому при оцінюванні довговічності світлопрозорих конструкцій особлива увага приділялась дослідженням властивостей склопакетів, як найбільш слабкого, з точки зору довговічності, елемента загальної конструктивної системи.

Суть досліджень полягала у експериментальному оцінюванні здатності склопакетів зберігати свої експлуатаційні характеристики під впливом кліматичних дій у вигляді циклічної зміни позитивних і від'ємних температур, вологого повітря, ультрафіолетового опромінювання та дощування.

Дослідження проводились на зразках склопакетів з розмірами 500x500 мм і більше. В дослідженнях використовувалась експериментальна установка за схемою рис.2.7 з можливістю дощування. Установка дозволяє здійснювати

регулювання температури повітря від  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  з точністю  $\pm 1^{\circ}$ , вологості повітря від  $20\%$  до  $100\%$  з точністю  $\pm 5\%$ , джерела ультрафіолетового опромінювання в діапазоні хвиль від  $280\text{ нм}$  до  $400\text{ нм}$  з інтегральною поверхневою густиною потоку випромінювання  $(700 \pm 100)\text{ Вт/м}^2$  та поверхневої густини потоку ультрафіолетового опромінювання  $-(30 \pm 5)\text{ Вт/м}^2$ .

Дослідні зразки встановлювалися у касету, яка розміщувалась у прорізі кліматичної камери, і піддавалась циклічним однобічним кліматичним впливам у вигляді заморожування – вирівнювання температур – нагрівання – дощування – опромінювання.

Схема впливу кліматичних факторів під час досліджень:

Заморожування при температурі повітря  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Швидкість охолодження зразків становить  $30\text{ градус/година}$  в діапазоні  $+18 \div 0^{\circ}\text{C}$  і  $15\text{ градус/година}$  в діапазоні  $0^{\circ}\text{C} \div -35^{\circ}\text{C}$ . Точність витримування швидкості зміни температури  $\pm 5\text{ градус/година}$ . Відносна вологість повітря становила  $(80 \pm 5)\%$ .

Тривалість заморожування зразків визначалася з умови вирівнювання температурного поля по товщині зразка [22], що визначається рівнянням Фур'є (2.11), і для склопакетів часова характеристика вирівнювання температур не перевищувала  $2,5\text{ години}$  (рис. 2.17).

Вирівнювання температури зразків на повітрі проводилось при температурі середовища  $t_0 = (+18 \div +22)\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Тривалість часу вирівнювання температури визначалася з умови вирівнювання температурного поля по товщині зразка (рис. 2.18) і для випробуваних склопакетів становила  $2\text{ години}$ .

Нагрівання зразків в умовах змушеної конвекції проводилось при температурі навколишнього середовища  $t_3 = +60 \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Тривалість часу нагрівання  $1,5\text{ години}$ .

Опромінення поверхонь зразків при температурі повітря  $(+18 \div +22)\text{ }^{\circ}\text{C}$  виконувалось джерелом ультрафіолетового випромінювання потужністю  $500$

Вт при інтегральній поверхневій щільності потоку випромінювання  $(700 \pm 100)$  Вт/м<sup>2</sup> і при поверхневій щільності потоку ультрафіолетового випромінювання  $(30 \pm 5)$  Вт/м<sup>2</sup>. Час опромінення – 1 година.

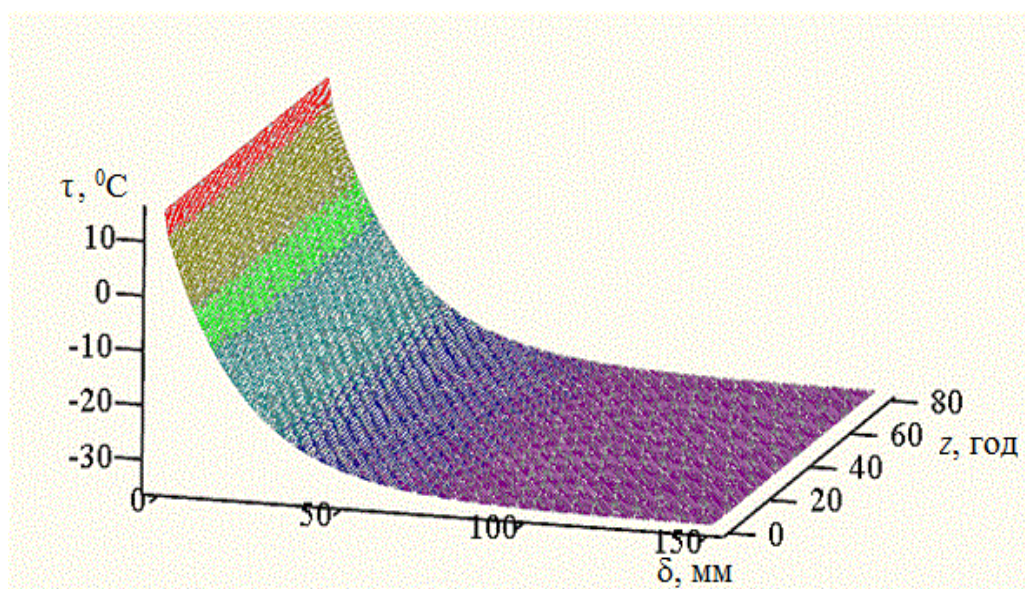


Рис. 2.17 - Характер зміни температури в часі по товщині випробуваного склопакета при його охолодженні

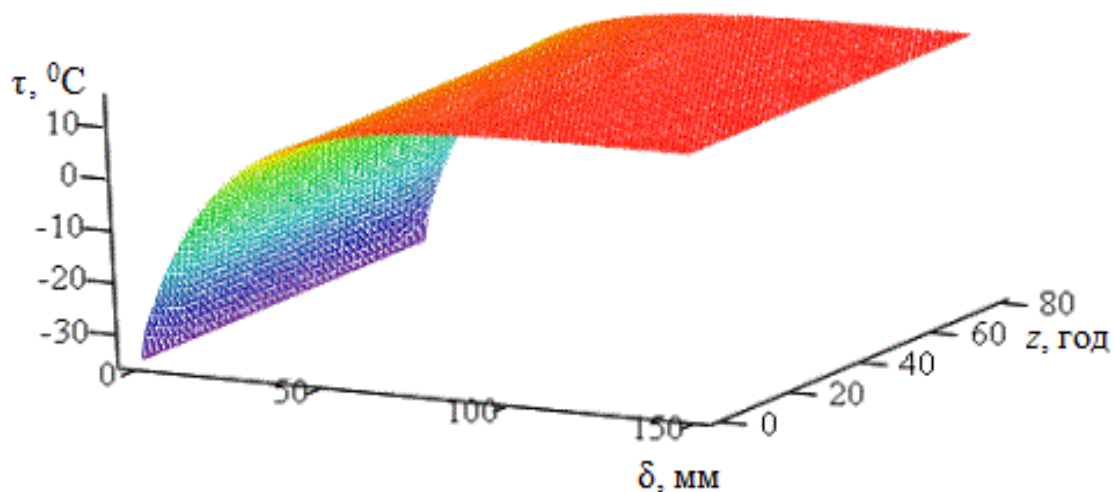


Рис. 2.18 - Характер зміни температури в часі і по товщині випробуваного склопакета при вирівнюванні температури

Один цикл дій включає: заморожування – вирівнювання в умовах високої

вологості – нагрівання – опромінювання - дощування.

Нагрівання зразків при проведенні випробувань здійснювалось за графіком:

- 4 цикли - обігрів у кліматичній камері в умовах змушеної конвекції при температурі повітря  $60 \pm 1$  °С;

- опромінення зовнішньої поверхні зразка – кожний 5-й цикл;

- замочування випробуваних зразків – кожний 3-й цикл.

Вирівнювання температури здійснювалося за графіком:

1-й цикл – вирівнювання температур в умовах природньої конвекції;

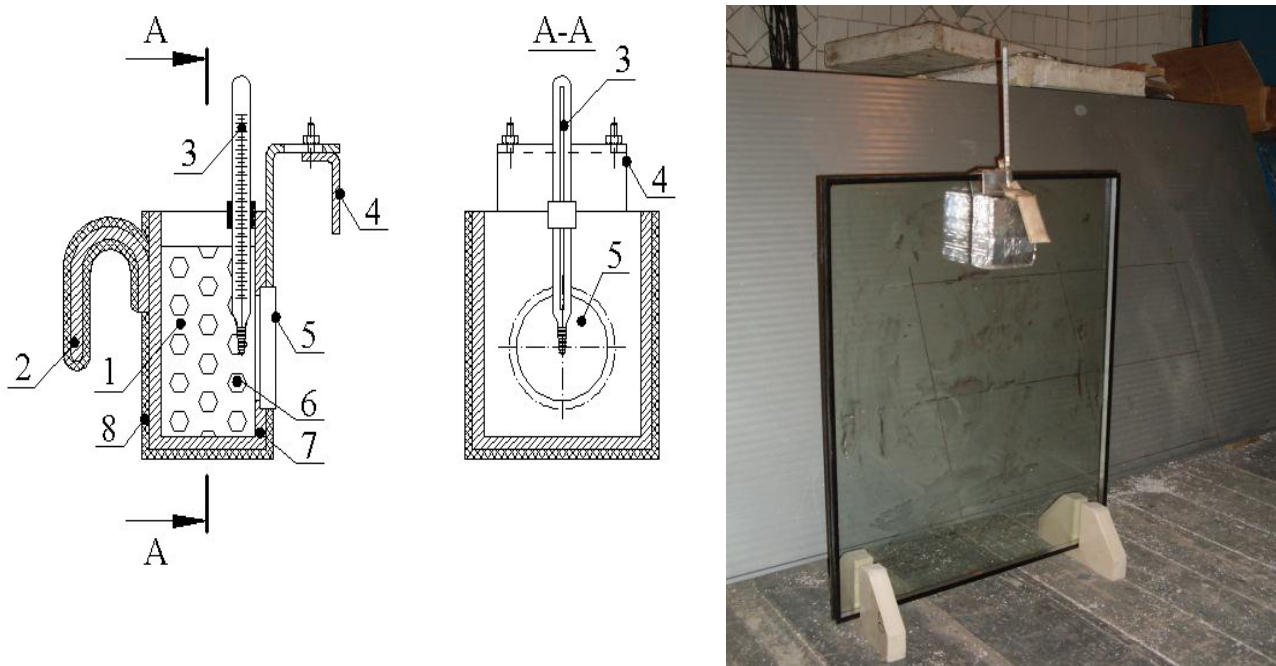
2-й цикл – вирівнювання температур у повітряно-краплинному середовищі при відносній вологості повітря (98 – 100) %;

3-й цикл – дощування зовнішньої поверхні зразків при температурі  $(+18 \div +20)$ °С із створенням суцільної водяної плівки на поверхні кожного склопакету відповідно водою (3-й цикл), слабким розчином лугу (6-й цикл) або слабким розчином кислоти (9-й цикл). Тривалість замочування – 0,5 години.

Через кожні 20 циклів відбиралось по три зразки, які піддавали випробуванням на точку роси. Суть методу полягає в охолодженні ділянки скла склопакета і наступній перевірці появи конденсату (інею) на внутрішній поверхні скла на цій ділянці. Схема приладу у випадку вертикального розташування склопакета при випробуваннях та вид дослідного зразка під час випробувань приведені на рис. 2.19. Прилад заповнювали ацетоном із поступовим додаванням дрібних шматочків двоокису вуглецю. Температура суміші при випробуванні склопакетів була мінус  $(45 \pm 3)$  °С. Час контакту вимірювального приладу зі склопакетом становив 4 хвилини. Оцінка випробувань є позитивною, якщо в усіх зразках на поверхні ділянки скла всередині камери, яка охолоджується, не були виявлені сліди конденсату (інею).

Загальна кількість циклів випробувань кожного виду склопакетів становила 60.

Після проведення 30-ти та 60-ти циклів визначалась зміна складу газу у склопакеті. Суть методу визначення вмісту газу в камерах склопакетів базується на розділенні компонентів суміші (або чистого газу), які мають різний ступінь адсорбційної здатності. Визначення об'ємного вмісту окремих складових газової суміші проводилися з використанням хроматографічних колонок, заповнених сорбентом (типу "Полісорб") із отриманням окремих «пиків» обумовленого компонента на виході зі стовпчика та кількісної реєстрації їх за допомогою детектора по теплопровідності, сигнал від якого подається на вторинний реєструючий прилад.



а

б

Рис. 2.19. а - схема приладу для контролю точки роси; б - вид дослідного зразка під час випробувань:

1 – ацетон або ізопропиловий спирт; 2 – ручка; 3 – термометр; 4 – рухома пластина вузла підвіски; 5 – контактна латунна пластина; 6 – твердий двоокис вуглецю; 7 – корпус мідний; 8 – теплоізоляція

Кількісне визначення водяної пари у газонаповненому склопакеті



проводилося шляхом реєстрації наявності вологи електрохімічним способом за допомогою чутливого елемента газоаналізатора.

При проведенні випробувань використовували хроматограф (типу "Газохром - 3101") з детектором по теплопровідності з газохроматографічним стовпчиком, заповненим синтетичним цеолітом марки *Na* або полісорбом; газоаналізатор з нижньою межею чутливості водяної пари  $1 \times 10^{-4} \%$  (1 ppm); піч муфельну електричну з регулюванням температури до  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  з точністю  $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; витратомір газів згідно з [141] з похибкою при вимірюванні витрати не більше  $\pm 2,5 \%$  в інтервалі температур повітря від  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $+50 \text{ }^\circ\text{C}$ , відносній вологості повітря від  $30 \%$  до  $80 \%$ ; ексікатор; набір сит "Физприбор"; гелій газоподібний марки "А"; цеоліт синтетичний типу *Na* і полісорб, фракція з частками розміром від  $0,2 \text{ мм}$  до  $0,3 \text{ мм}$ ; повірочні газові суміші (ПГС) згідно з [142] із криптону, ксенону й аргону різної концентрації (залежно від складу газів у склопакетах).

Об'ємні частки аргону, криптону й ксенону визначалися методом абсолютного градування із використанням для цього ПГС. Проба проаналізованої газової суміші вводилася в хроматограф за допомогою шприца й штатного кран-дозатора, що входить до складу хроматографа. Як газу-носії використовувався гелій марки "А".

Схема відбору проб зі склопакета представлена на рис. 2.20.

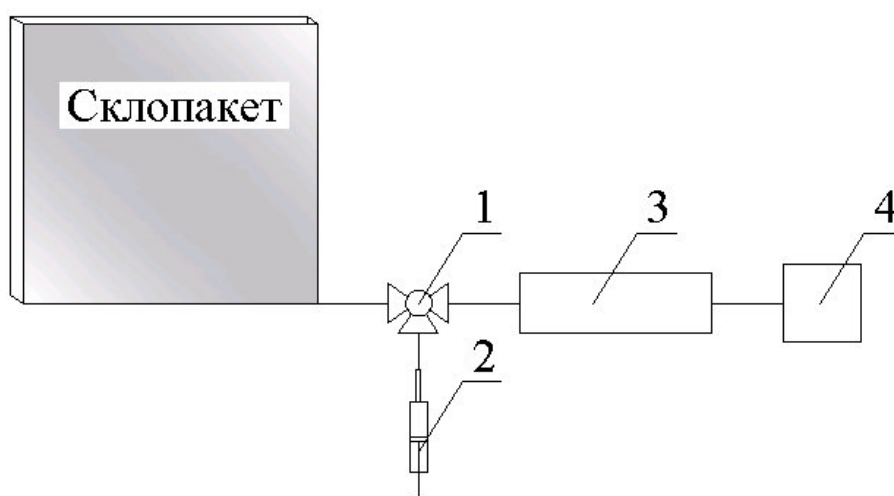


Рис. 2.20. Схема відбору проб зі склопакета:

1 – триходовий вентиль; 2 – шприц; 3 – хроматограф; 4 – самописець

Об'ємна частка аргону ( $X_1$ ) та криптону ( $X_2$ ) у відсотках визначалась за результатами градування висоти відповідних піків за формулою:

$$X = C_{\text{ПГС}} \times \frac{h_x}{h_{\text{ПГС}}} \times \frac{M_x}{M_{\text{ПГС}}} \dots\dots(\text{об.}\%), \quad (2.38)$$

де  $X$  - вміст аргону ( $X_1$ ), криптону ( $X_2$ ) у пробі, що підлягає аналізу, % ;

$C_{\text{ПГС}}$  – вміст аргону ( $Z_1$ ), криптону ( $Z_2$ ) у ПГС, % ;  $h_x$  - висота піку аргону ( $h_1$ ), криптону ( $h_2$ ) на хроматограмі проби, що підлягає аналізу, мм;

$h_{\text{ПГС}}$  - висота піку аргону ( $h_{\text{ПГС}1}$ ), криптону ( $h_{\text{ПГС}2}$ ) на хроматограмі ПГС, мм;

$M_x$  - масштаб реєстратора при запису піків компонента, що визначався в аналізованій пробі;

$M_{\text{ПГС}}$  - масштаб реєстратора під час запису піків обумовленого компонента в ПГС.

За результат аналізу приймалось середнє арифметичне трьох послідовно проведених аналізів, припустима розбіжність між якими не перевищувала 5-7 % при довірчій імовірності 0,95.

Позитивною є оцінка довговічності склопакетів за відсутності таких відмов – руйнування або наявності тріщин у склі, поява на їх поверхнях плям та розводів, потьоків, відшарування герметіку; негативного результату при випробуваннях на точку роси та зміна складу газу для газонаповнених склопакетів за 60 циклів випробувань не більш ніж на 5 % від початкового складу газу.

Отримані за цим циклом випробувань результати були використані в розділі 4.2

## 2.4. Висновки за розділом

1. Системна оцінка теплових показників світлопрозорих огорожувальних конструкцій передбачає аналіз процесів теплопередачі крізь світлопрозорі елементи ізоляційної оболонки будинків та експериментальні дослідження

таких експлуатаційних показників: опору теплопередачі, температурного режиму внутрішньої поверхні конструкцій, повітропроникності, показників довговічності.

2. Особливості визначення параметрів теплообміну полягають у розрахунках конвективної та променевої теплопередачі крізь світлопрозору частину та теплопередачі теплопровідністю крізь обрамляючі елементи СК з урахуванням впливу масопередачі повітря, що інфільтрується, на формування температурного режиму конструкції в цілому.

3. Запропонований комплекс експериментальних досліджень передбачає визначення теплотехнічних показників огорожувальних конструкцій в натурних умовах їх експлуатації і в умовах фізичного моделювання процесів тепломасопереносу з використанням експериментальних установок, що дозволяє визначати такі параметри як опір теплопередачі, температурний режим, повітропроникність, коефіцієнт направленої пропускання світла.

4. Розроблена методика випробувань довговічності склопакетів передбачає оцінку стабільності їх експлуатаційних характеристик за показниками утворення точки роси всередині склопакета та зміни газового складу склопакету, що дозволяє проводити таку оцінку для енергоефективних світлопрозорих конструкцій.

## РОЗДІЛ 3. АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СВІТЛОПРОЗОРИХ КОНСТРУКЦІЙ

### 3.1. Алгоритм інженерного методу розрахунків показників енергоефективності світлопрозорих огорожувальних конструкцій

В розділі розглядались два аспекти впливу сонячної радіації на будівлю. Перший - сонячна радіація в холодний період року є позитивним фактором, який поліпшує тепловий баланс будівлі. Саме цей фактор є одним з основних при проектуванні енергоекономічних будівель, що обумовлює необхідність переосмислення принципів побудови будівель по їх формі [143], розташуванню на місцевості, побудові конструкцій стін, тому він детально аналізувався у дисертаційних дослідженнях. Другий аспект відноситься до літнього режиму, коли сонячна радіація є основним джерелом перегріву приміщень і теплового дискомфорту.

Основним завданням інженерних розрахунків на стадії проектування будинків є встановлення балансу теплонадходження-тепловтрати для світлопрозорої конструкції. На підставі аналізу математичних і фізичних закономірностей теплопередачі крізь світлопрозорі конструкції (див. розд. 2.2) розроблено інженерну розрахункову методику, що дозволяє оцінити теплову ефективність віконних конструкцій.

Визначення показників теплопередачі через світлопрозорі конструкції аналітичним методом за формулами (2.1)-(2.28) здійснювалось з урахуванням впливу на процес формування теплових характеристик світлопрозорої конструкції елементів контакту з непрозорою її частиною, фільтрації повітря через нещільності, зміною теплофізичних властивостей повітря в повітряному проміжку залежно від температурних умов зовнішнього й внутрішнього середовищ.

Інженерний метод розрахунку теплопередачі через вікна та оцінка енергоефективності світлопрозорих конструкцій має такий алгоритм. Світлопрозоре огороження розбивається на три зони – середню, крайову зону

скління, зону віконної рами. У середній зоні скління температурний перепад практично постійний і передача тепла теплопровідністю по склінню на температурні поля не впливає. У крайовій зоні скління та зонах віконної рами температурний перепад змінюється по висоті і розподіл температур в істотній мері залежить від передачі тепла теплопровідністю.

Розрахунок теплотехнічних характеристик вікон і оцінка їх теплової ефективності здійснюється на підставі отриманих емпіричних або розрахункових характеристик, що визначають вплив крайових зон і зон віконної рами на інтегральні теплотехнічні показники вікон. Для цього визначається показник термічної неоднорідності віконної конструкції  $f$ , як відношення опору теплопередачі в середній зоні вікна до приведенного опору теплопередачі віконної конструкції, що розраховуються за формулами (2.30) та (2.32). У подальших розрахунках температури скління підставляються або експериментально отримані значення, або довідкові значення опору теплопередачі із коефіцієнтом  $f$ .

Алгоритм рішення сформульованого завдання такий.

1. Залежно від місця розташування будинку (географічна широта й довгота) і орієнтації вікна по сторонах світла визначаються теплові параметри зовнішнього середовища:  $T_0(\tau)$  - температура зовнішнього повітря;  $T_{out.SF}(\tau)$  - температура на зовнішній поверхні віконної конструкції з урахуванням сонячного опромінення;  $I(t)$  - потужність сонячної енергії, що приходить до вікна, Вт, у світловий період дня.

2. Розраховуються теплонадходження  $Q_{TH}(t)$  від сонячної радіації через віконну конструкцію протягом заданого періоду - позитивна складова теплового балансу.

3. Розраховуються тепловтрати  $Q_T(t)$  через вікно протягом заданого періоду у безінсоляційний період доби з урахуванням впливу проникаючої сонячної радіації при наявності інсоляційних потоків за формулами, наведеними нижче.

4. Розраховуються тепловтрати  $Q_{F,w}(t)$  через віконну конструкцію, обумовлені інфільтрацією повітря за формулами (2.1) - (2.9).

5. Складається рівняння теплового балансу віконної конструкції у вигляді рівнянь (2.28) для заданого періоду.

### 3.2. Розрахунковий метод визначення показників енергоефективності світлопрозорих конструкцій у холодний період року

Енергетична ефективність світлопрозорої конструкції визначалась на підставі рівняння теплового балансу, в основу якого покладені узагальнені формули (2.1), (2.10), (2.21), (2.25), (2.28) з урахуванням формул (2.20), (2.19), (2.22)-(2.24), (2.9). Параметром, що досліджувався та визначався, була температура внутрішньої поверхні заповнення світлового прорізу  $\tau_{в.св}$ , що формується під впливом як зовнішніх факторів – температури зовнішнього повітря, умов теплообміну із зовнішнім середовищем, інтенсивності сонячної радіації, що проходить через віконну конструкцію, і внутрішніх факторів - особливостей формування теплового середовища й теплообміну в приміщенні, так і фізичних характеристик безпосередньо віконної конструкції. Коефіцієнт променевого і конвективного теплообміну внутрішньої поверхні  $\alpha_{\Sigma}$ , Вт/м<sup>2</sup>·К, визначався за формулою:

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_k + \alpha_{пр}, \quad (3.1)$$

де  $\alpha_k$  – коефіцієнт теплообміну конвекцією між світлопрозорим огороженням та навколишнім середовищем, визначається за формулою (2.18),

$\alpha_{пр}$  – коефіцієнт променевого теплообміну між світлопрозорим огороженням та навколишнім середовищем, визначається за формулою (2.24).

Розрахунки температури поверхні світлопрозорої конструкції проводились з урахуванням градієнта температури повітря по висоті приміщення. При цьому температура повітря в приміщенні на висоті 1 м від підлоги приймалася рівною  $T_R^* = T_R$ , а при  $x > 1$  м -  $T_R^* = T_R + \Delta T \cdot (x - 1)$ , де  $\Delta T$  - температурний градієнт по висоті приміщення, що для житлових і громадських будівель приймається рівним  $\Delta T = 0,5$  град/м.

Для визначення кількості теплоти, що проходить через віконну конструкцію, необхідно визначити насамперед значення температури внутрішньої поверхні скління,  $\tau_{в.св.}$ . При цьому необхідно враховувати, що на формування внутрішнього теплового режиму приміщень істотний вплив має температура внутрішньої поверхні скління, тому в розрахункові формули, що визначають теплові характеристики приміщення, входить значення температури внутрішньої поверхні. Тому для визначення значення  $\tau_{в.св.}$  у часі  $z$  вирішувалося рівняння

$$\tau_{в.св.}(z) - P[\tau_{в.св.}(z), z] = 0, \quad (3.2)$$

де

$$P[\tau_{в.св.}(z), z] = t_u(\tau_{в.св.}) + \frac{Q_{\text{погл}}[\tau_{в.св.}(z), z] - t_u(\tau_{в.св.}) - [(\tau_{в.св.}(z))/R_{\Sigma}]}{\alpha_{\Sigma}(\tau_{в.св.}(z))}.$$

Рішення рівняння (3.2) щодо невідомої величини  $\tau_{в.св.}(z)$  (при цьому  $z$  розглядається як параметр) проводилось чисельно за допомогою ітераційного методу січної [144].

Для загального аналізу рівняння (2.28) доцільно розглядати у вигляді

$$Q(z) = Q_{\text{погл}}[I(z)] - Q_{к-п}[R_{\Sigma}(z)] - Q_{іф}[j(z)], \quad (3.3)$$

де  $Q_{\text{погл}}[I(z)]$  - теплонадходження крізь світлопрозору огорожувальну конструкцію, що визначаються за формулами (2.26)-(2.27), Вт/м<sup>2</sup>;

$Q_{к-п}[R_{\Sigma}(z)]$  - тепловтрати крізь світлопрозору огорожувальну конструкцію, що визначаються за формулами (2.21), Вт/м<sup>2</sup>;

$Q_{іф}[j(z)]$  - тепловтрати внаслідок інфільтрації крізь світлопрозору огорожувальну конструкцію, що визначаються за формулою (2.9), Вт/м<sup>2</sup>.

Показником енергоефективності світлопрозорої конструкції є узагальнена характеристика у вигляді усереднених (середньо-інтегральних) для розглянутого періоду складових теплового балансу для вікна (кВт·год) за даний період  $Z$ :

$$Q_E = \frac{1}{Z} \int_0^Z Q(z) dz \quad (3.4)$$

Оцінка теплової ефективності віконної конструкції здійснювалася на підставі отриманих експериментальних даних за значеннями опору теплопередачі, повітропроникності вікон і коефіцієнту пропускання сонячної енергії по методиках, наведених у розділах 2.3.1, 2.3.2, 2.3.3.

### **3.3. Визначення впливу теплових характеристик світлопрозорих конструкцій на показники енергоефективності**

Розрахунки теплового балансу світлопрозорих конструкцій проводились для дев'ятиповерхової будівлі (див. розд. 2) для зимового періоду часу (грудень, січень, лютий) за період від 1 до 5 діб. Під час виконання розрахунків враховувався вплив на показники енергоефективності таких факторів як: коефіцієнт прозорості огорожувальної конструкції, приведені опори теплопередачі, орієнтація стіни, де знаходилась світлопрозора огорожувальна конструкція. Розрахунки проводились для 1-ї температурної зони України згідно [12], кліматичні параметри приймались для м. Києва згідно [133].

На рис. 3.1 наведений тепловий баланс світлопрозорої конструкцію за 1 добу в сонячний день у лютому в залежності від приведеного опору теплопередачі  $R_{\Sigma пр}$  та орієнтації стіни при фіксованому значенні коефіцієнта направлено пропускання світла  $b$ . Дані показують, що при опорі теплопередачі  $0,75 \text{ м}^2\text{К/Вт}$  і вище для південної орієнтації тепловий баланс є додатним, тобто через світлопрозору конструкцію вдень у приміщення попадає більше енергії, ніж втрачається за добу через цей елемент огороження будівлі. Для західної орієнтації і, відповідно інших орієнтацій за сторонами світу, на які попадає ще менша сонячної енергії [6, 7, 145], тепловий баланс є від'ємним. Таким чином, в умовах 1-ї температурної зони України максимальний коефіцієнт скління фасаду є доцільним тільки для стін південної орієнтації.



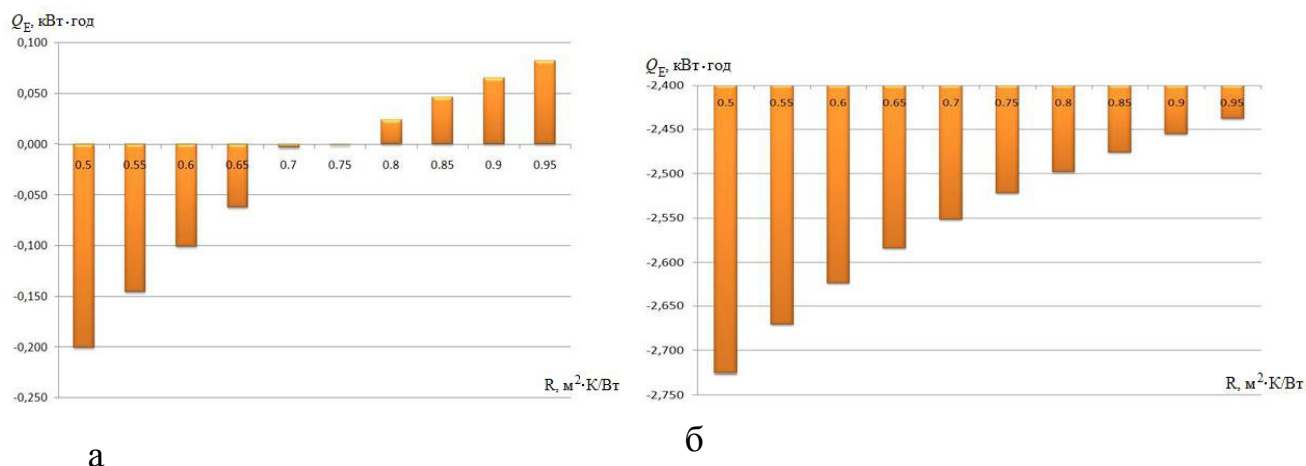


Рис. 3.1. Залежність теплового балансу віконної конструкції від опору теплопередачі, якщо при  $b=0,76$ , при орієнтації стіни: а – південній; б – західній

На рис. 3.2 представлена залежність середньоінтегрального балансу тепловтрат-теплонадходжень через віконну конструкцію на протязі холодного місяця від опору теплопередачі при коефіцієнті прозорості  $b = 0,77$  і  $b = 0,68$  та при опорі повітропроникності  $0,24 \text{ м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{Па} / \text{кг}$ . Залежність має нелінійний характер, а значення тепловтрат і теплонадходжень визначаються типом склопакету.

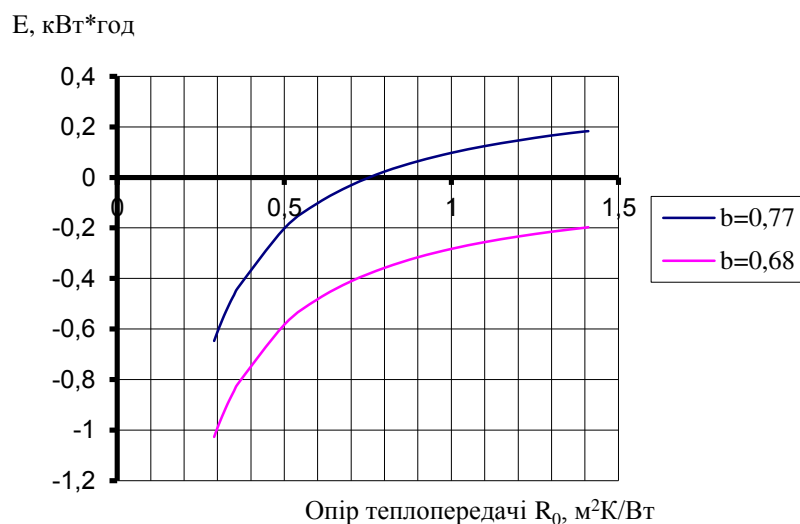


Рис. 3.2. Залежність теплового балансу віконної конструкції від опору теплопередачі та прозорості

Вплив повітропроникності на енергетичні властивості віконних конструкцій наведено на рис. 3.3. Отримані результати дозволяють констатувати, що навіть при високих значеннях опору теплопередачі –

1,4 м<sup>2</sup>К/Вт і прозорості 0,77, при опорі повітропроникності менше ніж 0,4 м<sup>2</sup>·год·Па/кг тепловий баланс конструкції є від'ємним.

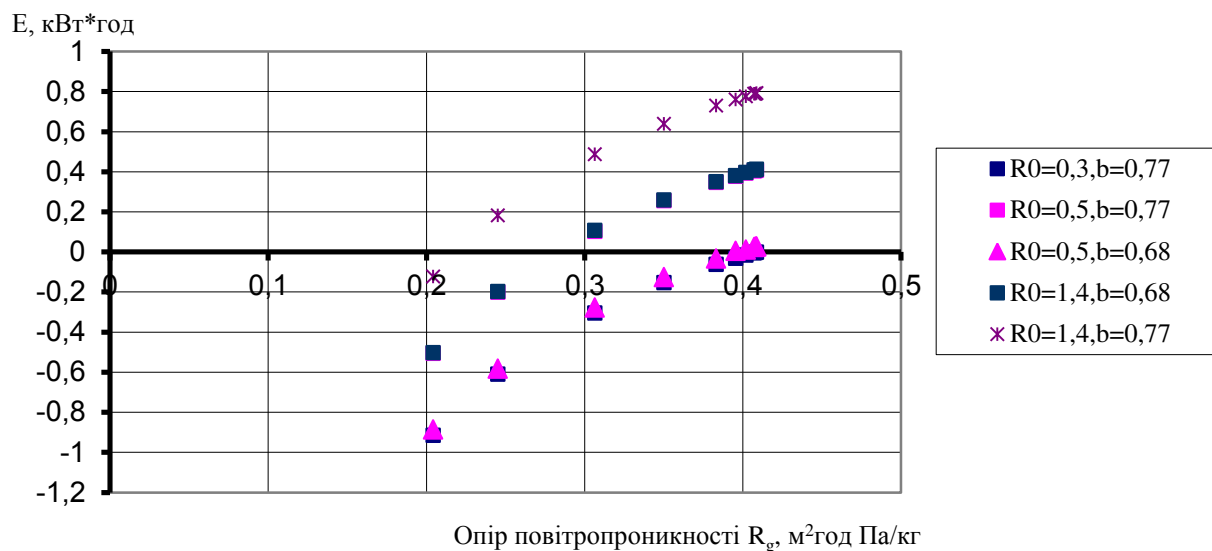


Рис. 3.3. Залежність балансу тепловтрат-теплонадходжень через віконну конструкцію від опору повітропроникності

Результати розрахунків залежності теплонадходжень від сонячної радіації до приміщень від прозорості віконної конструкції наведені на рис. 3.4. Із підвищенням прозорості суттєво зростають теплонадходження, але при цьому слід враховувати фізичні можливості забезпечення високих значень цього показника.

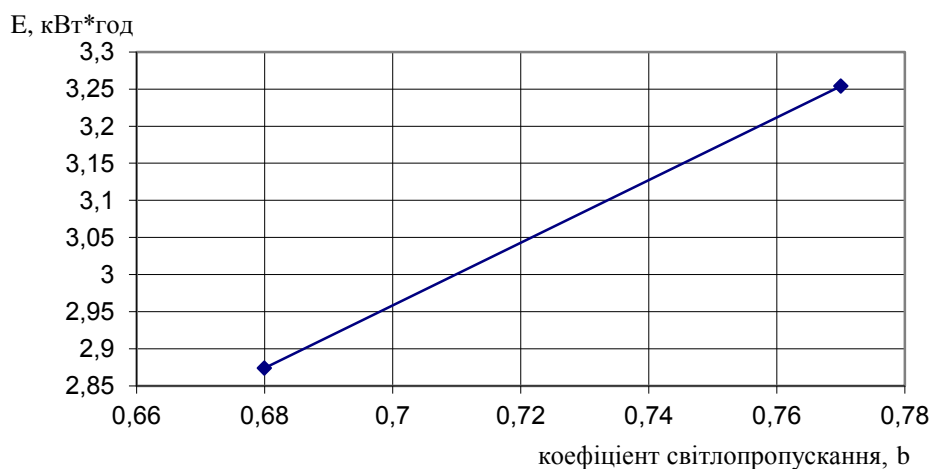


Рис. 3.4. Залежність величини теплонадходжень сонячної радіації від коефіцієнта прозорості склопакета

Результати експериментальних досліджень за методикою [140] (див.розд.2.3.3) показали, що склопакети, які за своїми теплоізоляційними властивостями можуть забезпечувати необхідний за вимогами [12] приведений опір теплопередачі світлопрозорих конструкцій, мають загальний коефіцієнт пропускання від 0,77 до 0,62 (табл. 3.1). При цьому газонаповнення не впливає на загальну прозорість склопакета, а її значення визначається за кількістю шарів скла та типами скла. Склопакети з *i*-склом є більш прозорими, ніж з К-склом (див.розд.1.2).

Таким чином, забезпечити прозорість склопакетів більше ніж 0,73-0,77 неможливо, тому слід аналізувати інші теплотехнічні показники, які можуть змінюватися в більшому діапазоні *i*, відповідно, більше впливати на енергоефективність конструкцій. При цьому слід враховувати, що прозорість безпосередньо конструкцій є ще більш низькою внаслідок наявності обрамляючих елементів (див.розд.1.1). Результати експериментальних досліджень вікон з ПВХ-профілів з однокамерним склопакетом показали, що загальний коефіцієнт пропускання світла цих конструкцій знаходиться у діапазоні 0,53÷0,55.

Таблиця 3.1

## Загальний коефіцієнт світлопропускання склопакетів

Кількість камер	Варіанти скління	Газовий склад, %			Загальний коефіцієнт пропускання світла
		Повітря	Криптон	Ксенон	
1	4M1-16-4i	100			0,73
1	4M1-16-4i			100	0,73
1	4M1-16-4i		100		0,73
1	8i(G)-16 -10F	10	90		0,77
2	4M1-10-4M1-10-4i	100			0,67
2	4M1-10-4M1-10-4i			100	0,67
2	4M1-10-4M1-10-4i		100		0,67
2	4i-10-4M1-10-4i	100			0,62
2	4i-10-4M1-10-4i			100	0,62
2	4M1-10-4M1-10-4 К			100	0,68
2	4M1-10-4M1-10-4 К	100			0,68

В таблиці 3.1 позначено: 4М - товщина та марка скла за [25]; G - флоат скло Guardian, гартоване, з покриттям 2-ї поверхні SunGuard HP Neutral Plus 50; F – триплекс: 5 мм прозоре флоат скло + 0,76 мм PVB + 5 мм прозоре флоат скло.

На рис.3.5 наведені результати розрахунків тепловтрат в залежності від приведенного опору теплопередачі віконної конструкції. При підвищенні опору теплопередачі від  $0,5 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  до  $0,75 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ , тобто на 50%, тепловтрати знижуються на 20%. Подальше підвищення ще на 100% - від  $0,75 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  до  $1,5 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ , знижує тепловтрати всього на 7%. Тому доцільне значення опору теплопередачі світлопрозорої конструкції дорівнює  $0,75 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ .

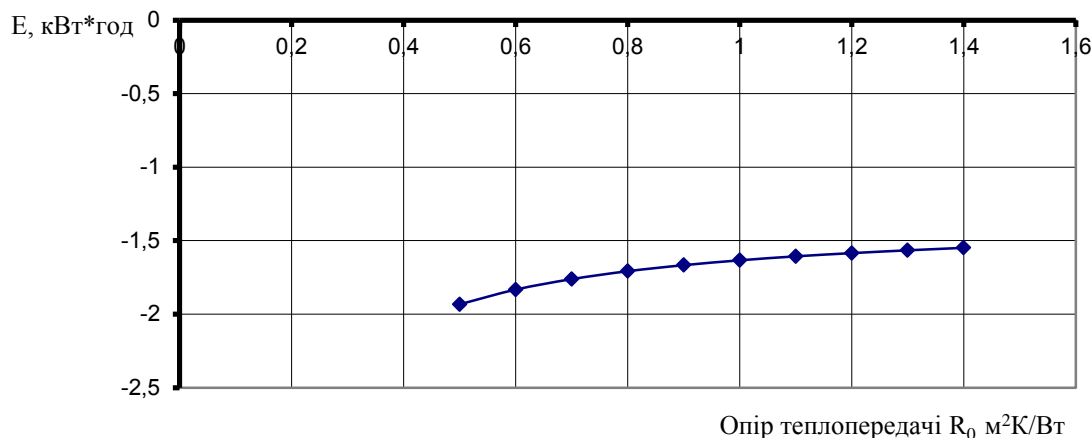


Рис. 3.5. Залежність тепловтрат від опору теплопередачі

Залежність тепловтрат крізь віконну конструкцію від повітропроникності має більш різкий характер (рис.3.6) – при підвищенні опору повітропроникності на 100% тепловтрати знижуються на 90%.

Підвищення приведенного опору теплопередачі СОК також має певні обмеження. Якщо непрозорі стінові огорожувальні конструкції можуть мати приведений опір теплопередачі  $5 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  і вище, то для світлопрозорих конструкцій, які використовуються у будівельній практиці, максимальне значення не може перевищувати  $1,5 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ . В той же час опір повітропроникності світлопрозорих огорожувальних конструкцій може підвищуватись у десятки разів і досягати значень  $20 \text{ м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{ДаПа}^{2/3}/\text{кг}$  і вище, що суттєво знижує теплові витрати і поліпшує тепловий баланс будівель.

Таким чином, у найбільшій ступені можна впливати на показники енергоефективності світлопрозорих конструкцій завдяки поліпшенню технічних рішень, які знижують інфільтраційні потоки крізь елементи їх обрамлення.

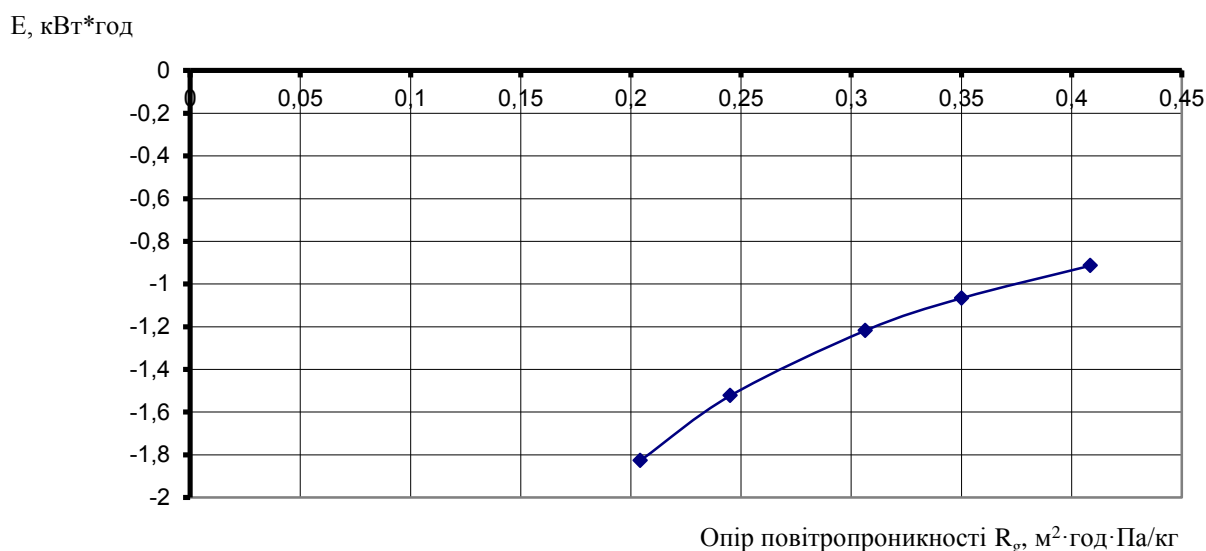


Рис. 3.6. Залежність тепловтрат від опору повітропроникності

### 3.4. Особливості формування температурного режиму стійко-ригельних елементів світлопрозорих фасадних конструкцій

Особливістю застосування стійко-ригельних світлопрозорих конструктивних систем є те, що вони поєднують світлопрозорі та непрозорі елементи в площині фасаду. На рис. 2.1 наведений зовнішній вигляд будівлі, яка має світлопрозорий зовнішній шар, але стіни складаються як із світлопрозорих конструкцій стійко-ригельної системи, так із непрозорих багат шарових панельних систем. Поєднання світлопрозорих елементів з елементами, що мають ефективну теплоізоляцію, приводить до зовсім нових теплових принципів роботи зовнішніх огорожувальних конструкцій [6, 24]. Результати натурних досліджень об'єкту показали (розд.4), що температурний режим внутрішньої поверхні є незадовільним – температури внутрішньої поверхні є нижчими точки роси і навіть замерзання води, що призводило до випадіння конденсату на внутрішній поверхні, а в локальних зонах і до утворення інею.

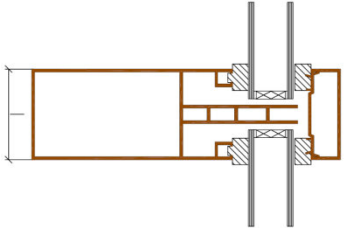
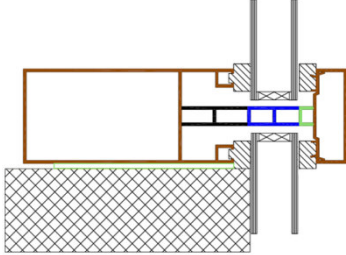
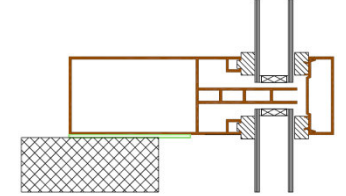
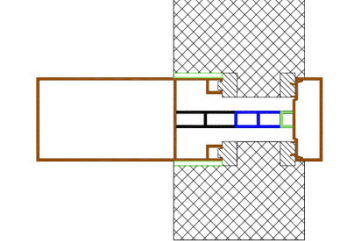
Для визначення причин незадовільного стану стиків непрозорої і світлопрозорої частин будівлі, який є тепловою відмовою огороження, був проведений аналіз особливостей формування теплового режиму комбінованих фасадних конструкцій. В основу побудови математичного опису теплового

стану конструкцій покладені рівняння (2.11)-(2.14), а також закономірності теплопереносу (2.17)-(2.24), які реалізовані для розрахунків двовимірних та тривимірних температурних полів відповідно у програмах THERM та ANSYS.

Для аналізу конструктивних особливостей комбінованих світлопрозорих фасадних систем було обрано чотири принципові типи конструктивних вузлів, що наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

**Принципові типи конструктивних вузлів кріплення світлопрозорої частини фасаду**

Тип вузла	Геометрична схема	Характеристика
1		Рядове кріплення світлопрозорої частини фасаду – склопакетів до стійки
2		Примикання стійки до колон будівлі чи до стіни
3		Примикання стійки зі світлопрозорими елементами з фасадної сторони та теплоізоляційними шарами, що розміщені через повітряний проміжок з внутрішньої сторони склопакетів
4		Примикання до стійки тільки непрозорих теплоізоляційних елементів

Особливість наведених конструктивних вузлів полягає в тому, що при однаковому конструктивному виконанні стійки її теплові характеристики є різними в залежності від типу вузла. Це пояснюється тим, що в кожному з вузлів стійка знаходиться в різних теплових умовах. Для вузлів типу 1 формування його температурного режиму визначається закономірностями вільної конвекції в великому об'ємі (див. розд. 2.2.2), в якому знаходиться основна теплосприймаюча частина стійки, та променевим теплообміном її з навколишнім середовищем, коли приведений коефіцієнт ступеня чорноти системи розраховують за модифікованою формулою (2.20):

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2^H} - 1 \right)}, \quad (3.6)$$

де  $\varepsilon_{np}$  – приведений ступінь чорноти системи «стійка–навколишнє середовище» (приміщення);

$\varepsilon_1$  – ступінь чорноти поверхні стійки;

$\varepsilon_2^H$  – приведений ступінь чорноти приміщення (конструкцій та предметів, що беруть участь у променевому теплообміні зі стійкою).

Для вузлів типу 2 формування температурного поля стійки визначається не тільки закономірностями конвективно-променевого теплообміну з навколишнім середовищем, але й умовами тепловідводу та теплопідводу до стійки від прилеглих до неї глухих елементів зовнішньої стіни.

Для вузлів типів 3 та 4 формування температурного поля стійки визначається вже закономірностями конвективного теплообміну в обмеженому просторі і променевого теплообміну системи «стійка–масивна теплоізоляція», коли приведений коефіцієнт ступеня чорноти визначається не за формулою (3.6), а за формулою [59]:

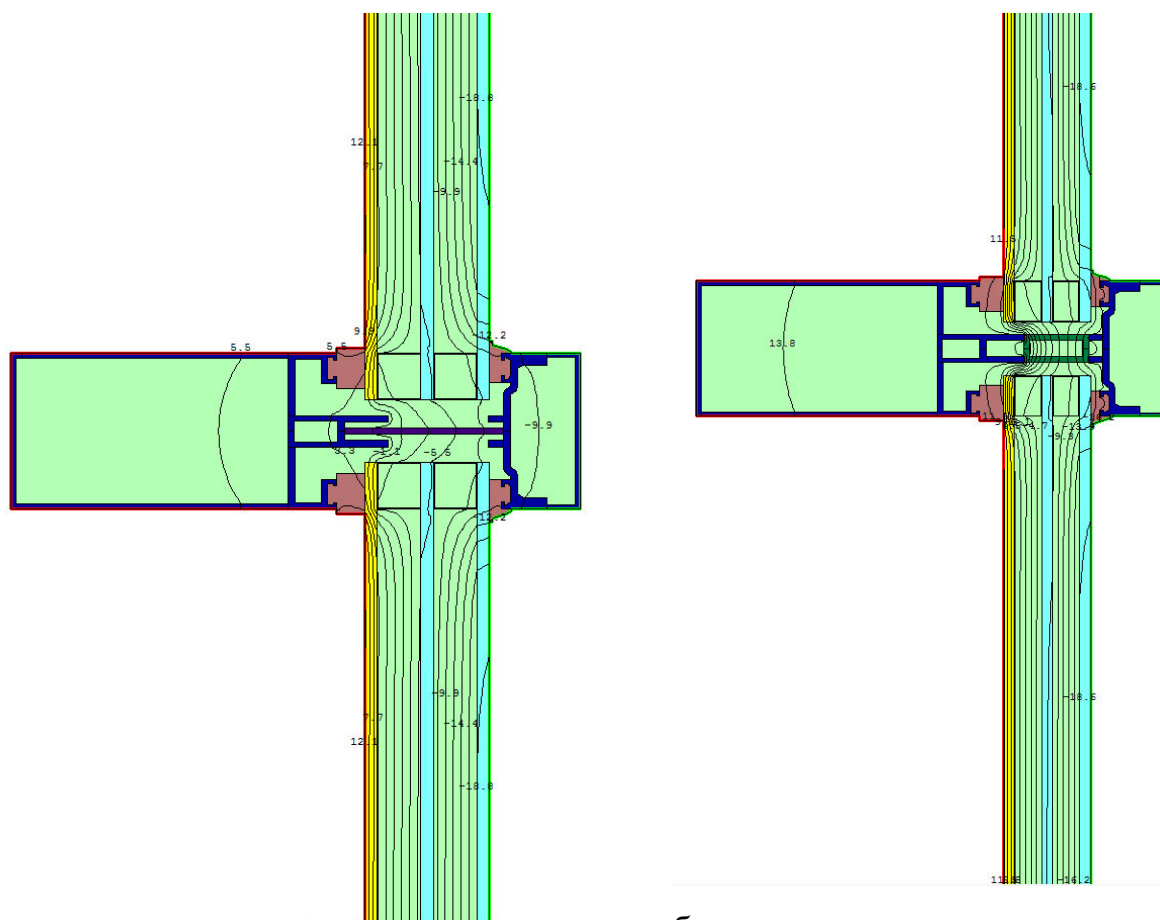
$$\varepsilon_{np} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2, \quad (3.7)$$

де  $\varepsilon_2$  – ступінь чорноти шару масивної ізоляції.



Основним конструктивним фактором, що впливає на тепловий режим 1-го типу, є наявність або відсутність теплоізоляційного вкладишу і геометричні параметри цього вкладишу. На рис. 3.7 приведено температурні поля стійки в залежності від її конструктивного рішення. Ізотерми на рисунку показані суцільними лініями через кожні 3 °С. На рис. 3.7 а, показано розміщення температур конструкції із стійками без термоізоляційного вкладишу. При такому рішенні температура внутрішньої поверхні стійки внаслідок впливу суцільного металевого кріплення дорівнює 5,5 °С і є нижчою за температуру точки роси. При наявності теплоізоляційного вкладишу довжиною 24 мм температура на внутрішній поверхні стійки підвищується до 13,8 °С (див. рис. 3.7 б).

Таким чином, для громадських будівель, що експлуатуються в кліматичних умовах 1-ї температурної зони України, теплові характеристики стійок з термоізоляційними вкладишами довжиною 24 мм відповідають необхідним вимогам в умовах конвекції у великому об'ємі та променевому теплообміні для поверхонь, коли одна площа, що має більш високу температуру поверхні, превалює над іншою площею.



а

б

Рис. 3.7. Температурне поле рядового вузла світлопрозорого фасаду із стійкою: а - без термоізоляційного вкладишу; б - з вкладишем довжиною 24 мм

На рис. 3.8 показано температурне поле вузла 2-го типу для стійки з термоізоляційним вкладишем довжиною 32 мм та примиканням до утепленої стіни. Температура внутрішньої поверхні стійки в цьому вузлі становить 10,9 °С, що відповідає нормам, але при цьому на 3 °С нижча, ніж для варіанту 1-го типу.

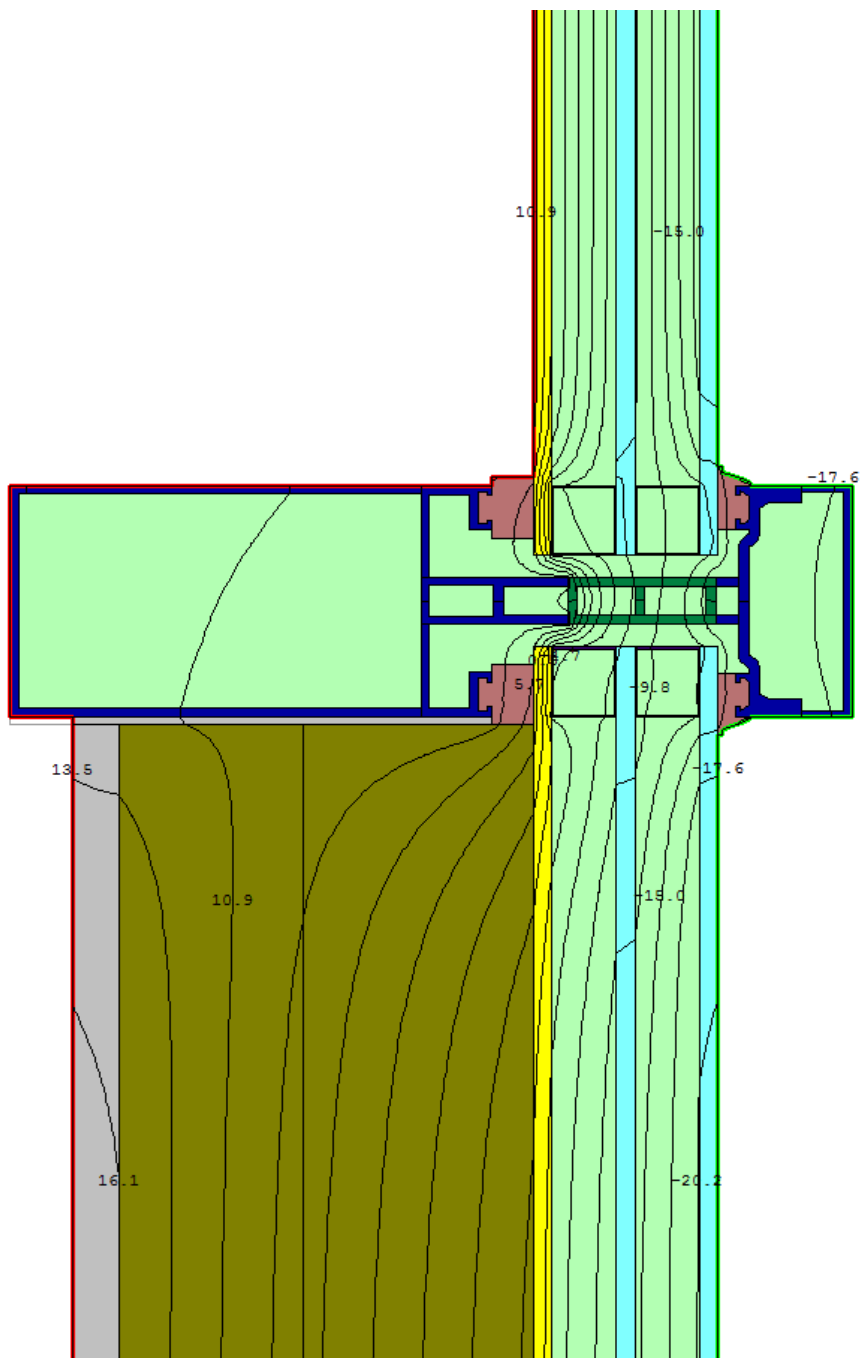


Рис. 3.8. Температурне поле рядового вузла 2-го типу

Температурне поле вузла 3-го типу приведено на рис. 3.9. У вузлі даного типу стіна з теплоізоляційними шарами знаходиться на відстані 60 мм від внутрішньої сторони склопакета. Температура поверхні стійки при цьому становить  $9,0^{\circ}\text{C}$ , що не відповідає нормам. Цей тип конструктивного рішення не слід використовувати у практиці будівництва, або замінювати на вузол 2-го типу.

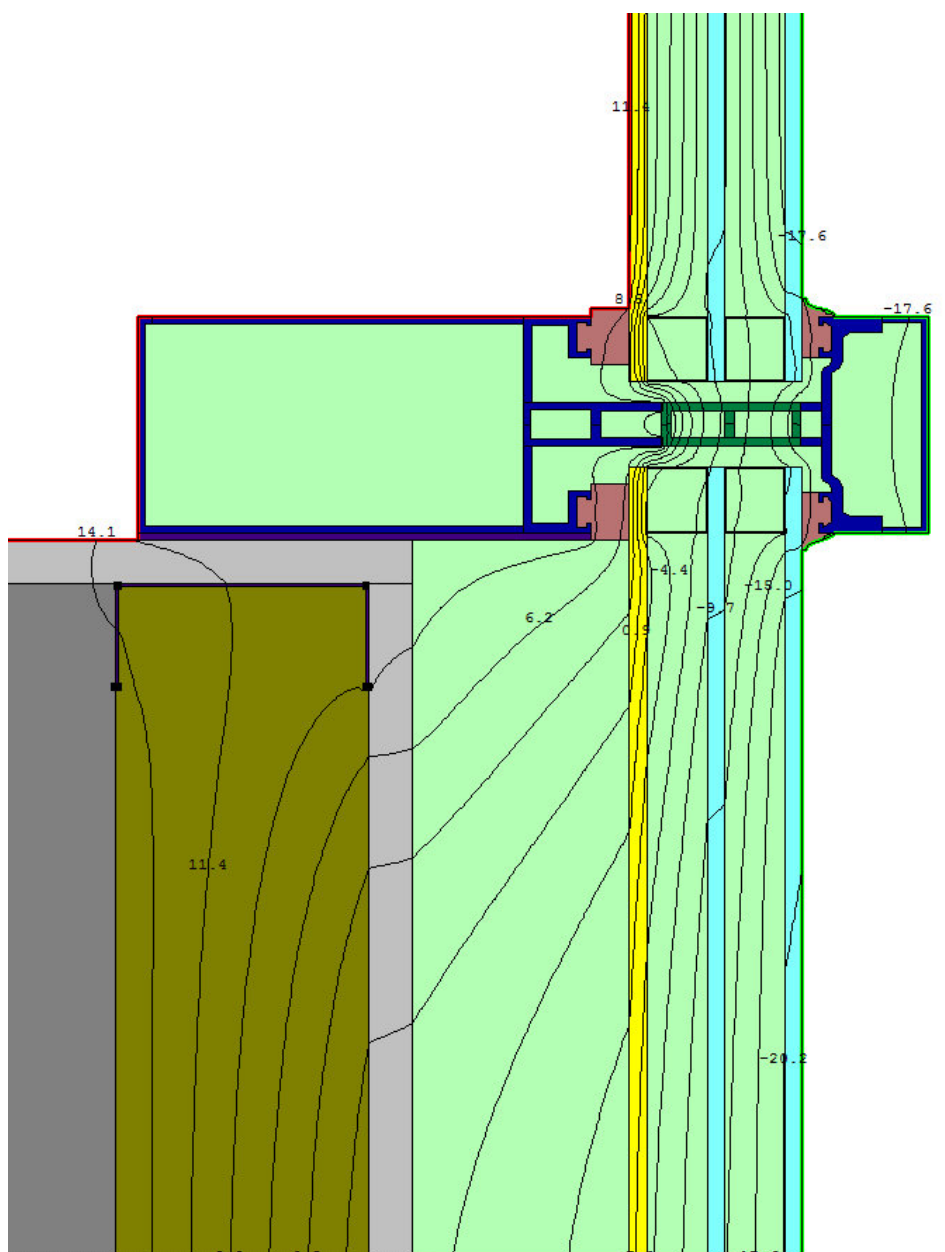
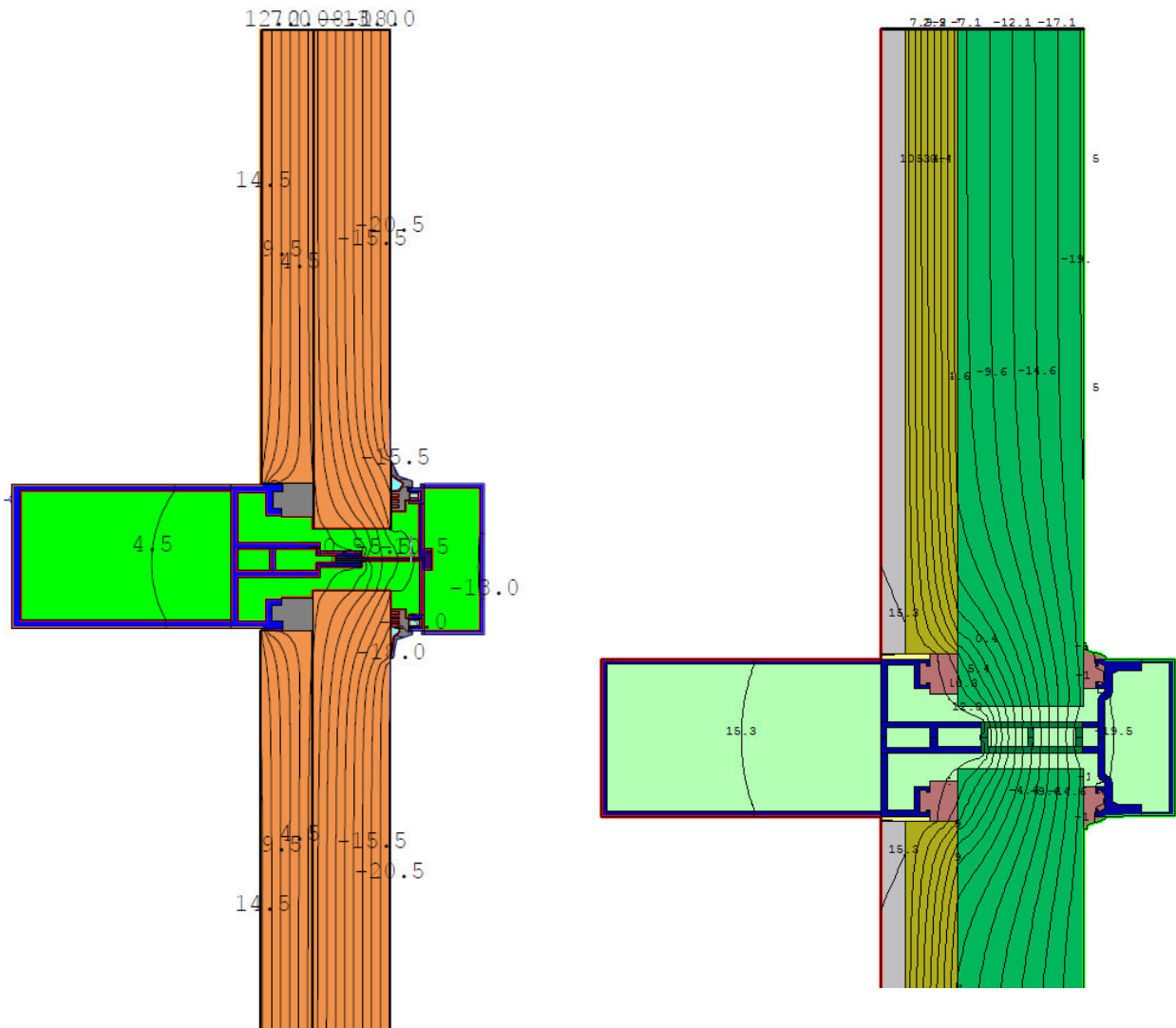


Рис. 3.9. Температурне поле рядового вузла 3-го типу

Для вузлів 4-го типу є характерним використання шарів утеплювача як заповнювача світлопрозорих частин фасаду. Як показано на рис. 3.10 а, при відсутності термовкладиша температура внутрішньої поверхні стійки є незадовільною та дорівнює  $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для забезпечення вимог [12] по мінімальній температурі для внутрішньої поверхні необхідно застосовувати вже стійки з теплоізоляційним вкладишем довжиною 32 мм (рис. 3.10 б), при якому температура внутрішньої поверхні стійки не відрізняється від температури внутрішньої поверхні основного поля.



а

б

Рис. 3.10. Температурне поле вузла 4-го типу: а - без термовкладишу; б - з термовкладишем довжиною 32 мм

Для визначення показника приведенного опору теплопередачі огорожувальних конструкцій на основі розрахунків двомірних температурних полів використовують показник лінійного коефіцієнта теплопередачі. Цей показник широко використовується в закордонній практиці проектування теплоізоляції будівельних конструкцій [147] та введений у вітчизняний нормативний документ [18]. Значення лінійного коефіцієнта теплопередачі для розглянутих характерних вузлів наведено у табл. 3.3.

Таблиця 3.3

**Лінійний коефіцієнт теплопередачі в залежності від конструкції стійки**

Тип вузла	1			2	3	4	
Конструктивний варіант з термовкладишем довжиною, мм	0	24	32	32	32	0	32
Лінійний коефіцієнт теплопередачі $\Psi$ , Вт/(м·К)	3,39	1,03	0,85	6,9	12,63	6,06	-1,2

Лінійний коефіцієнт теплопередачі має знак «-», оскільки елементи стійок мають більш низький опір теплопередачі і знижують інтегральну характеристику теплоізоляції конструкції. При цьому, в залежності від конструктивного рішення стійки – довжини термовкладиша, яка визначає термічні властивості стійки, лінійний коефіцієнт теплопередачі зменшується, тобто загальна теплопередача через конструкцію збільшується через низькі термоізоляційні характеристики стійки. При цьому чим більше значення опору теплопередачі основного поля конструкції (а для конструкцій комбінованих фасадних систем, що розглядаються, основним полем є світлопрозорі зони склопакетів або непрозорі зони масивних ізоляцій), тим більше значення лінійного коефіцієнта теплопередачі, тобто тим суттєвіше відрізняються теплопередача через зони основного поля і через зону стійок. Для вузлів 4-го типу при наявності термовкладиша довжиною 32 мм лінійний коефіцієнт теплопередачі має додатний знак, оскільки термічні характеристики стійки не гірші, ніж характеристики основного поля.

Таким чином, при розробленні конструкцій комбінованих фасадних систем, які є суттєво термічно неоднорідними конструкціями, необхідно враховувати вплив комплексу факторів на формування температурного поля їх внутрішньої поверхні, що визначається не тільки перетоками теплоти по перерізу конструкції в результаті різної теплопровідності ділянок конструкції, як це спостерігається для традиційних непрозорих конструкцій, але й

особливостями формування променево-конвективного теплообміну всередині конструкції та з навколишнім середовищем.

Треба враховувати, що для конструктивних вузлів типу 2-4 формування температурного поля стійки визначається не тільки закономірностями конвективно-променевого теплообміну з навколишнім середовищем, але і умовами тепловідводу та теплопідводу до стійки від прилеглих до неї глухих елементів зовнішньої стіни [10, 24].

Конструктивне рішення характерного вузла примикання світлопрозорого стійкового-ригельного фасаду з холодним фальш фасадом до непрозорих зовнішніх стін показано на рис. 3.11а. Мінімальна температура (рис. 3.11б) внутрішньої поверхні становить мінус 1,1 °С (на поверхні стійки), що є за своєю суттю тепловою відмовою роботи конструкції. При цьому температура на поверхні відкосу дорівнює 4,7 °С.

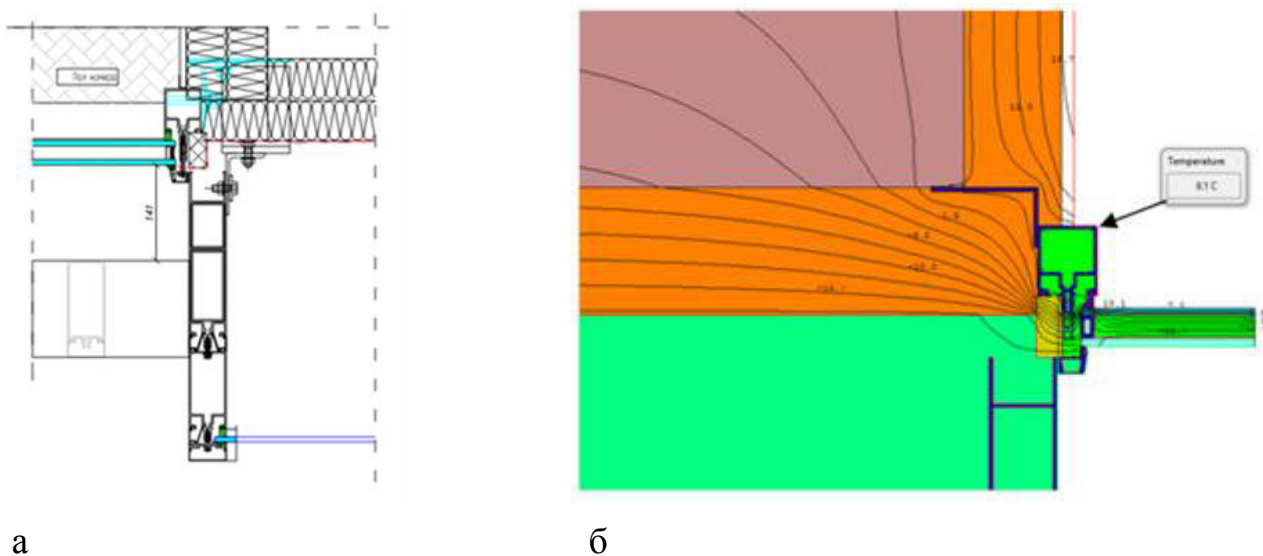
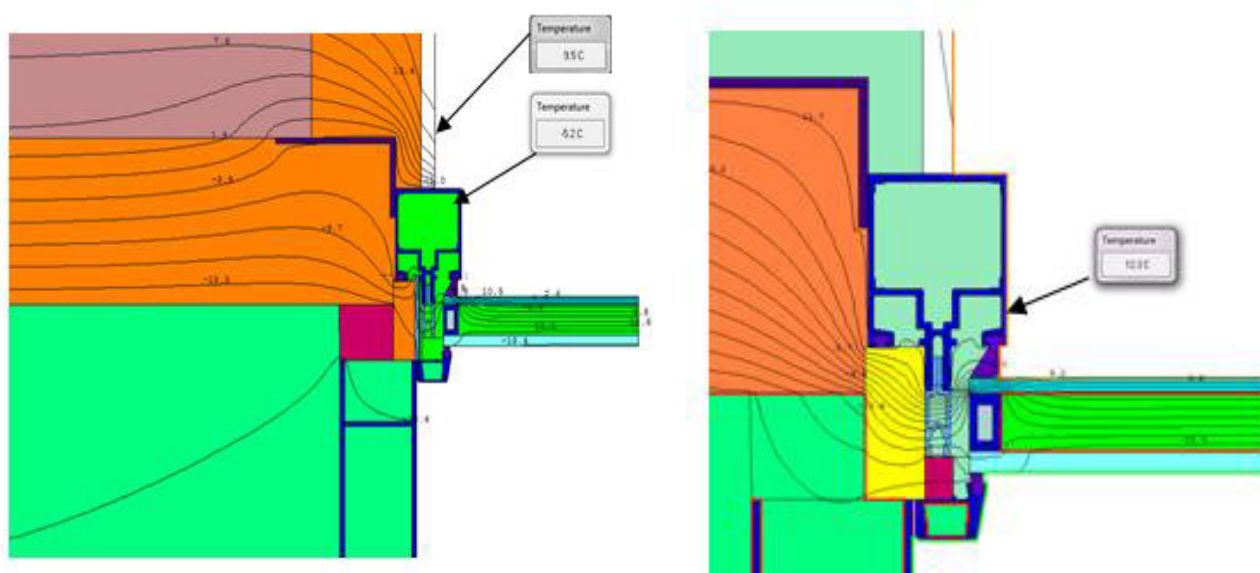


Рис. 3.11. а - конструктивне рішення; б - та температурне поле вузла примикання стійки до непрозорої стіни

Площа теплопідводу у порівнянні з рядовим виконанням стійки (вузлом типу 1) зменшилась на третину, що привело до зафіксованого вище зниження температури на її поверхні. Крім того, наявність композитного елемента з алюмінію біля теплоізоляційного вкладишу, незважаючи на малу площу

примикання композитного елемента до внутрішніх частин стійки, нівелює вплив теплоізоляційного вкладиша і створює по всій висоті стійки суцільне теплопровідне включення, вплив якого є достатнім для промерзання цього вузла фасадної системи.

Особливим є формування теплового режиму конструкції при введенні додаткових конструктивних елементів, наприклад, заповнення проміжку між внутрішнім оздобленням з гіпсокартону та газобетонною кладкою. Температурне поле даного конструктивного принципу наведено на рис. 3.12 а. Зафіксовано підвищення температури на поверхні відкосу (з 4,7 °С до 9,5 °С) і суттєве зниження температури стійки до мінус 5,2 °С, що пояснюється зменшенням площі її теплосприймаючої поверхні. Тільки при виконанні комплексу запропонованих конструктивних змін - демонтажу елемента жорсткості із композиту та заміни його на вставки із спіненого ПВХ або матеріалу, що має аналогічні властивості, з теплопровідністю не більше ніж 0,07 Вт/(м·К), температура на поверхні профілю стійки підвищується до 12,3 °С (рис. 3.12 б).



а

б

Рис. 3.12. Температурне поле вузла примикання стійки до непрозорої стіни при зміні конструктивних рішень заповнення зони примикання



На рис. 3.13 наведений досліджений вид зовнішніх огорожувальних конструкцій будівлі громадського призначення, що складається з світлопрозорої системи (склопакетів товщиною 37 мм (8-16-6i-6) та сталевих балок прямокутної форми з розмірами у перетині 320x200x6 мм та 120x60x4 мм, які межують з холодним зовнішнім середовищем та теплим внутрішнім і перетинають композитну панель товщиною 61мм, що відмежовує холодну зону від теплої. Композитна панель складається з двох алюмінієвих листів товщиною 2 мм та утеплювача товщиною 55 мм із екструдованого пінополістиролу густиною 38 кг/м<sup>3</sup>. Вид конструкції характерного вузла наведено на рис. 3.14.



Рис. 3.13. Загальний вид дослідного об'єкту

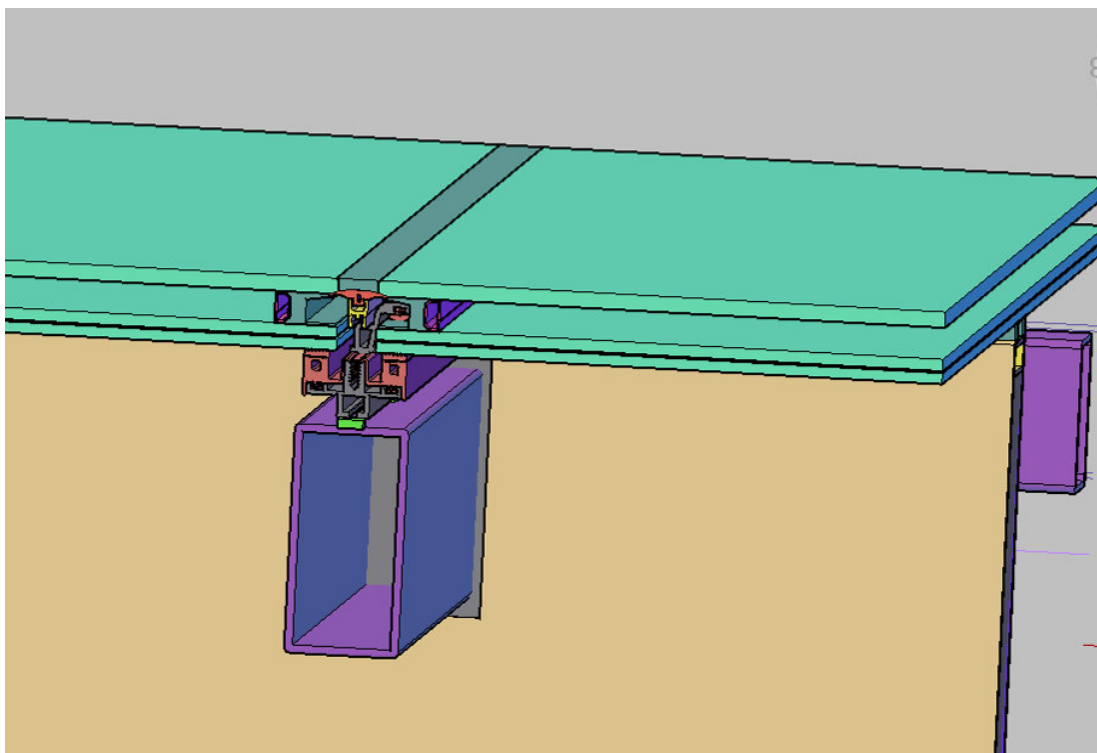


Рис. 3.14. Вид конструктивного вузла

Результати розрахунків двовимірного поля не відображають у повній мірі реальний температурний стан вузла складної геометрії, оскільки тепловий потік проходить одночасно як через металеві балки, так і через композитну панель. За результатами розрахунків двовимірної моделі мінімальна температура на панелі біля балки становить  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 3.15). Застосування тривимірної моделі дозволяє враховувати умови омивання конструкції балки тепловим потоком по всьому його периметру і більш коректно визначати мінімальну температуру на поверхні панелі, яка становить  $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 3.22). На рис. 3.15 та 3.16 штриховою лінією позначено частку поверхні з температурами, що нижчі за температуру точки роси ( $10,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Більш високі значення температури поверхні у розрахунках за тривимірною моделлю обумовлені введенням в умови теплообміну характеристик конвективного теплообміну по всій висоті та довжині конструкцій металевих балок, тобто тих конструктивних елементів, які є теплосприймаючими і тепловий потік від яких направлений у більш холодні зони комбінованої конструкції.

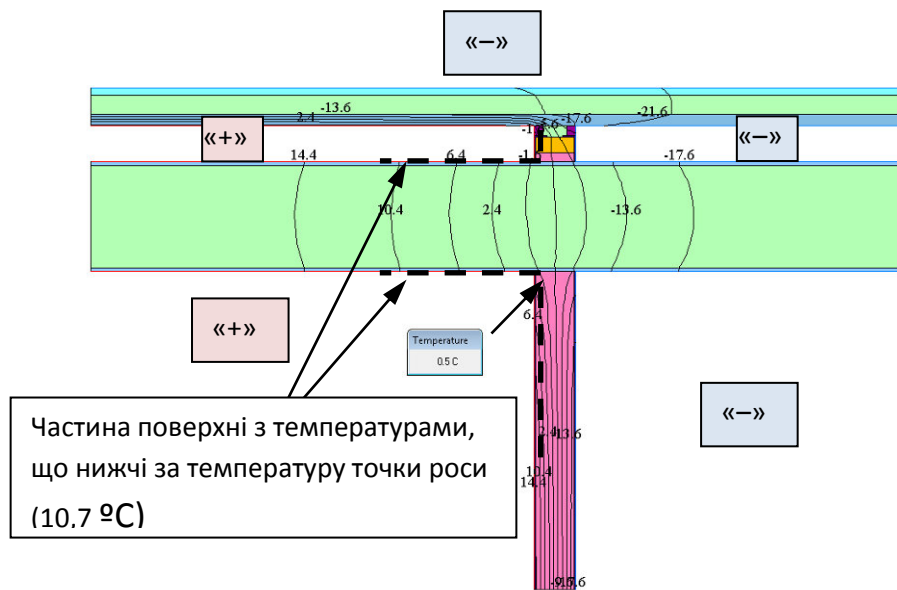


Рис. 3.15. Температурне поле двовимірної моделі ліхтаря та балки, що розташовується частково у внутрішній, а частково у зовнішній частині будівлі

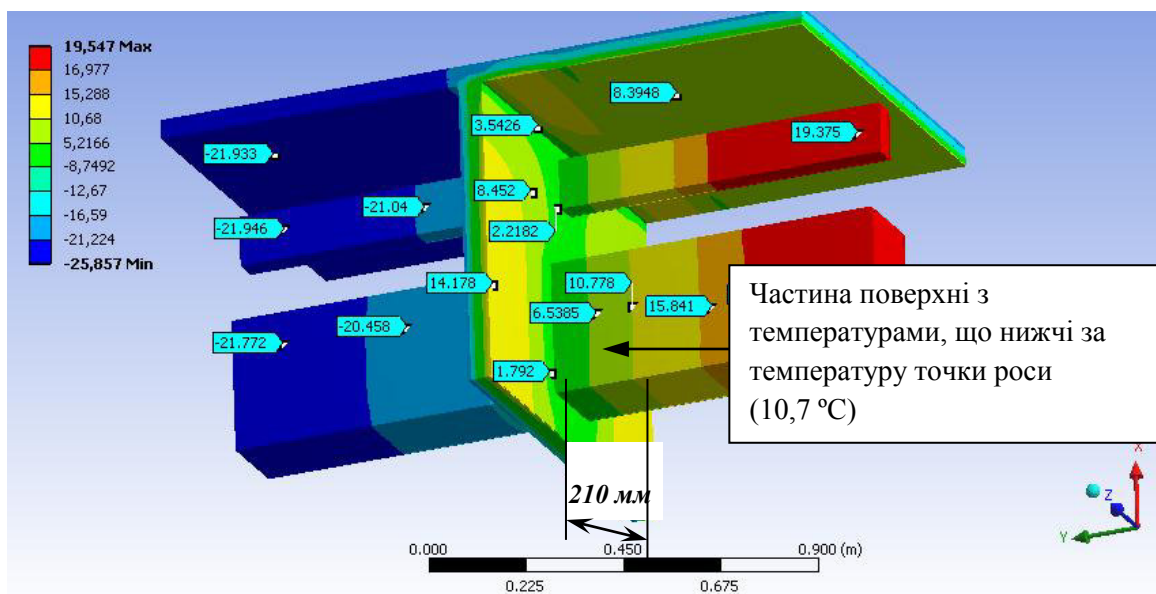


Рис. 3.16. Температурне поле тривимірної моделі ліхтаря та балки, що розташовується частково у внутрішній та зовнішній частині будівлі

Розрахунки за тривимірною моделлю дозволили визначити точні розміри ділянок конструкції з температурами  $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що значно нижчі за температуру точки роси і є недопустимим для нормального функціонування

огороджувальних конструкцій. Температурні відмови можуть призвести до випадіння конденсату, виникнення наморозі, зниження міцнісних характеристик конструкцій та порушення санітарно-гігієнічних норм приміщень. Для їх попередження запропоновано конструктивне рішення, яке підтвержене результатами моделювання і наведене на рис. 3.17.

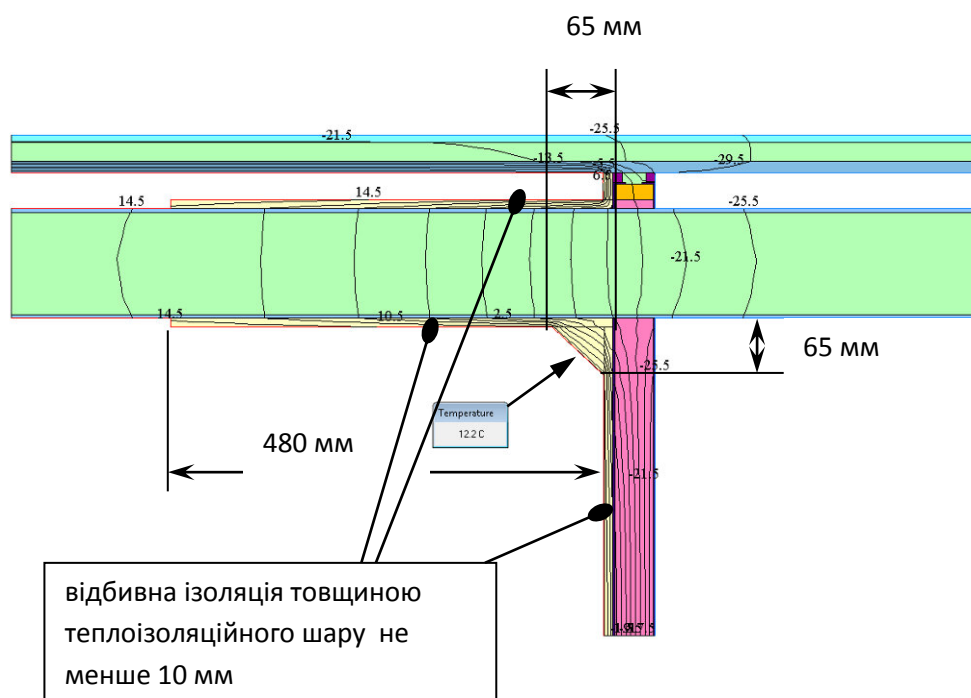


Рис. 3.17. Температурне поле тримірної моделі ліхтаря та балки з додатковим утепленням внутрішньої поверхні при зовнішній температурі  $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$

### 3.5. Дослідження закономірностей формування теплотехнічних показників склопакетів віконних та фасадних конструкцій

В розділі досліджувався вплив основних теплофізичних параметрів (див. розд.1.2, 1.4) – газового наповнення склопакетів, ступеню чорноти, температури газового прошарку на теплоізоляційні властивості конструкцій. Аналіз проводився на підставі прийнятої розрахункової моделі (див. розд. 2.2), яка реалізована у програмній оболонці WINDOW. На рис. 3.24 наведені

залежності опору теплопередачі склопакетів при заповненні їх камер різними газами та при зміні товщини газового прошарку.

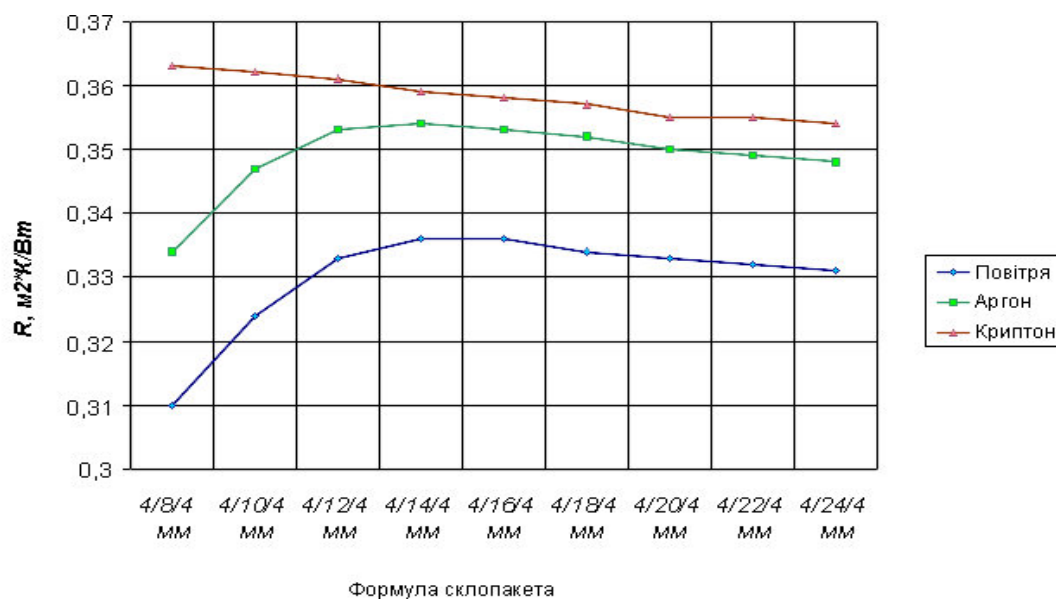


Рис. 3.18. Залежність опору теплопередачі склопакетів в центральній зоні від складу газового середовища та товщини газового прошарку однокамерного склопакета

Найбільші теплоізоляційні властивості мають склопакети при заповненні їх криптоном. Це обумовлено зниженням конвективної складової переносу теплоти для більш важкого газу. Залежність впливу молярної маси газу-наповнювача на інтенсивність теплопередачі склопакету досліджувалось експериментально (розд. 4.1).

Склад газу і товщина газового прошарку також є важливими чинниками. Для криптону максимальний ефект існує при товщині прошарку 7-8 мм і із збільшенням його товщини опір теплопередачі зменшується. При заповненні прошарку аргонем та повітрям виявлені відповідні оптимальні зони – для аргону оптимальна товщина заповнення дорівнює 12-14 мм, для повітря – 14-16 мм. Подальше збільшення товщини призводить до зниження термічного опору газового прошарку.

Таким чином, при застосуванні криптону як заповнювача товщина прошарку однокамерного склопакета не повинна перевищувати 8 мм, аргону – в межах 12-14 мм, а повітря – 14-16 мм.

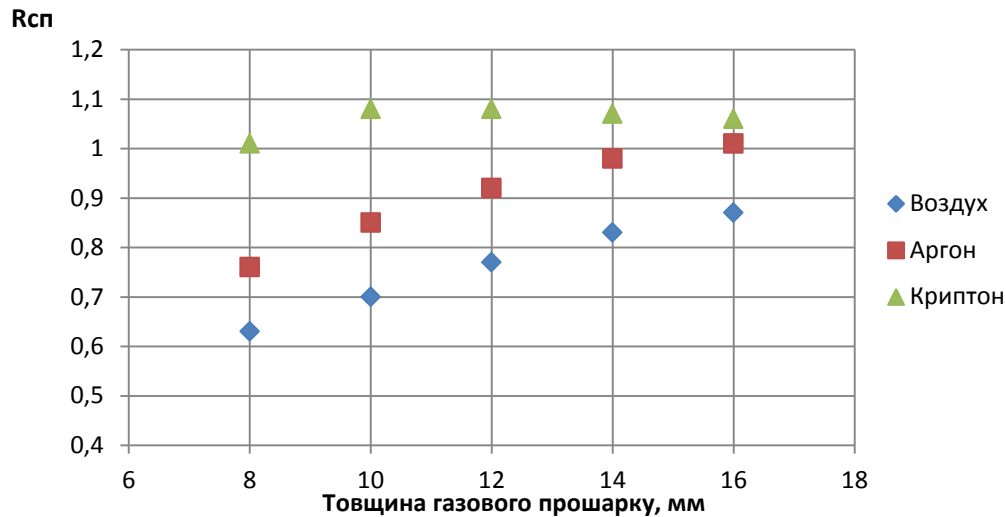
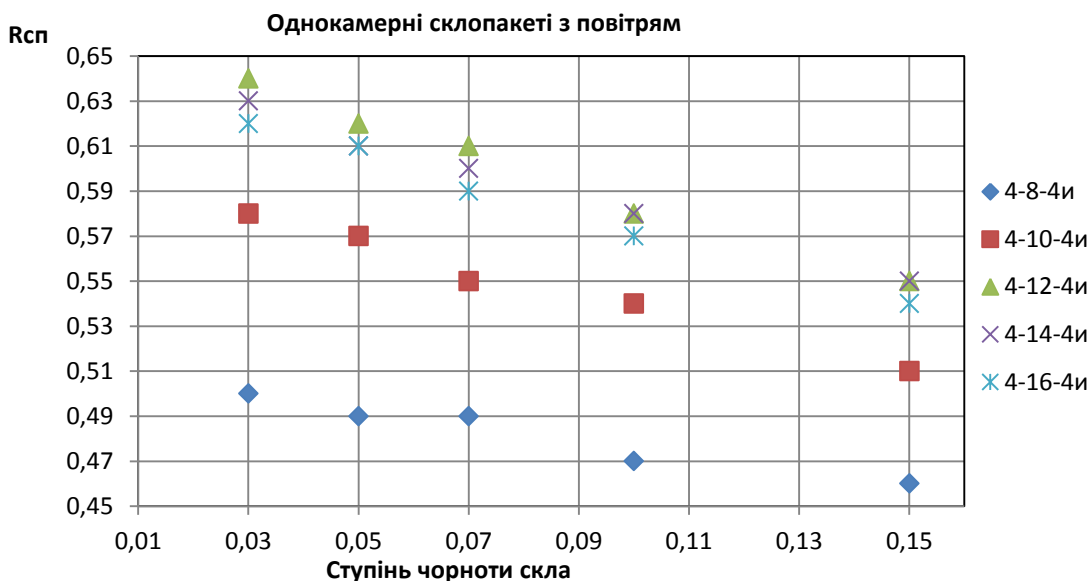
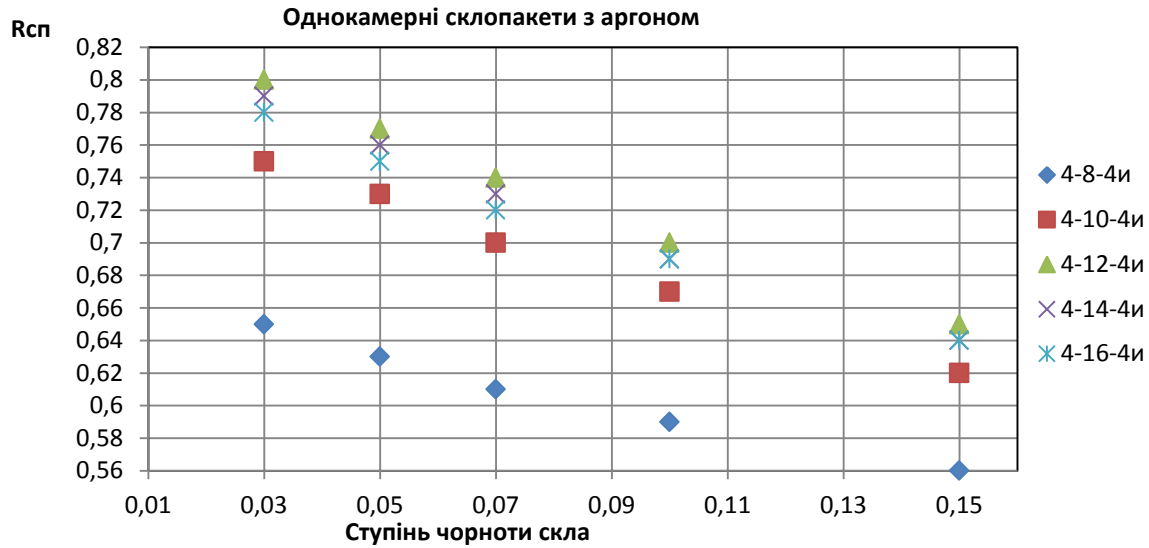


Рис. 3.19. Залежність опору теплопередачі склопакетів в центральній зоні від складу газового середовища та товщини газового прошарку двохкамерного склопакета

Для двохкамерних склопакетів (рис. 3.19) оптимальна товщина газового прошарку між шарами скла є 16 мм для повітря й аргону та 10-12 мм - для криптону.

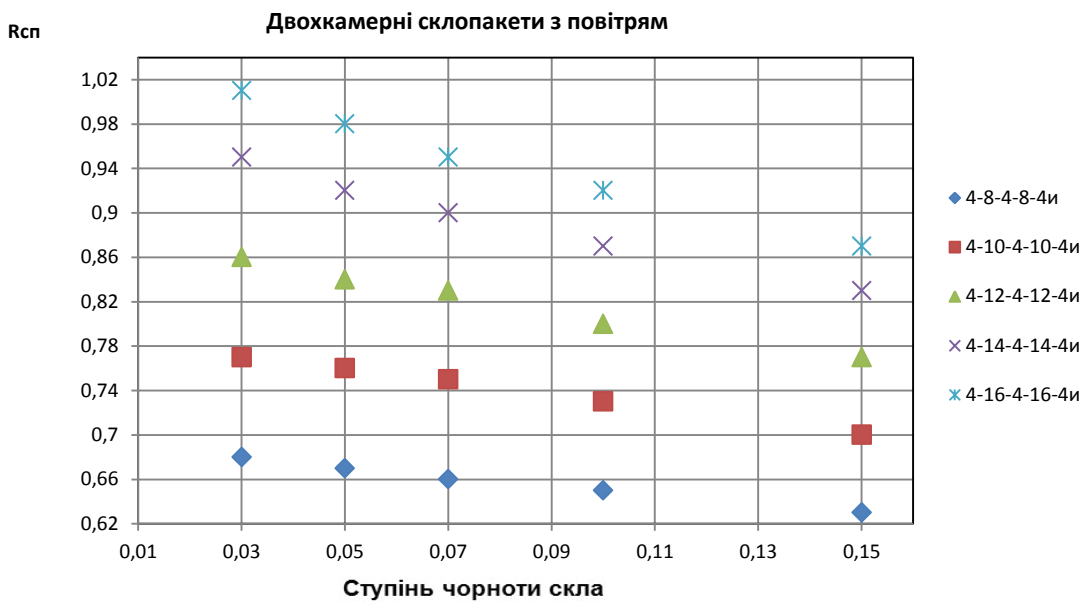
Вплив ступеня чорноти скла на термічний опір склопакета досліджувався в залежності від розміщення спеціального покриття (див. розд. 1.2) на поверхні скла та газового наповнення міжскляного проміжку.



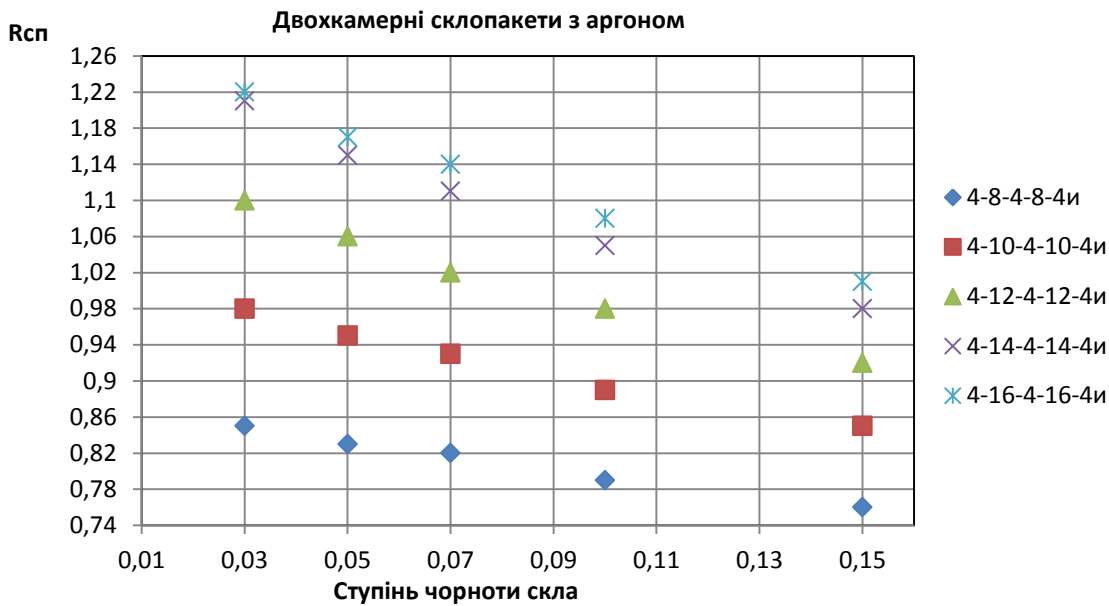


б

Рис. 3.20. Залежність опору теплопередачі склопакетів в центральній зоні від ступеню чорноти скла та товщини газового прошарку однокамерного склопакета для: а – склопакета з повітрям; б – склопакета з аргоном



а



б

Рис. 3.21. Залежність опору теплопередачі склопакетів в центральній зоні від ступеню чорноти скла та товщини газового прошарку двохкамерного склопакета для: а – склопакета з повітрям; б – склопакета з аргоном

Найбільш суттєвий вплив та теплотехнічні характеристики склопакетів має ступінь чорноти скла – чим менше ступінь чорноти скла та чим більше шарів енергозберігаючого скла - тим вищий опір теплопередачі склопакета (рис. 3.19-3.21). Таким чином з точки зору енергетичних характеристик, найбільш ефективними є склопакети з заповненням газом товщиною прошарку 16 мм та ступеню чорноти скла 0,03.

### 3.6. Вплив температури газового середовища і перепаду температур на теплотехнічні характеристики склопакетів

В даному розділі виконане порівняння з європейськими нормативними документами [147,148] отриманих вище результатів і аналіз можливості безперечного застосування наведених в них методів для кліматичних умов України.

Стандарт [149] встановлює можливість розрахунковим методом визначити значення коефіцієнтів теплопередачі  $U_g$ , Вт/(м<sup>2</sup>К), для склопакетів в



залежності від ступеню чорноти (типу низькоемісійного покриття), кількості камер в склопакеті, відстані між шарами скла і характеристик газу, що заповнює міжскляний проміжок.

Коефіцієнт емісії  $\epsilon$  в натурних або лабораторних умовах визначається за допомогою спектрофотометра. Документом [150] передбачено визначення коефіцієнта емісії, згідно з національним додатком до калориметричних методів. Однак, даний метод поки не набув широкого поширення як метод підтвердження коефіцієнта емісії тому доцільно введення європейського стандарту [151].

Однак, кліматичні умови в західноєвропейських країнах і нашої країни не є подібними, що призвело свого часу до відмінностей в методиках визначення теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій. Так, в Україні, як і в Білорусі та Росії, кліматичні випробування огорожувальних конструкцій проводять при температурах зовнішнього повітря, відповідно температури найбільш холодної п'ятиденки для даного регіону. За європейським стандартом [152] визначення теплотехнічних характеристик вікон проводиться калориметричним методом «гарячого ящика» при різниці температур  $(20 \pm 2)$  К [152].

Однак, незважаючи на єдине розуміння трьох складових процесу теплопередачі - через склопакет, стик склопакета з непрозорою частиною і саму непрозору частину вікна, в Україні багато років ведеться дискусія про можливість прямого перерахунку показників  $U_g$  в опір теплопередачі склопакета  $R_\Sigma$  для подальшого визначення приведенного опору теплопередачі  $R_{пр}$  віконного блоку.

Твердження фахівців [153] базується на тому, що прийнятий теоретично і визначений експериментально приведений опір теплопередачі стосується окремого випадку, коли температура газу в склопакеті становить  $t_m = 10$  °С, а зовнішнє повітря має температуру  $t_3 = 0$  °С. Звідси існує думка, що приведений

опір теплопередачі вікон в більш суворих умовах з температурами нижче мінус 20 °С матиме помітно менші величини.

Дійсно, відомо, що коефіцієнт конвективної тепловіддачі залежить від різниці температур, а коефіцієнт променистої тепловіддачі залежить від абсолютних значень температур [69]. В деяких джерелах [7] роблять висновок, що вплив різниці температур  $\Delta t$  на поверхнях склопакета на показник  $R_{пр}$  неістотний і впливом цього чинника можна знехтувати.

Вивчення цього питання почнемо із з'ясування впливу перепаду температур на конвективну складову теплопередачі через склопакет. Також звернемо увагу на показник емісії скла.

Процес теплообміну описується відомим критерієм Грасгофа, який визначається за формулою:

$$Gr = \frac{9,81s^3 \cdot \Delta t \cdot \rho^2}{t_m \cdot \mu^2}, \quad (3.8)$$

де  $s$  - ширина газового прошарку,

$\Delta t$  - різниця температур поверхонь скла, які обмежують газовий прошарок,

$\rho$  - щільність газу,

$t_m$  - середня температура газового прошарку,

$\mu$  - динамічна в'язкість газу.

Потім, враховуючи критерій Прандтля  $Pr$ , за формулою  $Nu = 0.035 (Gr \cdot Pr)^{0.38}$  визначається конвективна складова теплообміну.

Розрахунки, виконані згідно з EN 673 [149] показали, що для товщини прошарку менше 14 мм дійсно вплив температури газу і зовнішнього повітря незначний. Як видно з формули (3.8) при збільшенні товщини газового прошарку  $s$  і різниці температур, число Грасгофа зростає в порівнянні з товщиною прошарку 10-12 мм в два рази. А оскільки  $Nu = 0.035(Gr \cdot Pr)^{0.38}$ , то і конвективна складова теплообміну, інтенсивність якого характеризується цим критерієм подібності, також збільшується майже в 1,5 рази. Це демонструють графіки на рис 3.22.

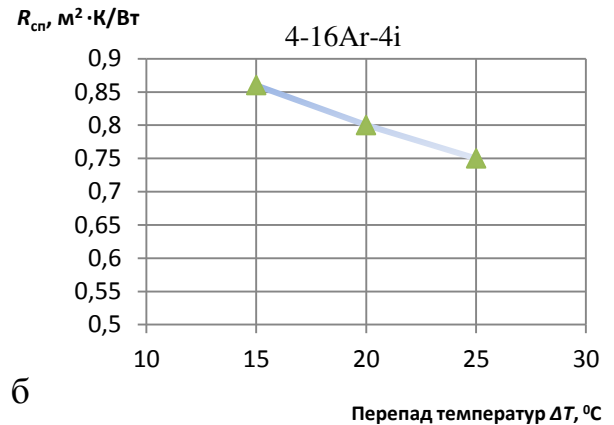
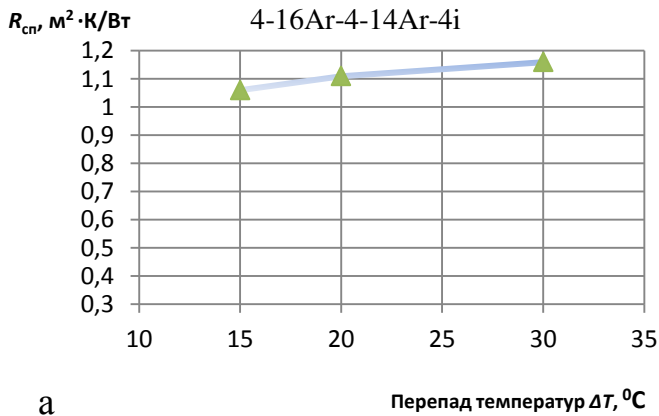
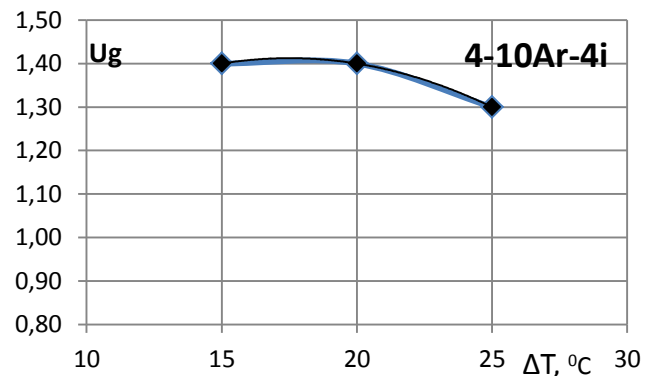
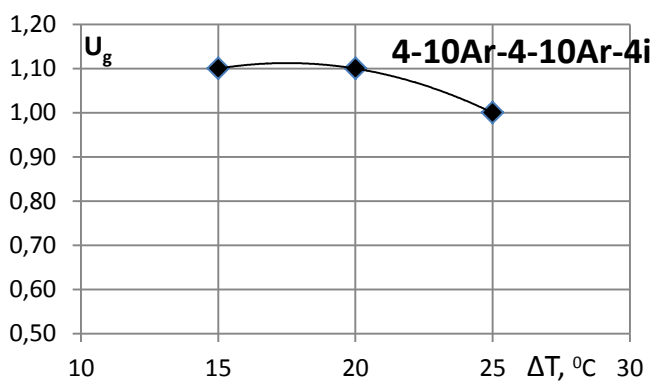


Рис. 3.22. Вплив перепаду температур  $\Delta T$  на опір теплопередачі склопакета:

а – 4-16Ar-4-16Ar-4i; б – 4-16Ar-4i

Із збільшенням перепаду температур спостерігається лінійне зростання опору теплопередачі  $R_{cp}$ . Особливо це характерно для однокамерних склопакетів (рис. 3.22 б), у яких зміна опору теплопередачі досягає 18%.

При товщині газового прошарку менше 14 мм спостерігається зворотна картина (рис. 3.23) - при зниженні температури газового прошарку і зростання перепаду температур величина  $R_{cp}$  майже не змінюється, що не суперечить висновкам, наведеним у [7].



а

б

Рис. 3.23. Вплив температури газового середовища  $T_m$  і перепаду температур  $\Delta t$  на теплотехнічні характеристики склопакета товщиною 10 мм:

а – склопакета 4-10Ar-4-10Ar-4i; б – склопакета 4-10Ar-4i

Набагато більший вплив на теплопередачу надає промениста складова теплообміну. Відомо, що близько 70% теплоти через склопакет передається саме випромінюванням [41]. Підтвердженням цьому є результати розрахунків, виконані згідно з EN 673 [149] і графічно представлені на рис. 3.24.

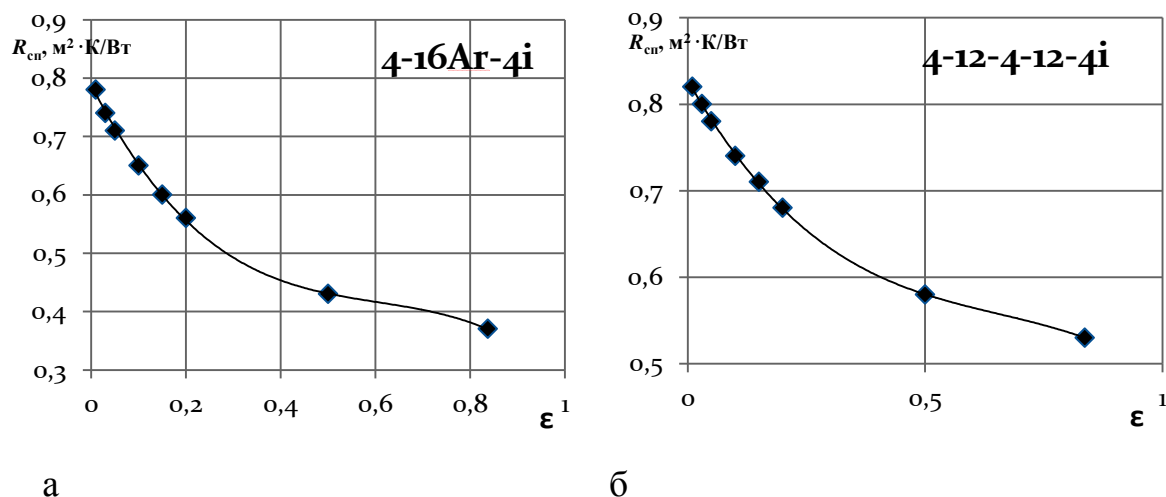


Рис. 3.24. Вплив ступеня чорноти  $\epsilon$  на теплотехнічні характеристики склопакетів згідно з EN 673:

а – однокамерний склопакет 4-16Ar-4i;

б – двокамерний склопакет 4-12Ar-4-12Ar-4i

З іншого боку можна помітити (рис. 3.25), що із зростанням ступеня чорноти поверхні одного із шарів скла, залежність  $R_{cn}$  від температури газового прошарку знижується, що пояснюється співвідношенням коефіцієнтів теплообміну випромінюванням і теплопровідності газового прошарку. При цьому, чим менше значення емісії поверхні скла, тим більше буде складова теплообміну випромінюванням, яка згідно закону Стефана-Больцмана залежить від температури, тобто температури газового середовища  $T_m$ .

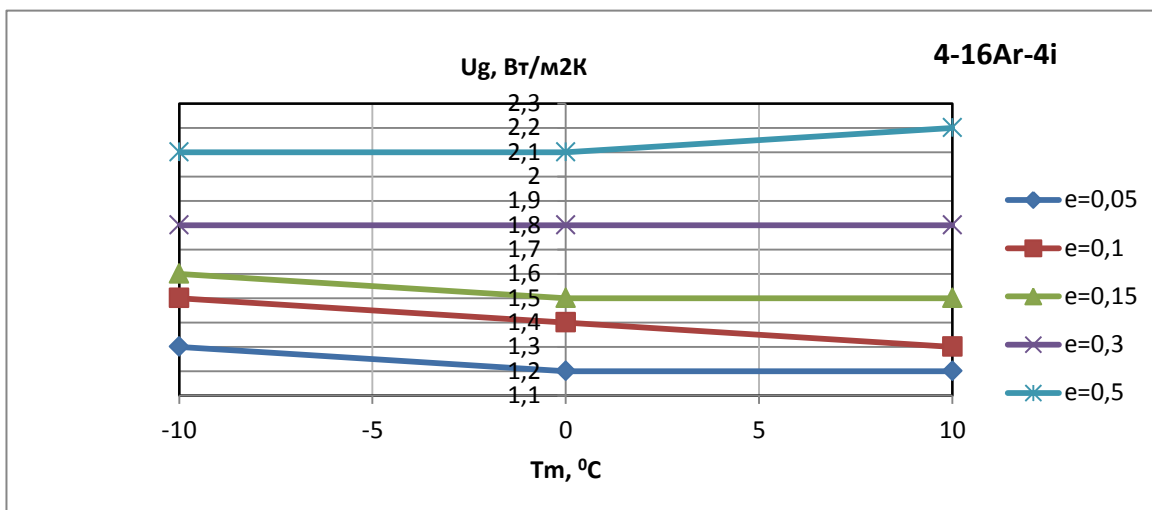


Рис. 3.25. Вплив ступеня чорноти системи і температури середовища на теплотехнічні характеристик склопакета

Із збільшенням ступеня чорноти ( $\epsilon \geq 0,2$ ) складова променистої тепловіддачі в загальній системі складного теплообміну зменшується і при однаковому газовому заповненні і відстані між шарами скла, вплив температури середовища нівелюється.

### 3.7. Висновки за розділом

1. На підставі аналізу математичних і фізичних закономірностей теплопередачі крізь світлопрозорі конструкції приведено математичний опис, що дозволяє оцінити теплову ефективність віконних конструкцій та алгоритм інженерного методу розрахунку теплопередачі через вікна та оцінити енергоефективність світлопрозорих конструкцій. Показником енергоефективності є узагальнена характеристика у вигляді інтегральних значень для характерного періоду складових теплового балансу світлопрозорої конструкції.

2. Показник енергоефективності світлопрозорої конструкції залежить від опору теплопередачі конструкції, її прозорості, герметичності та орієнтації фасаду за сторонами світу. В кліматичних умовах I-ї температурної зони України тільки при опорі теплопередачі світлопрозорої конструкцій 0,75

$\text{m}^2\text{K}/\text{Вт}$  і вище для південної орієнтації тепловий баланс є додатним - через світлопрозору конструкцію вдень у приміщення попадає більше енергії, ніж втрачається за добу через цей елемент огороження будівлі. Для західної орієнтації і, відповідно до інших орієнтацій за сторонами світу, на які попадає ще менше сонячної енергії, тепловий баланс є від'ємним і, відповідно, максимальний коефіцієнт скління фасаду є доцільним тільки для стін південної орієнтації.

3. Вплив повітропроникності на енергетичні властивості світлопрозорих конструкцій є найбільш суттєвим і навіть при високих значеннях опору теплопередачі –  $1,4 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{Вт}$  і прозорості 0,77 при опорі повітропроникності менше ніж  $0,4 \text{ m}^2\cdot\text{год}\cdot\text{Па}/\text{кг}$  тепловий баланс конструкції є від'ємним, тому для забезпечення високих показників енергоефективності світлопрозорих конструкцій необхідно застосовувати технічні рішення, які дозволяють регулювати потоки повітря крізь світлопрозорі огороження.

4. Сучасні стійко-ригельні світлопрозорі конструктивні системи, що поєднують світлопрозорі та непрозорі елементи в площині фасаду, потребують визначення формування їх теплового режиму на підставі розробленого алгоритму з моделювання двовимірних або тривимірних температурних полів. При проектуванні таких конструктивних систем обов'язковим є тепловий аналіз вузлів примикань світлопрозорих елементів, елементів обрамлення до непрозорих частин фасаду за запропонованими характерними конструктивними схемами. Детальні дослідження та аналіз їх теплових особливостей приведений у розділі. При цьому питання енергозберігаючого ефекту при застосуванні цих конструктивних рішень потребує додаткових експериментальних досліджень.

5. Найбільш ефективно наносити низькоемісійне покриття на зовнішню поверхню внутрішнього скла склопакета.

6. Значення коефіцієнта теплопередачі або опору теплопередачі склопакетів більшою мірою залежить від ступеня чорноти поверхонь скла, а також газового заповнення і відстані між шарами скла. Для однокамерних

склопакетів з відстанню між шарами скла більше 14 мм і зі склом, ступень чорноти якого менше 0,1, що експлуатуються в кліматичних умовах 1-ї температурної зони України, необхідно проводити розрахунки при перепаді температур між поверхнями скла  $25^{\circ}\text{C}$  і температурі газового середовища  $-10^{\circ}\text{C}$ . У випадках двокамерних склопакетів в будь-яких комбінаціях, а також однокамерних склопакетів (дистанція менша 14 мм і скло зі ступенем чорноти  $\varepsilon$  більше 0,1), опір теплопередачі критично не залежить від температурних моделей розрахунку і відхилення обумовленої характеристики нижче точності експериментального визначення опору теплопередачі світлопрозорих конструкцій.

7. Отримані результати аналізу залежностей теплових показників світлопрозорих конструкцій від теплофізичних параметрів можуть бути використані при подальшому нормуванні методів розрахунку та оцінки теплотехнічних характеристик світлопрозорих конструкцій з урахуванням кліматичних особливостей регіону експлуатації у нормативних документах України.

## **РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТА ТЕПЛОВИХ ПОКАЗНИКІВ СВІТЛОПРОЗОРИХ КОНСТРУКЦІЙ**

### **4.1. Залежність теплотехнічних показників склопакетів від молярної маси та температури газового заповнення міжскляного проміжку**

Аналітичні дослідження (див. розд. 3.5) показали суттєву залежність теплоізоляційних властивостей склопакетів від складу газу, що заповнює міжскляний проміжок. При застосуванні криптону зафіксовані найбільші значення опору теплопередачі склопакетів. Але криптон та ксенон є досить дорогими газами, тому необхідно знайти можливість здешевлення вартості газонаповнення при збереженні високих значень опору теплопередачі склопакетів.

Метою експериментальних досліджень було визначення залежності опору теплопередачі склопакетів від молекулярної маси газу для встановлення оптимальних сумішей газу при виготовленні склопакетів.

Дослідження проводились в кліматичних камерах (див. розд. 2.3.1) з імітацією теплових умов I-ї температурної зони України.

Розміри склопакетів при проведенні досліджень вибиралися таким чином, щоб максимально зменшити вплив крайових ефектів на фізичний показник конструкції - опір теплопередачі. Товщина склопакетів вибиралась стандартною, яка дещо відрізняється від оптимальної товщини. Наприклад, оптимальна товщина прошарку з наповненням криптоном є 7 мм, але дистанційної стандартної рамки шириною 7 мм немає, так як промисловістю випускаються рамки шириною 8 мм, тому такі склопакети і застосовувались у дослідженнях.

Результати експериментальних досліджень одно- та двокамерних склопакетів при їх заповненні різними сумішами газів наведені у табл. 4.1.



Таблиця 4.1

**Опір теплопередачі склопакетів в залежності від газонаповнення**

Кількість камер	Формула склопакету	Газовий склад				Опір теплопередачі, м <sup>2</sup> К/Вт
		Повітря	Криптон	Аргон	Ксенон	
1	2	3	4	5	6	7
1	4M1-16-4i			50	50	0,79
1	4M-16-4M1	100				0,32
1	4M1-16-4M1		100			0,38
1	4M1-16-4K	100				0,53
1	4M1-16-4K		100			0,67
1	4K-16-4K		100			0,7
1	4M1-16-4i	100				0,59
1	4M1-16-4i		100			0,78
1	4M1-16-4i		75	25		0,73
1	4M1-16-4i		50	50		0,7
1	4M1-16-4i		25	75		0,67
2	4M1-8-4K-8-4i	5	95			0,71
2	4M1-8-4M1-8-4M1	100				0,45
2	4M1-8-4M1-8-4M1		100			0,51
2	4M1-10-4M1-10-4M1	100				0,47
2	4M1-10-4M1-10-4K	100				0,59
2	4M1-10-4M1-10-4K		100			0,91
2	4M1-10-4M1-10-4K		75	25		0,88
2	4M1-10-4M1-10-4K		50	50		0,82
2	4M1-10-4M1-10-4K		25	75		0,81
2	4M1-10-4M1-10-4K				100	1,16
2	4M1-10-4M1-10-4K			50	50	0,89
2	4K-10-4M1-10-4K	100				0,73
2	4M1-10-4K-10-4K		100			1,48
2	4K-10-4M1-10-4K		100			1,54
2	4M1-10-4M1-10-4i	100				0,64
2	4M1-10-4M1-10-4i		100			1,00
2	4M1-10-4M1-10-4i		75	25		0,94
2	4M1-10-4M1-10-4i		50	50		0,90
2	4M1-10-4M1-10-4i		25	75		0,81
2	4M1-10-4M1-10-4i				100	1,34
2	4M1-10-4M1-10-4i			50	50	0,92
2	4i-10-4M1-10-4i	100				0,93

Продовження табл. 4.1

2	4i-10-4M1-10-4i		100			1,58
2	4i-10-4M1-10-4i		75	25		1,48
2	4i-10-4M1-10-4i		50	50		1,36
2	4i-10-4M1-10-4i		25	75		1,30
2	4i-10-4M1-10-4i				100	1,93
2	4i-10-4M1-10-4i			50	50	1,48

Отримані експериментальні дані показують, що склад газового наповнення суттєво впливає на теплові характеристики тільки склопакетів з низькоемісійним склом. Для склопакетів зі стандартним склом М1, ступінь чорноти поверхні яких становить 0,92, збільшення опору теплопередачі для кріптонаповнених склопакетів становить 12-18% порівняно з повітрянаповненими. Зі зменшенням ступеня чорноти поверхонь скла опір теплопередачі склопакетів з газонаповненням істотно зростає. При цьому збільшення опору теплопередачі доходить, відповідно, до 55%.

Проведені дослідження дозволяють встановити загальні закономірності впливу на теплопередачу характеру газонаповнення міжскляного проміжку склопакетів. У даних дослідженнях активно змінювалась складова конвективного теплообміну, обумовлена газовим складом і температурним режимом газу. Використання сумішей газів дозволяє встановити ступінь впливу молярної маси газу на термічні властивості виробів. Аналіз результатів випробувань був направлений на встановлення закономірностей зміни опору теплопередачі однотипних склопакетів від молярної маси газонаповнення.

За результатами досліджень встановлено аналітичні залежності опору теплопередачі склопакетів з і-склом від молярної маси, г/моль, газу в міжскляному проміжку різної товщини, які наведені в таблиці 4.2

Таблиця 4.2

**Залежності опору теплопередачі склопакетів з і-склом від молярної маси**

Склопакет		Розрахункова формула	Номер формули	Досто- вірність
кількість камер	склад			
одна	4-16-4і	$R_0 = 0,2225 M^{0,2775}$	4.1	0,86
дві	4М1-10-4М1-10-4К	$R_0 = 0,1487 M^{0,415}$	4.2	0,96
дві	4М1-10-4М1-10-4і	$R_0 = 0,1119 M^{0,497}$	4.3	0,88

Емпіричні рівняння (4.1)-(4.3) дозволяють визначити опір теплопередачі склопакета в залежності від його формули при виборі складу газового наповнення і тим самим, в залежності від призначення конструкції, оптимізувати склад газу і, відповідно, цінові фактори склопакета.

З рівнянь (4.1)-(4.3) випливає, що зі зниженням приведенного ступеня чорноти скла підвищується вплив молярної маси газу в міжскляному проміжку на опір теплопередачі склопакетів. Таким чином, одночасне застосування низькоемісійного скла з наповненням склопакетів важкими газами дозволяють забезпечити опір теплопередачі склопакетів не тільки на рівні  $1,0 \text{ м}^2\text{К/Вт}$  і вище, а й отримати світлопрозорі конструкції з опором теплопередачі зі значеннями, які вже можна порівнювати з характеристиками непрозорих конструкцій.

Теоретичні дослідження впливу температури зовнішнього середовища на теплотехнічні показники склопакетів були підтверджені експериментальним шляхом. Експериментальні дослідження впливу температури зовнішнього середовища на теплотехнічні показники склопакетів проводилися в кліматичній камері при температурах зовнішнього повітря  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  та при  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Таблиця 4.3

**Залежність впливу температури зовнішнього повітря на опір теплопередачі склопакета, отримана експериментальним шляхом**

Температура зовнішнього повітря, °С	Перепад температур, °С	Опір склопакета $R$ , $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{Вт}$		
		16Ar-4-14Ar-4i	4-16Ar-4i	4-10-4
-22	25/30	1,03	0,71	0,29
-10	20	0,99	0,75	0,29
0	15	0,96	0,83	0,29

Було встановлено, що опір теплопередачі двокамерного склопакета 4-16Ar-4-14Ar-4i (ступінь чорноти скла 0,03–0,04) змінюється при різних температурах зовнішнього повітря в межах 7% (табл.4.3), натомість для однокамерного склопакета з товщиною міжскляного проміжку 16 мм вплив температури більш суттєвий – при температурі  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$  опір теплопередачі дорівнює  $0,71\text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{Вт}$ , тоді як при температурі зовнішнього повітря  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  – на 20% більше. Для однокамерного склопакета з відстанню між шарами скла 10 мм та заповненням їх повітрям опір теплопередачі взагалі не змінюється. Отримані експериментальні дані збігаються з результатами аналітичних розрахунків (див рис.3.22) з точністю до 12%.

Одним з результатів наведених дисертаційних досліджень було визначення впливу технологічних факторів на рівень теплотехнічних показників склопакетів.

Склопакети, що досліджувались, виготовлялись на сучасному типовому вітчизняному підприємстві, коли на робочих ділянках технологічні процеси виконуються з певними відхиленнями від встановлених правил. В результаті молекулярне сито (див.розд.1.1), призначення якого є осушення газу, при установці в склопакет вже мало певну вологість до заповнення склопакетів газом. Під час випробувань при зниженні температури у відсіку кліматичної камери до  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  і відповідному зниженні температури газу в камерах дослідного склопакета виникали процеси сорбції-десорбції у молекулярному ситі. При цьому криптон, який є за своїми фізичними властивостями активним абсорбентом, поглинав вологу із молекулярного сита і ця водяна пара при зниженні температури

десорбувала із криптону і накопичувалась у центральній частині склопакета, де були встановлені вимірювальні датчики (візуально під час випробувань в центрі склопакетів виникали райдужні плями, які росли в міру зниження температури повітря в холодному відсіку кліматичної камери). В результаті зафіксовані експериментальні характеристики теплоізоляції кріптонаповнених склопакетів були дещо вищі, ніж у повітрянаповнених: для склопакетів з формулою 4М1-16повітря (100%) -4і опір теплопередачі дорівнював  $0,62 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ , а для склопакетів з формулою 4М1-16криптон(95%)+повітря(5%)-4і всього  $0,69 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ , а для склопакетів з формулою 4М1-16криптон (95%)+повітря (5%) -4К навіть нижче –  $0,54 \text{ м}^2\cdot\text{К/Вт}$ .

Тільки після зміни технології виготовлення склопакетів були отримані результати, що наведені в таблиці 4.1. Тому для склопакетів з наповненням криптоном, ксеноном особливо важливо забезпечити технологію зберігання молекулярного сита та його заповнення у дистанційні рамки. Якщо це не виконується, то не молекулярне сито осушує газ, а газ забирає вологу із молекулярного сита і тоді вже у міжскляному проміжку знаходиться не суміш ксенон-повітря, а суміш ксенон-водяна пара, що призводить до суттєвого зниження показників склопакета.

#### **4.2. Дослідження показників довговічності газонаповнених склопакетів**

Результати експериментальних досліджень, що наведені у розд.4.1, свідчать про можливість забезпечення високих теплоізоляційних властивостей світлопрозорих конструкцій шляхом заповнення склопакетів важкими газами - ксеноном, криптоном, аргоном. Але цей висновок є актуальним тільки при умові довготривалого збереження газу у камерах склопакетів. Для визначення реальних експлуатаційних властивостей газонаповнених склопакетів були проведені дослідження довговічності експериментальної партії склопакетів, що

виготовлялись за технологію двошарової (двоконтурної) герметизації згідно [25] з розмірами у плані 0,4x0,4 м за методикою, що наведена у розд. 2.3.4.

Довговічність склопакетів встановлювалась при відсутності відмов, за які були прийняті такі стани після проведення відповідної кількості циклічних температурно-вологісних впливів:

1 - поява тріщин в шибках;

2 - погіршення стану шару герметика склопакету і, як наслідок, адсорбуючого матеріалу молекулярного сита;

3 - зміна газового складу міжскляного прошарку.

Перший показник відмови склопакетів визначається візуально. Причиною виникнення відмов цього типу є виникнення термічних напружень при спільній роботі шибок з дистанційними рамками через різні значення коефіцієнтів термічного розширення.

Другий вид відмови склопакетів оцінювався за показником «точка роси». На поверхні шибок міжскляного проміжку не повинна випадати роса або утворюватися іній при стандартних теплових впливах [25]. Причиною виникнення цього виду відмов є порушення герметичності обрамлення склопакетів і, як наслідок, підвищення вологості газового середовища, що вже не регулюється дією абсорбера молекулярного сита. Контрольні випробування проводились для кожного склопакета у початковому стані та через кожні 20 циклів кліматичних впливів.

Третій вид відмови обумовлений дифузією важких газів з міжскляного прошарку склопакетів через шари герметизації і відповідною інфільтрацією повітря. Відмовою вважається такий стан склопакета, коли склад газу змінився більше ніж на 10% після проходження циклічних випробувань і при цьому заданий склад газу становить менше 90% обсягу міжскляного прошарку. Визначення складу газу здійснювалося за вищенаведеною методикою через 30 циклів випробувань та через 60 циклів випробувань.

Результати випробувань по першим двом видам відмов наведені у табл. 4.4. У склопакетах, що досліджувались, виникнення відмов 1-го та 2-го типу не встановлено.

Таблиця 4.4

#### Результати випробувань довговічності склопакетів

Кількість циклів	Кількість склопакетів з зафіксованими відмовами		
	виникнення тріщин у склі	випадіння роси	утворення інею
20	0	0	0
40	0	0	0
60	0	0	0

Результати досліджень склопакетів за відмовою 3-го типу наведені у табл. 4.5. Отримані експериментальні дані свідчать, що при проміжній кількості циклів випробувань - 30, склад газу у міжскляному прошарку залишався практично незмінним. Через 60 циклів випробувань склад газу змінювався, але ця зміна була в допустимому діапазоні - не більше 5%, що відповідає вимогам [25].

Таблиця 4.5

#### Результати випробувань довговічності склопакетів за показником зміни газового складу

№	Формула склопакету	Кількість циклів випробувань	Газовий склад в камерах склопакета	
			початковий	після випробувань
1	2	3	4	5
1	4M1-8-4M1-8-4M1	30	50%Kr+50%Ar	50%Kr+50%Ar
2	4M1-8-4M1-8-4M1	60	100% Kr	96,2% Kr+3,8% повітря
			100% Kr	99,5% Kr+0,5% повітря
3	4M1-8-4M1-8-4M1	30	25% Kr+75% Ar	25% Kr+75% Ar
			25% Kr+75% Ar	25% Kr+75% Ar

Продовження табл.4.5

1	2	3	4	5
4	4M1-8-4M1-8-4M1	60	25% Kr+75% Ar	27% Kr+71% Ar+2% повітря
			25% Kr+75% Ar	26,1% Kr+70% Ar+3,9% повітря
5	4M1-8-4M1-8-4M1	30	90%Kr+10%Ar	90%Kr+10%Ar
6	4M1-8-4M1-8-4M1	30	95%Kr+5%Ar	95%Kr+5%Ar
7	4M1-8-4M1-8-4M1	60	50% Kr+50% Ar	48,9% Kr+46,5% Ar+4,6% повітря
			50% Kr+50% Ar	48,9% Kr+47% Ar+4,1% повітря
8	4M1-8-4M1-8-4M1	60	75% Kr+25% Ar	70% Kr+25% Ar+5% повітря
			75% Kr+25% Ar	74% Kr+25% Ar+1% повітря
9	4M1-16-4M1	60	100% Kr	96% Kr+4% повітря
10	4M1-16-4M1	60	25% Kr+75%Ar	25% Kr+72% Ar+3% повітря
11	4M1-16-4M1	60	100% Ar	90% Ar+10% повітря
12	4M1-16-4M1	60	75% Kr+25% Ar	74% Kr+23% Ar+3% повітря
13	4M1-16-4M1	60	50% Kr+50% Ar	48,9% Kr+45,6% Ar+5,5% повітря
14	4M1-16-4M1	60	95% Kr+5% Ar	95% Kr+5% Ar
15	4M1-16-4M1	60	90% Kr+10% Ar	88% Kr+7,6% Ar+4,4% повітря
16	4M1-16-4M1	60	100% Kr	92% Kr+8% повітря
17	4M1-16-4M1	60	50% Kr+50% Ar	42% Kr+50% Ar+8% повітря

Тільки в двох склопакетах - № 16 та №17, які були виготовлені окремо від дослідної партії, кількість повітря, яке заміщало важку газову суміш, перевищило допустиме значення, що підкреслює вплив технологічних факторів на експлуатаційні якості елементів конструкцій, що розглядаються.

За результатами експериментальних досліджень можна констатувати, що при двоконтурній герметизації склопакетів з використанням якісних матеріалів, що відповідають вимогам [25], склад та кількість газу у міжскляному прошарку зберігається через 60 циклів кліматичних впливів. Підкреслимо, що склопакети



піддавалися досить жорстким кліматичним діям, включаючи повне їх замочування рідиною і об'ємне опромінення ультрафіолетом (у складі світлопрозорих конструкцій склопакети не підпадають під об'ємний вплив вологи, а торці склопакетів, де знаходиться герметизуючий контур, у конструкціях захищені від прямого попадання ультрафіолетового випромінювання).

Таким чином, експериментально доведена надійність газонаповнених склопакетів при якісному виконанні герметизації їх контуру.

### **4.3. Результати експериментальних досліджень теплового стану конструкцій світлопрозорих фасадів**

Аналітичні дослідження теплового стану конструкцій світлопрозорих фасадів на основі стійко-ригельних систем (див. розд. 3.4) свідчать, що в залежності від особливостей конструктивного з'єднання прозорих та непрозорих елементів системи тепловий режим стійок та ригелів суттєво змінюється і при недостатньому урахуванні цих особливостей призводить до стану теплових відмов огорожувальних конструкцій. Для перевірки закономірностей формування теплового режиму комбінованих світлопрозорих фасадних систем проведені експериментальні дослідження в натурних і лабораторних умовах. Об'єкти досліджень наведені у п.2.1 дисертації (див. рис. 2.1).

Температурне поле внутрішньої поверхні стіни дослідного об'єкта наведено на рис. 4.3. Якщо температура на внутрішній поверхні стійок у рядовому їх виконанні (конструктивний вузол типу 1 згідно класифікації, що наведена у розд.3.4 ) має достатньо високі значення – від 12,5 °С до 15,6 °С, то при примиканні тих же стійок до непрозорих елементів фасаду (вузли типу 2-4) температура їх внутрішньої поверхні знижується до 1,4 °С і навіть до від'ємних температур  $-(1,0\div 2,8)$  °С, що призводить до утворення інею на поверхнях конструкцій.

Подібні результати були отримані при проведенні натурних досліджень об'єкта, що наведений на рис. 2.1 а. Температурне поле стіни цього дослідного об'єкта показано на рис. 4.4 і закономірності його формування мають

аналогічний характер – стійки та ригелі у рядовому їх виконанні – конструктивних вузлах типу 1, мають температури на рівні  $(11,4 \div 11,9) \text{ } ^\circ\text{C}$ , а в зонах прилягання до непрозорих частин фасаду вже на рівні  $(2,9 \div -1,6) \text{ } ^\circ\text{C}$ .

На результати натурних досліджень можуть впливати побічні фактори – технологічні, монтажні, а також температурні умови вимірювань.

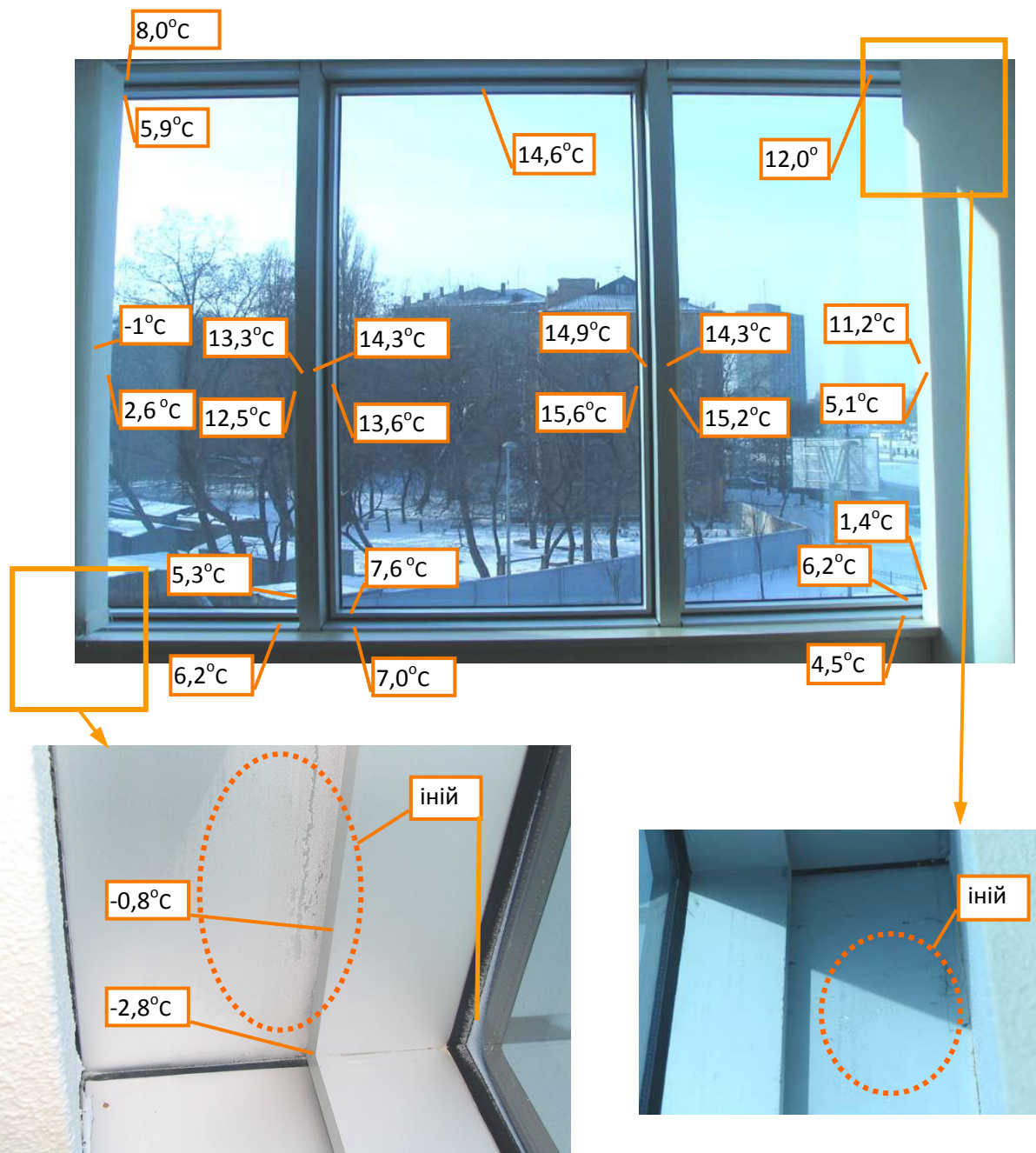


Рис. 4.3. Результати натурних досліджень теплового режиму комбінованої світлопрозорої фасадної системи об'єкта наведеного на рис. 2.1 б

Для виключення впливу монтажних факторів на формування теплового режиму конструкцій були проведені експериментальні дослідження комбінованої світлопрозорої фасадної системи, що застосовувалась на дослідному об'єкті, наведеному на рис. 2.3, у кліматичній камері. Як наведено на рис. 4.4, при тепловологісних умовах оточуючого середовища, які повністю відповідають розрахунковим згідно [12], на стійках та ригелях конструктивної системи утворюється конденсат.

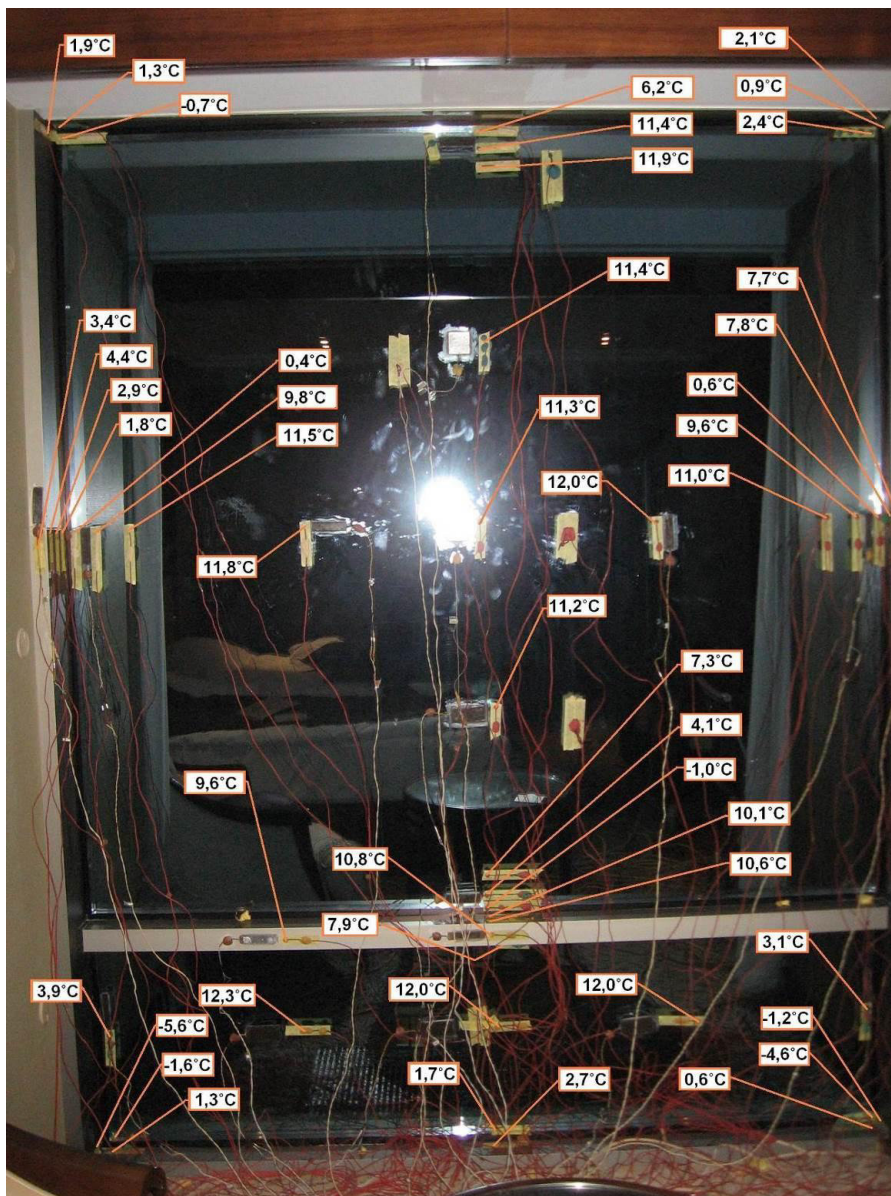
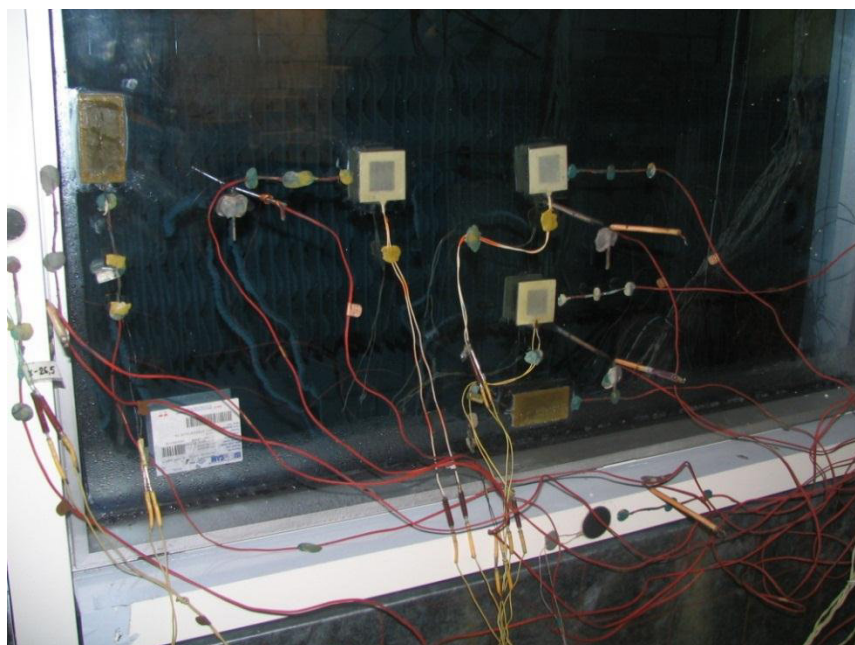
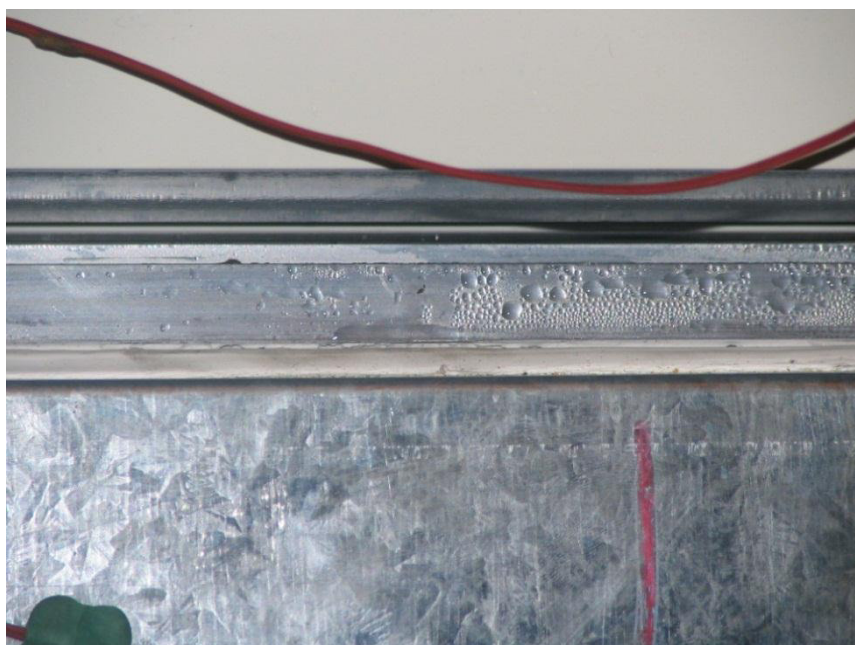


Рис. 4.4. Результати натурних досліджень теплового режиму комбінованої світлопрозорої фасадної системи об'єкту, наведеного на рис. 2.1 а

Отримані результати збігаються з розрахунковими з точністю 10-12% і свідчать про закономірність формування теплового режиму конструкцій комбінованих світлопрозорих фасадів в залежності від типів конструктивних вузлів.



а



б

Рис. 4.5 – Вид дослідної конструкції комбінованого світлопрозорого фасаду: а - під час випробувань; б - утворення конденсату на внутрішній поверхні

#### **4.4. Експериментальні дослідження теплотехнічних показників світлопрозорих огорожувальних конструкцій з вентиляційними провітрювачами**

Фактор повітропроникності сучасних світлопрозорих конструкцій займає особливе місце при оцінюванні експлуатаційних якостей як конструкцій, так і будівлі в цілому. В розд. 1.3 розкритий вплив повітропроникності світлопрозорих огорожувальних конструкцій на їх теплові характеристики. Результати аналітичних досліджень цього впливу, що наведені у розд. 3.3, свідчать про необхідність максимального зниження інфільтраційних потоків крізь світлопрозорі огороження. За цими результатами можна констатувати, що повітропроникність конструкцій є суто енергетичною характеристикою внаслідок її впливу на загальні тепловтрати будівлі при забезпеченні необхідного теплового режиму у приміщеннях.

З іншого боку повітропроникність світлопрозорих конструкцій визначає санітарно-гігієнічні умови у приміщеннях і це особливо важливо при реконструкції будівель.

Одна з важливих функцій, яку виконують віконні конструкції, полягає у провітрюванні приміщень і відповідного зниження вологості внутрішнього повітря. Сучасні вікна мають коефіцієнт повітропроникності швів менше  $0,1 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{м})$  [154-157]. З одного боку це дозволяє значно скоротити тепловтрати на підогрів повітря, що інфільтрується, з іншого боку самовентиляція за рахунок герметичності вікон суттєво зменшена і, відповідно, знижений повітрообмін приміщень.

На рис. 4.6 наведені результати візуального дослідження, що є типовими прикладами негативного тепловологісного режиму стінових огорожувальних конструкцій після заміни традиційних вікон з дерев'яними рамами на сучасні ПВХ вікна зі склопакетами, що зафіксовані під час проведення натурних експериментальних досліджень житлових будівель. Незважаючи на те, що нові

вікна мають опір теплопередачі майже вдвічі більший ніж старі, тепловологісний режим є незадовільним і економічні витрати на їх заміну не тільки не привели до поліпшення умов експлуатації, а суттєво їх погіршили.



Рис. 4.6. Негативний вплив заміни віконних конструкцій на тепловологісний режим приміщень і зовнішніх огорожень

Одним з рішень проблеми забезпечення нормального тепловологісного режиму та нормативної кратності повітрообміну приміщень при заміні віконних конструкцій є встановлення вентиляційних провітрювачів, призначених для регулюемого притоку необхідної кількості повітря ззовні у приміщення. Саме цей конструктивний підхід дозволяє без погіршення експлуатаційних властивостей стінових огорожувальних конструкцій і приміщень в цілому здійснювати енергозберігаючі заходи шляхом встановлення вікон на основі ПВХ-профілів. Такі технічні принципи широко застосовуються у країнах Європи [141,142].

Проведення експериментальної оцінки ефективності віконних конструкцій з ПВХ-профілів із застосуванням вентиляційних провітрювачів здійснювалось за показниками об'ємної витрати повітря крізь провітрювач та приведенного опору теплопередачі вікна з вмонтованим провітрювачем.

Віконний провітрювач, що досліджувався, мав довжину 420 мм і являв собою (рис. 4.7) двохелементний комплект з модифікаціями внутрішнього клапану та зовнішньої накладки.

Для досліджень було надано такі модифікації провітрювача:

№ 1 - внутрішній клапан – стандартний елемент, зовнішня накладка – стандартний елемент.

№ 2 - внутрішній клапан – елемент з акустичним вкладишем товщиною 50 мм, зовнішня накладка – стандартний елемент.

№ 3 - внутрішній клапан – елемент з акустичним вкладишем товщиною 50 мм, зовнішня накладка – елемент з акустичним вкладишем товщиною 25 мм.

№ 4 - внутрішній клапан – елемент з акустичним вкладишем товщиною 50 мм, зовнішня накладка – елемент з акустичним вкладишем товщиною 50 мм.

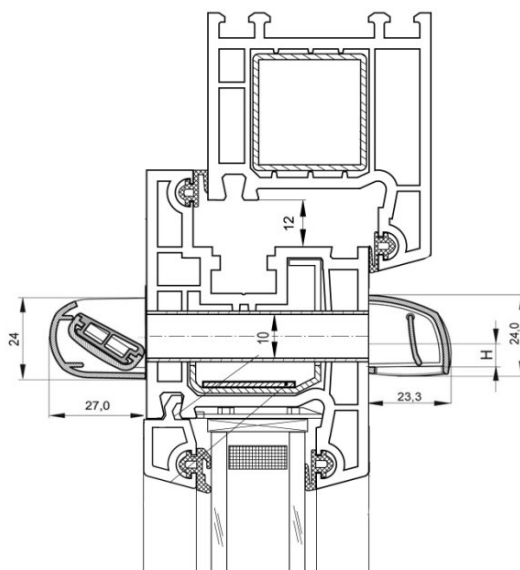


Рис. 4.7. Загальний вигляд віконного блоку з вмонтованим в нього провітрювачем (тип монтажу – «гільзування у стулці»)

Провітрювач встановлювався у віконний блок. Перед початком випробувань всі стики та щілини віконного блоку були герметизовані силіконовим герметиком. Вільне проникнення повітря здійснювалось через

спеціально влаштовані щілини в якій, безпосередньо, вставлявся провітрювач загальною площею 47 см<sup>2</sup>.

Для всіх модифікацій провітрювача випробування повітропроникності проводились у двох положеннях внутрішнього клапану: «закрито» – внутрішній клапан повністю закрито та «провітрювання» – внутрішній клапан повністю відкрито.

Показник ефективності конструкції, що досліджувалась, - об'ємна витрата повітря через провітрювач, визначався на експериментальній установці згідно з методикою [73] (див. розд. 2.3.2). Приведений опір теплопередачі віконної конструкції визначався шляхом випробувань дослідного зразка у кліматичній камері (див. розд. 2.3.1).

Залежність витрати повітря від перепаду тиску для віконної конструкції з провітрювачем у різних робочих його положеннях наведено на рис. 4.9. У положенні «відкрито» повітропроникність віконної конструкції в цілому значно перевищує нормативні вимоги з необхідної кратності повітрообміну.

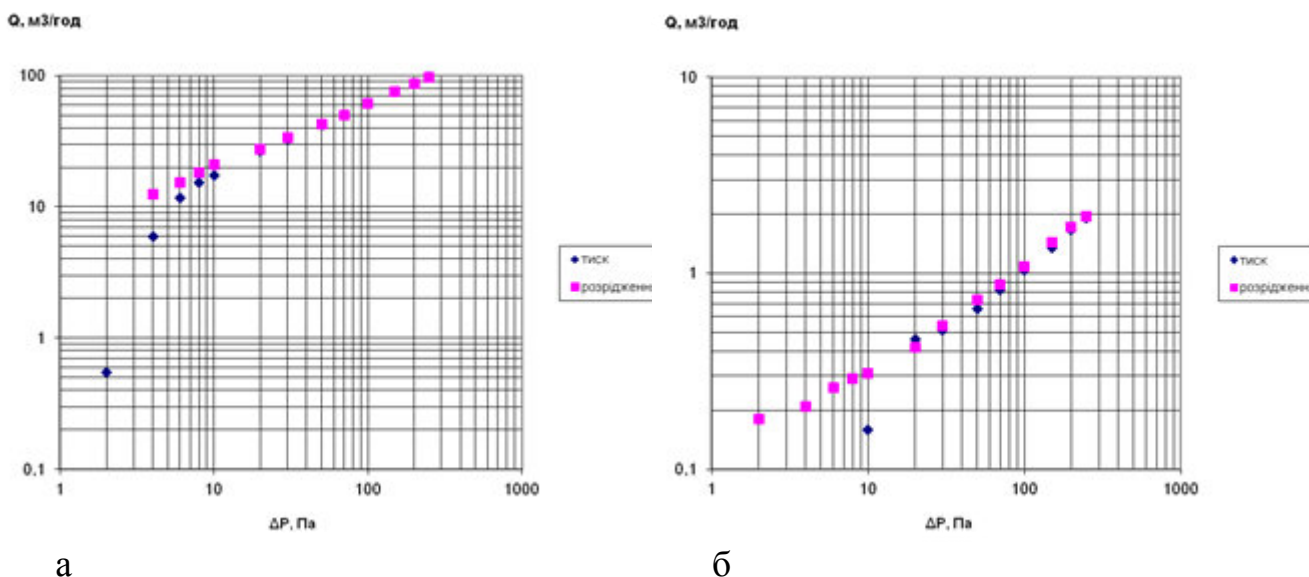


Рис. 4.8. Залежність витрати повітря від перепаду тиску для провітрювача SF у положенні: а – «відкрито»; б - «закрито»

Результати досліджень віконної конструкції з наведеними вище модифікаціями провітрювачів наведені у табл. 4.6. У закритому стані



прівітрювачів повітропроникність віконної конструкції не перевищує встановлених [153] допустимих значень, що свідчить про необхідний рівень герметизації прівітрювачів.

Випробування віконної конструкції у кліматичній камері показали, що наявність прівітрювача не призводить до значної зміни значень приведенного опору теплопередачі віконного блоку – зменшення приведенного опору теплопередачі віконного блоку з прівітрювачем у положенні «відкрито» становить 1,9 %, у положенні «закрито» приведений опір теплопередачі вікна не змінюється (табл.4.7).

Таблиця 4.6

**Результати випробувань показників повітропроникності прівітрювачів**

Номер модифікації, робочий стан прівітрювача	Об'ємна витрата повітря, м <sup>3</sup> /год, при $\Delta p$ , Па			
	10	20	30	40
№1: закрито/прівітрювання	1,4/24,2	2,1/34,3	2,7/40,5	3,4/54,2
№2: закрито/прівітрювання	0,4/21,5	0,5/30,4	0,5/36,4	0,7/48,4
№3: закрито/прівітрювання	0,2/17,8	0,6/33,6	0,9/34,3	0,9/45,5
№4: закрито/прівітрювання	0,2/17,4	0,5/26,8	0,5/32,6	0,7/42,1

Таблиця 4.7

**Результати випробувань теплотехнічних показників віконної конструкції**

Показник	Одиниця виміру	Експериментальна характеристика		
		вікно без прівітрювача	положення «закрито»	положення «прівітрювання»
Приведений опір теплопередачі	м <sup>2</sup> ·К/Вт	0,52	0,52	0,51

Отримані результати експериментальних досліджень дозволяють визначити параметри раціонального використання провітрювачів з урахуванням особливостей формування повітряного режиму у багатоповерхових будівлях. Кількість повітря, що подається у приміщення, та напрямки повітря, яке фільтрується крізь огороження, залежать від висоти будівлі, швидкості руху зовнішнього повітря тощо (див. розд.1.3). Тому необхідно проводити розрахунки вентиляційного пристрою, що розташований у віконній конструкції, при тих перепадах тисків, які характерні для даного типу будівлі. Застосування пристроїв, що розглядаються, без урахування висоти, на якій розташована віконна конструкція на будь-якому поверсі, незалежно від рози вітрів, призводить до загального погіршення мікроклімату [21].

Згідно з п.5.23 ДБН В.2.2-15 [158] кратність повітрообміну в житлових приміщеннях повинна становити  $n = 0,8$  (1/год) від загального об'єму приміщення. Наведемо розрахунок необхідної кількості провітрювачів, які монтуються на віконний блок, для забезпечення виконання цієї умови при повністю закритому вікні.

Кратність повітрообміну розраховується за формулою:

$$n = G/V, \quad (4.1)$$

де  $G$  – об'ємна витрата повітря, що проходить через квартирки, відчинені вікна чи провітрювачі при певному значенні перепаду тиску  $\Delta p$ , Па, який визначається в залежності від розташування будівлі та її висоти згідно з [12], м<sup>3</sup>/год;

$V$  – об'єм приміщення, м<sup>3</sup>.

Розглянемо типові (модельні) житлові приміщення площею 18 м<sup>2</sup> та висотою стелі 2,8 м. Об'єм повітря, який повинен проходити за 1 годину через дані приміщення, щоб воно задовольняло умовам п.5.23 ДБН В.2.2-15 [158], становить:

$$Q = 0,8 \cdot 18 \cdot 2,8 = 40,3 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Значення перепадів тиску  $\Delta p$  для кожного поверху 9-ти поверхового будинку розташованого в місті Києві, та кількість провітрювачів, які слід встановлювати на віконних блоках типових приміщень площею  $18 \text{ м}^2$ , наведені в табл. 4.8.

Таблиця 4.8

#### Необхідна кількість провітрювачів для досліджуваного приміщення

Поверх будівлі	Перепад тиску $\Delta p$ , Па	Кількість провітрювачів модифікацій			
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
1-й	50	1	1	1	1
2-й					
3-й					
4-й	30	1	2	2	2
5-й					
6-й	20	2	2	2	2
7-й					
8-й	10	2	2	3	3
9-й					

Таким чином, встановлений у віконний блок провітрювач у чотирьох конструктивних модифікаціях, що досліджувались, забезпечує необхідну кратність повітрообміну для приміщення площею  $18 \text{ м}^2$  на перших трьох поверхах типової 9-ти поверхової житлової будівлі, розташованої у місті Києві, а для вищих поверхів слід використовувати два чи три провітрювача залежно від їх модифікації.

#### 4.5 Дослідження теплової ефективності конструкцій пасивних геліоконструкцій зі світлопрозорим фасадом

У даному розділі аналізується енергетична ефективність комбінованих світлопрозорих конструкцій (див. розд.1.1), що містять елементи геліосистем. Розглядається наскільки є суттєвими теплонадходження від сонячної радіації в

холодний період року для кліматичних умов України. На підставі обробки кліматичних даних [12, 159] були отримані [9] графіки розподілу сонячної радіації, що поступає на поверхню зовнішніх стін різної орієнтації відносно сторін світу для районів України, що відносяться до 2-ї температурної зони згідно [12].

Для м. Миколаєва інтенсивність сонячної радіації для південної орієнтації стін у всі зимові місяці перевищує теплонадходження від Сонця у липні (рис. 4.9).

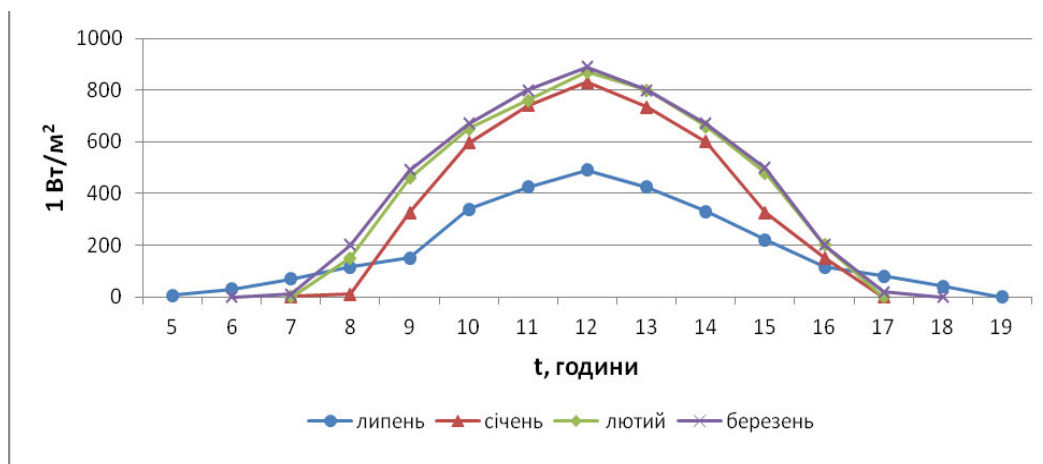


Рис. 4.9. Графік розподілу інтенсивності сонячної радіації для вертикальних поверхонь теплоізоляційної оболонки будівель південної орієнтації у м. Миколаїв

Для стін північної орієнтації інтенсивність сонячної радіації в зимові місяці не перевищує літні умови, але й ненабагато менша (рис. 4.10).

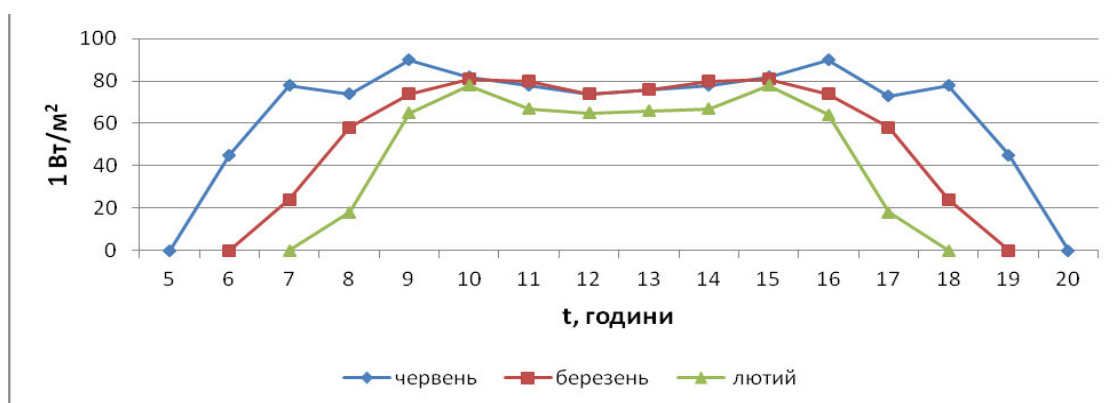


Рис. 4.10. Графік розподілу інтенсивності сонячної радіації для вертикальних поверхонь теплоізоляційної оболонки будівель північної орієнтації у м. Херсон

Дослідження теплової ефективності проводились на двох модифікаціях пасивної геліоконструкції, що наведені на рис. 4.11. Перша конструкція представляє собою типову комбіновану фасадну систему з світлопрозорим зовнішнім личкувальним шаром (рис. 4.11 а). Друга дослідна конструкція відрізняється тим, що на зовнішню поверхню непрозорої частини комбінованої світлопрозорої системи наносять теплоакumuлюючий шар [11], призначенням якого є акумуляція теплової сонячної енергії, яка проходить крізь зовнішній світлопрозорий шар.

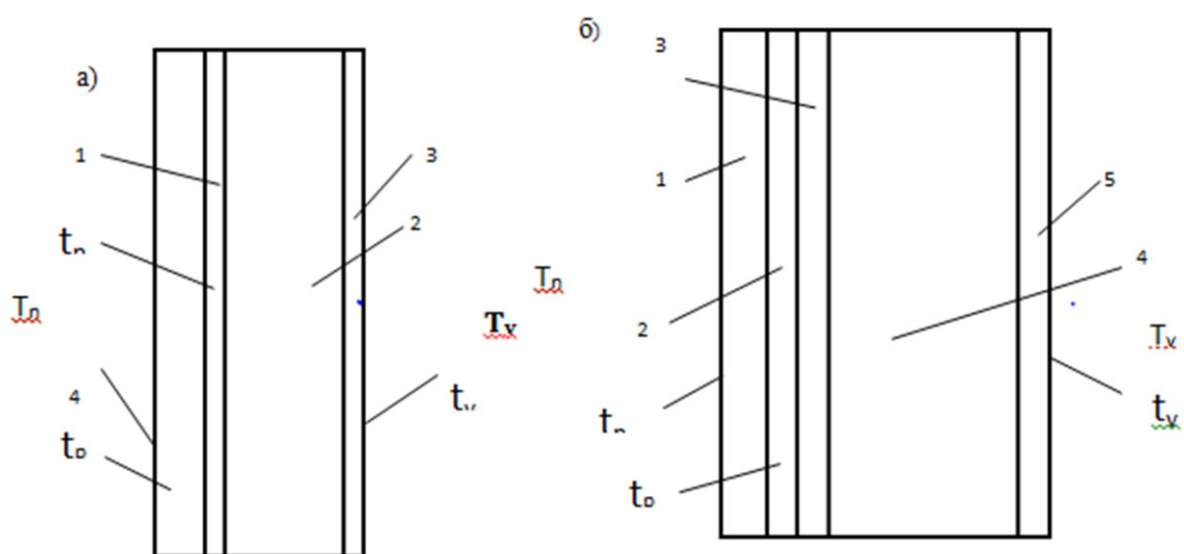


Рис. 4.11. Конструктивні рішення дослідження «геліостін»:

а - з світлопрозорим шаром; б – з теплоакumuляційним шаром

1 – зовнішня обшивка; 2 – теплоізоляційний шар; 3 – внутрішня обшивка;  
 4 – світлопрозорий шар; 5 – теплоакumuляційний шар;  $T_n$  – температура зовнішнього повітря;  $T_v$  – температура внутрішнього повітря;  $t_{pr}$  – температура повітряного прошарку;  $t_n$  – температура зовнішньої поверхні;  $t_v$  – температура внутрішньої поверхні

Дослідний зразок складався з типової трьохшарової конструкції (див. розд.1.1, 3.4, 4.3) з утеплювачем з густиною 25-30 кг/м<sup>3</sup> та листовими металевими обшивками, на яку встановлювався шар скла на відстані 5-6 см від її зовнішньої поверхні (1-й конструктивний тип). Для 2-го конструктивного типу додатково на зовнішній поверхні тришарової конструкції розміщався теплоакмуляційний шар з матеріалу, що має високе значення теплоємності та ступеню чорноти, наприклад, два шари базальтового картону товщиною по 1 мм. Подібна конструкція є показовою з оцінки ефективності пасивної геліоконструкції, оскільки шари базальтового картону мінімально збільшують термічний опір базової конструкції – на 6 % від загального термічного опору базової конструкції і зміни її теплового режиму визначаються тільки геліоефектом. Теплова інерція конструкції, що досліджується, дорівнювала 1,7, тобто встановлення стаціонарного режиму відповідає добовому періоду. Звідси випливає, що дослідна конструкція достатньо адекватно відповідає реальним конструкціям комбінованих світлопрозорих фасадів.

Розглядалися теплотехнічні параметри геліостін, конструктивні схеми яких показано на рис. 4.11.

Вплив сонячного опромінювання на тепловий режим дослідної пасивної геліоконструкції 1-го типу показано на рис. 4.13. При імітації зимового сонячного дня тепловтрати крізь конструкцію є значно меншими у порівнянні з представленими на рис. 4.12 - при максимальному сонячному випромінюванні температура зовнішньої поверхні підвищується до позитивних значень (до +1 °С), температура повітряного прошарку,  $t_{пр}$ , підвищується до мінус 2°С, інтегральна добова густина теплового потоку при цьому зменшується на 43%.

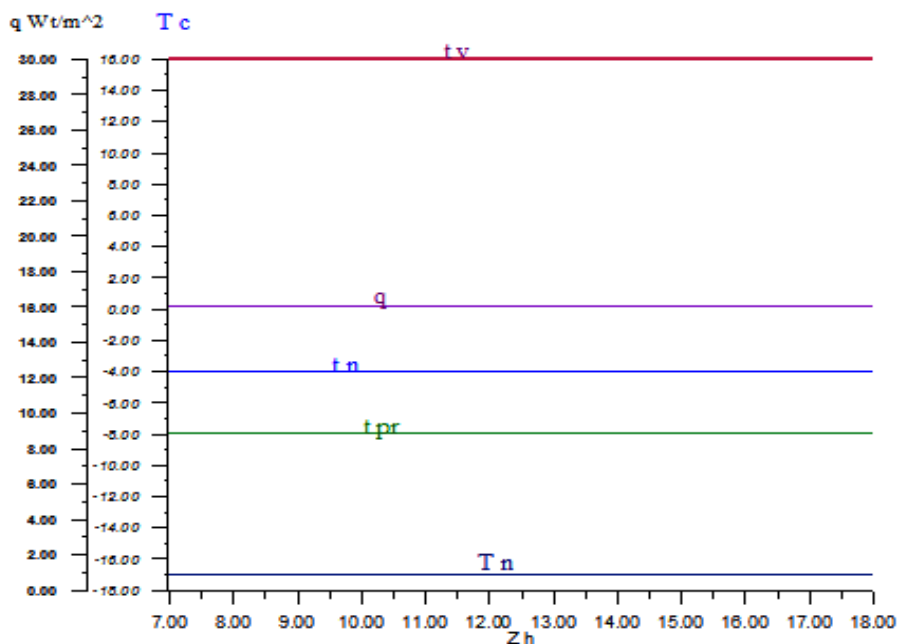


Рис. 4.12. Розподіл температур зовнішнього повітря  $T_3$ , повітря в повітряному прошарку  $t_{пр}$  геліоконструкції, зовнішньої поверхні конструкції  $t_3$ , внутрішньої поверхні  $t_v$  та теплового потоку  $q$  конструкції з «геліопасткою» в зимовий похмурий день

Ще більший енергетичний ефект спостерігається при нанесенні на зовнішній шар конструкції теплоаккумуляційного шару – пасивна геліоконструкція 2-го типу, при максимальному сонячному випромінюванні температура зовнішньої поверхні непрозорої частини конструкції вища від температури внутрішньої поверхні (рис. 4.13б).

Це призводить до різкого зниження теплового потоку через огорожувальну конструкцію. Причому навіть після припинення теплової дії імітаторів сонячного випромінювання спостерігалось подальше зниження теплового потоку через конструкцію, що пояснюється теплоаккумуляційним ефектом додаткового шару.

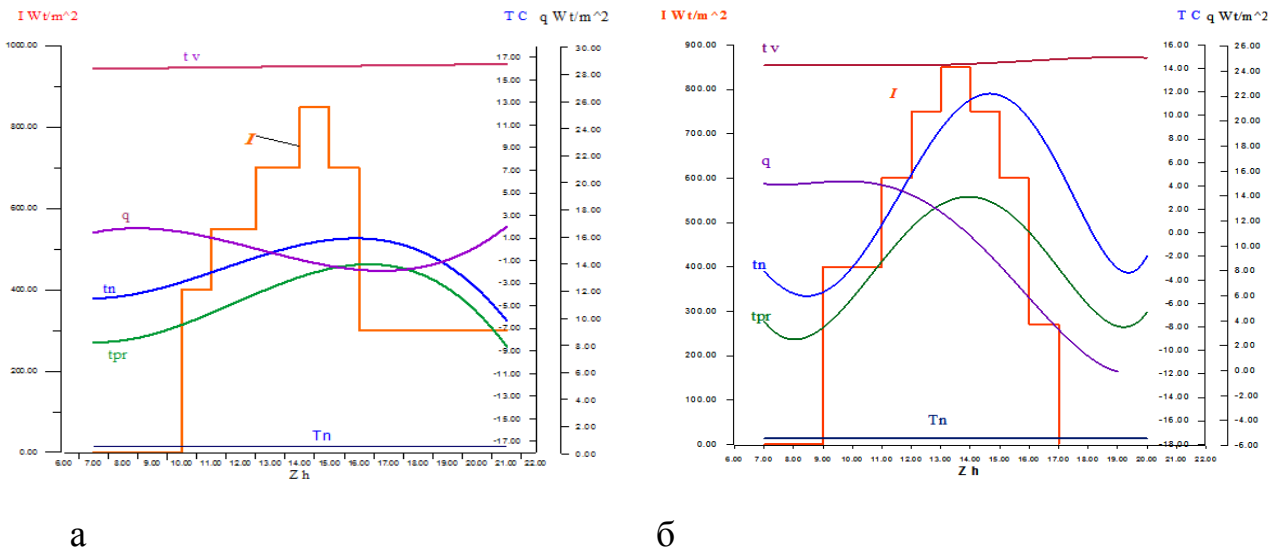


Рис. 4.13. Розподіл теплових параметрів пасивної геліоконструкції при імітації зимового сонячного дня: а – 1-го типу; б – 2-го типу

$I$  – інтенсивність сонячного випромінювання;  $t_v$  – температура внутрішньої поверхні конструкції;  $T_n$  – температура зовнішнього повітря;  $t_n$  – температура зовнішньої поверхні;  $t_{пр}$  – температура повітряного прошарку;  $q$  – густина теплового потоку

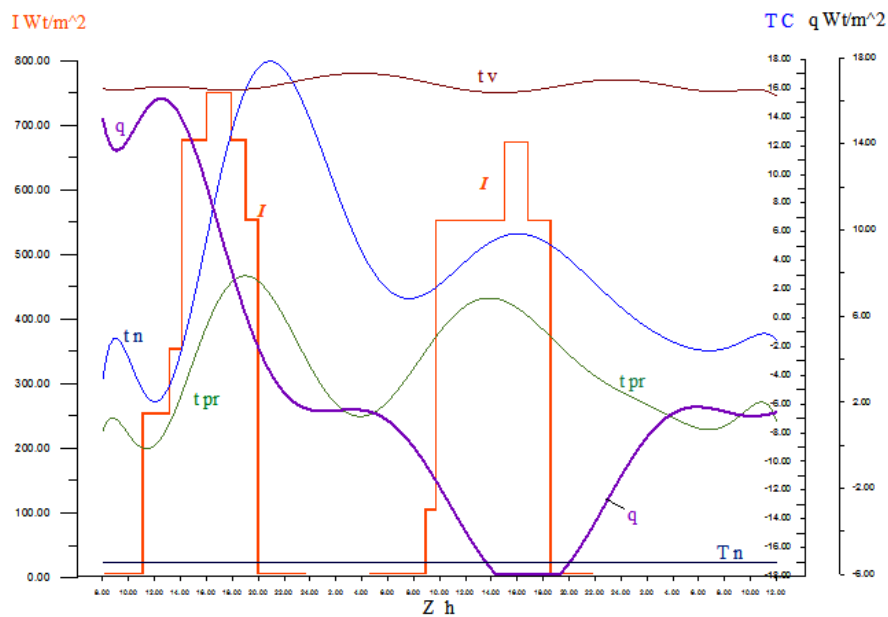


Рис. 4.14. Зміна теплових параметрів конструкції з теплоакуючим та світлопрозорим шарами при імітації умов двох зимових сонячних днів



На рис. 4.14 показано зміни теплових параметрів конструкції з теплоакumuляційним та світлопрозорим шарами при імітації двох зимових днів з незмінною температурою зовнішнього повітря мінус 17 °С та двома сонячними днями, що ідуть слідом один за одним. Акумуляція конструкцією сонячної енергії в сонячний період доби та її теплова інерція забезпечують зміну напрямку теплового потоку вже після дії сонячного випромінювання на її зовнішню поверхню. Причому, у другій сонячній добі тепловий потік направлений вже не з приміщення на ззовні, а зі сторони «вулиці» в приміщення. З цього виходить, що відбувається обігрів приміщення сонячною енергією при температурі зовнішнього повітря мінус 17 °С.

Таким чином, комбіновані світлопрозорі фасадні конструкції мають властивість пасивних геліоконструкцій і у кліматичних умовах України, особливо у 2-й температурній зоні згідно [12], їх застосування призводить до підвищення загальних показників енергоефективності будівель [160,161].

#### **4.6. Висновки за розділом**

1. Дослідження опору теплопередачі склопакетів в залежності від складу газу у їх міжскляному прошарку дозволили встановити емпіричні формули, за якими можна здійснювати підбір складу газової суміші для забезпечення необхідного значення опору теплопередачі. Експериментально доведена можливість отримання склопакетів з опором теплопередачі від 1,5 до 1,9 м<sup>2</sup>К/Вт.

2. В результаті експериментальних досліджень доведено, що газонаповнені склопакети мають необхідну довговічність при їх виготовленні з двошаровою герметизацією згідно з чинними вимогами, що дозволяє прогнозувати можливість забезпечення високих значень опору теплопередачі під час їх експлуатації у складі світлопрозорих огорожувальних конструкцій.

3. Результати експериментальних досліджень теплового стану конструкцій світлопрозорих фасадів, особливо їх комбінованих конструктивних рішень, повністю збігаються з аналітичними дослідженнями, проведеними згідно з розробленим алгоритмом розрахункової оцінки їх теплотехнічних показників.

4. Експериментальні дослідження довели справедливість висновків, що були отримані під час аналітичних досліджень з особливостей впливу температурного режиму експлуатації в залежності від кількості камер склопакетів.

5. На підставі отриманих результатів експериментальних досліджень віконних конструкцій з провітрювачами встановлено можливість забезпечення нормального газового складу приміщень згідно з санітарно-гігієнічними вимогами при застосуванні сучасних герметичних вікон з ПВХ-профілів та розробити алгоритм визначення оптимальної кількості провітрювачів, які слід встановлювати у віконних конструкціях в залежності від поверху, де вони розташовані.

6. Комбіновані світлопрозорі фасадні конструкції мають властивість пасивних геліоконструкцій і у кліматичних умовах України їх застосування призводить до підвищення загальних показників енергоефективності будівель.

## 5. ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СВІТЛОПРОЗОРИХ КОНСТРУКЦІЙ З ПІДВИЩЕНИМИ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

### 5.1. Методичні основи оцінювання економічної ефективності сучасних світлопрозорих огорожувальних конструкцій

Економічна ефективність застосування конструкцій з високим рівнем теплоізоляції визначається на підставі оцінки економічно доцільних витрат згідно положеннями методики [162]. Витрати розподіляються на інвестиційні витрати, які включають періодичну заміну компонентів світлопрозорих фасадних систем, та експлуатаційні витрати. При забезпеченні процесу термомодернізації будівлі організація різних типів витрат має вигляд, що наведений на рис. 5.1.

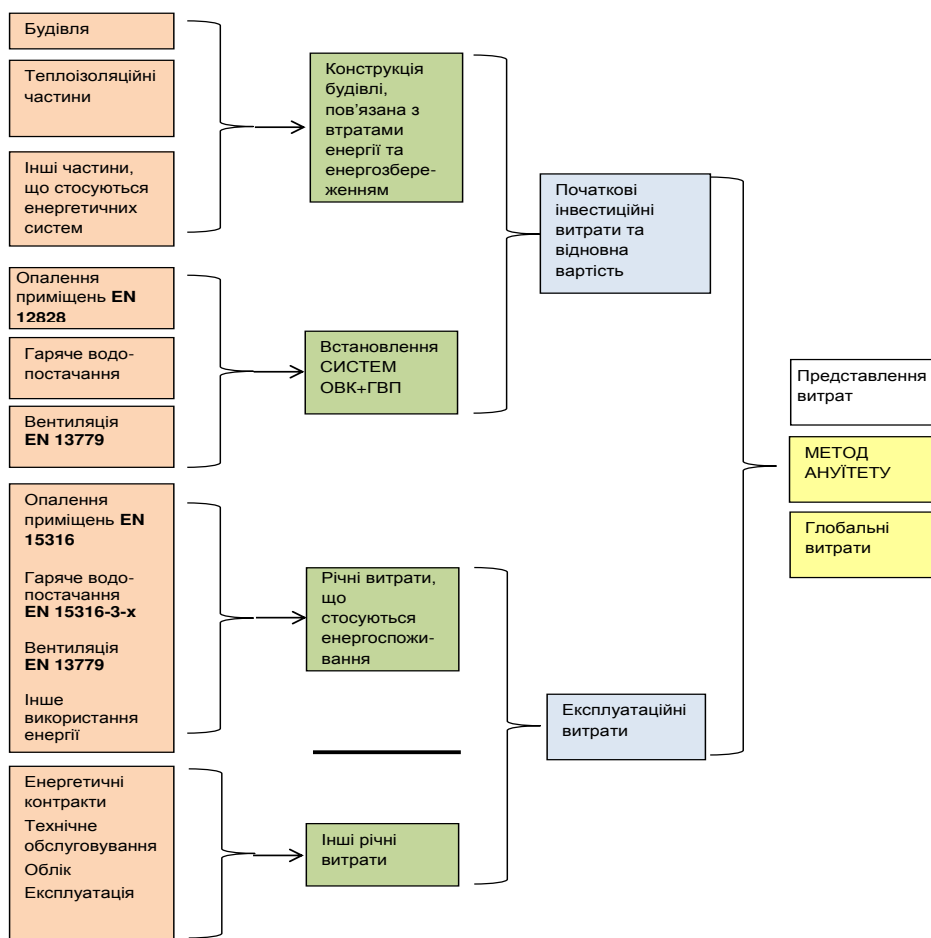


Рис. 5.1. Організація витрат процесу термомодернізації будівлі

При цьому термомодернізація будівлі розглядається як комплекс робіт, спрямованих на підвищення теплотехнічних показників огорожувальних конструкцій будівлі, показників споживання енергетичних ресурсів інженерними системами та забезпечення енергетичної ефективності будівлі на рівні не нижчому за мінімальні вимоги до енергетичної ефективності будівель, що здійснюється під час реконструкції, капітального ремонту або технічного переоснащення будівлі. При такому підході будівля представляється у вигляді єдиної енергетичної системи, що складається з теплоізоляційної оболонки і інженерного обладнання. Оцінка ефективності інженерних систем визначається згідно з положеннями європейських стандартів, що вже імплементовані в національну нормативну базу [163-166].

Світлопрозорі конструкції є елементом теплоізоляційної оболонки будівлі і розрахунок сумарних витрат, які безпосередньо пов'язані з тривалістю розрахункового періоду, виконувався за компонентним або системним підходом [162], з урахуванням початкових інвестицій  $C_I$  та (для кожного компонента або системи  $j$ ) – річних витрат для кожного року  $i$  (з посиланням на початковий рік) та кінцевої вартості. Сумарні витрати безпосередньо пов'язані з тривалістю розрахункового періоду  $\tau$ .

$$C_G(\tau) = C_I + \sum_j [ \sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) \times R_d(i)) - V_{f,\tau}(j) ], \quad (5.1)$$

де:

$C_G(\tau)$  - сумарні витрати (з посиланням на початковий рік  $\tau_0$ );

$C_I$  - початкові інвестиційні витрати;

$C_{a,i}(j)$  - річні витрати року  $i$  для компонента  $j$  (включаючи експлуатаційні витрати та періодичні витрати або відновну вартість);

$R_d(i)$  - ставка дисконтування у році  $i$ ;

$V_{f,\tau}(j)$  - кінцева вартість компонента  $j$  в кінці розрахункового періоду (з посиланням на початковий рік  $\tau_0$ ).

Розрахунки виконувалися на базі економічних для кожного компонента конструкції світлопрозорих фасадів, що досліджувались у дисертації, з

початкових інвестиційних витрат з розподіленням вартості згідно тривалості розрахункового періоду, строку служби компонентів, при цьому ануїтетні витрати не залежать від розрахункового періоду [162].

## **5.2. Економічна ефективність застосування віконних конструкцій з високим рівнем опору теплопередачі**

Результати аналітичних та експериментальних досліджень, що наведені у розділах 3, 4 дисертації, свідчать про фізичну та технічну можливість отримання світлопрозорих огорожувальних конструкцій з опором теплопередачі в кілька разів більшим, ніж віконні конструкції, які застосовувались у будівлях, що проектувались у минулому сторіччі. Враховуючи те, що таких будівель є переважна більшість в нашій країні, актуальним є питання визначення економічної доцільності заміни традиційних віконних конструкцій на сучасні світлопрозорі, які досліджувались у данній роботі. Це особливо важливо, що у схемі, яка наведена на рис. 5.1, інноваційні витрати на термомодернізацію будівлі завдяки використанню світлопрозорих конструкцій з високими теплотехнічними показниками, можна здійснювати під час поточних ремонтів і залучати до цього широке коло інвесторів.

Для проведення техніко-економічного аналізу при застосуванні сучасних архітектурно-конструктивних систем були прийняті об'єкти-представники, що порівнювались з будинками забудови 70-90-х років минулого сторіччя:

- будівля на одну родину площею 120 м<sup>2</sup>;
- будівля 5-ти поверхова житлова на 4 під'їзди;
- будівля 9-ти поверхова житлова на 4 під'їзди;
- будівля 16-ти поверхова житлова або офісна на один під'їзд.

Об'єкти-представники характеризуються за їх початковою вартістю при новому будівництві та додатковими витратами на термомодернізацію існуючих будівель. Основною експлуатаційною характеристикою об'єктів-представників є витрати на їх опалення. Тому, при проведенні аналізу доцільність застосування сучасних технічних рішень на об'єктах-представниках

визначалась за основною характеристикою – зниження енерговитрат на експлуатацію об'єкта.

Всі будівлі розглядались в умовах їх експлуатації у 1-й температурній зоні за градацією [12]. Геометричні та енергетичні показники об'єктів-представників наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

**Основні початкові об'ємно-планувальні показники та енергетичні показники об'єктів-представників, що розглядаються**

Показник	Односімейний житловий будинок	Багатоповерховий житловий будинок з кількістю поверхів		
		5	9	16
Загальна площа зовнішніх огорожень, м <sup>2</sup> , із них:	394	3312	4952	5774
- непрозорих стінових конструкцій	110	1490	2800	3700
- світлопрозорих конструкцій	40	370	700	900
Опалювальна площа будинку, м <sup>2</sup>	120	3600	6480	6910
Опалюваний об'єм будинку, м <sup>3</sup>	420	9720	17500	20730
Коефіцієнт компактності будинку	0,94	0,34	0,28	0,26
Коефіцієнт скління фасадів будинку	0,27	0,2	0,2	0,2
Кратність повітрообміну	1,0	1,0	1,0	1,0
Розрахункові питомі тепловитрати на опалення, кВт·год/м <sup>2</sup>	468,2	176,5	168,3	189,2

В табл. 5.2 приведено перелік заходів, що забезпечують зниження тепловитрат на опалення об'єктів-представників. При цьому розглядається комплекс робіт згідно з положеннями системного підходу до термомодернізації будівель (див. рис. 5.1).

Таблиця 5.2

**Перелік енергоефективних заходів для зниження енерговитрат на опалення**

п.п.	Описання заходу
1	Встановлення енергоефективного інженерного обладнання
2	Заміна віконних конструкцій
3	Зовнішнє утеплення стін до нормативного рівня
4	Рекуперація тепла витяжного повітря вентиляційної системи

В табл. 5.3 приведені розрахункові питомі тепловитрати на опалення об'єктів-представників житлових будинків різної поверховості і, відповідно, з різними значеннями коефіцієнта компактності [12,76,77,78], в залежності від конструктивного варіанту можливого впровадження енергоефективних заходів, зазначених в табл. 5.2.

Таблиця 5.3

**Розрахункові значення питомих тепловитрат на опалення об'єктів-представників,  $q_{\text{буд}}$ , та їх відповідне зниження відносно початкового стану,  $\Delta\%$** 

Пункт енерго-ефективного заходу (згідно табл. 5.2)	Односімейний житловий будинок		Багатоповерховий житловий будинок з кількістю поверхів					
			5		9		16	
	$q_{\text{буд}}$ , кВт·год/м <sup>2</sup>	$\Delta$ , %	$q_{\text{буд}}$ , кВт·год/д/м <sup>2</sup>	$\Delta$ , %	$q_{\text{буд}}$ , кВт·год/м <sup>2</sup>	$\Delta$ , %	$q_{\text{буд}}$ , кВт·год/м <sup>2</sup>	$\Delta$ , %
	Початкове значення $q_{\text{буд}}$ , кВт·год/м <sup>2</sup> (згідно табл.5.1)							
	468,2		176,5		168,3		189,2	
Тільки п.1	436,8	6,7	154,3	12,6	145,9	13,3	166,2	12,2
Тільки п.2	389,2	16,9	140,0	20,7	131,0	22,2	146,8	22,4
Тільки п.3	357,4	23,7	125,6	28,8	115,2	31,6	124,4	34,2
Тільки п.4	426,9	8,8	144,1	18,4	135,9	19,3	153,8	18,7
Тільки п.п.2, 3	278,3	40,6	89,1	49,5	77,8	53,8	82,0	56,7
Тільки п.п.1,2,3	247,5	47,1	67,1	62,0	55,6	67,0	59,2	68,7
п.п.1,2,3,4	225,8	51,8	50,0	71,7	38,5	77,1	40,7	78,5

Для будівель з низькими значеннями коефіцієнта компактності застосування світлопрозорих конструкцій дозволяє знизити витрати теплоти на опалення більш ніж на 20 %. Отримані результати є дійсними для житлових будівель зі ступенем скління фасаду 0,2 при коефіцієнті компактності  $0,26 \div 0,34$  (див. табл. 5.1).

Проведемо аналіз економічної ефективності застосування сучасних світлопрозорих конструкцій в громадських будівлях з високим коефіцієнтом скління, що досліджувалися у 3-му та 4-му розділах дисертації.

Монолітно-каркасні будинки є найбільш поширеними в сучасній практиці будівництва. Будинки на основі вказаного конструктивного принципу мають широку сферу застосування і короткі терміни зведення. Найбільшу вартість  $1 \text{ м}^2$  стінових конструкцій в будинках такого типу мають збірні системи класу Г [167] – світлопрозорі конструкції, що обумовлює їх використання в будинках громадського призначення, які мають суміщене призначення, коли в одній будівлі поєднуються житлова частина, офісна, торгова, спортивна, тощо. З урахуванням великого коефіцієнта скління фасаду таких будівель, доцільно визначити, як ступень скління впливає на економічні показники за характеристиками енергоефективності.

Розрахунки проводились для 9-ти поверхової трисекційної будівлі, що експлуатується у 1-й температурній зоні згідно з класифікацією [12]. Враховуючи те, що у 2014-2015 р. в Україні існує значна інфляція та падіння вартості національної грошової одиниці, абсолютні значення результатів розрахунків економічної та енергетичної ефективності у гривнях можуть суттєво змінюватися у часі, але приведений порівняльний аналіз є коректним навіть при подальших змінах покупної вартості гривні.

Аналіз проводився для різних сценаріїв розвитку енергетичного ринку в Україні. Перший сценарій – вартість енергоносіїв встановлюється на рівні 375 грн. за Гкал., що діяли на протязі 2014 року та початку 2015 р. для житлово-комунального сектору.



Другий сценарій – прогнозована вартість енергоносіїв для житлово-комунального сектору на рівні 1000 грн. за Гкал.

Для першого сценарія розвитку енергетичного ринку України термін окупності становить 11 років і починаючи з 12-го року можна буде отримувати економічні прибутки (рис. 5.2).

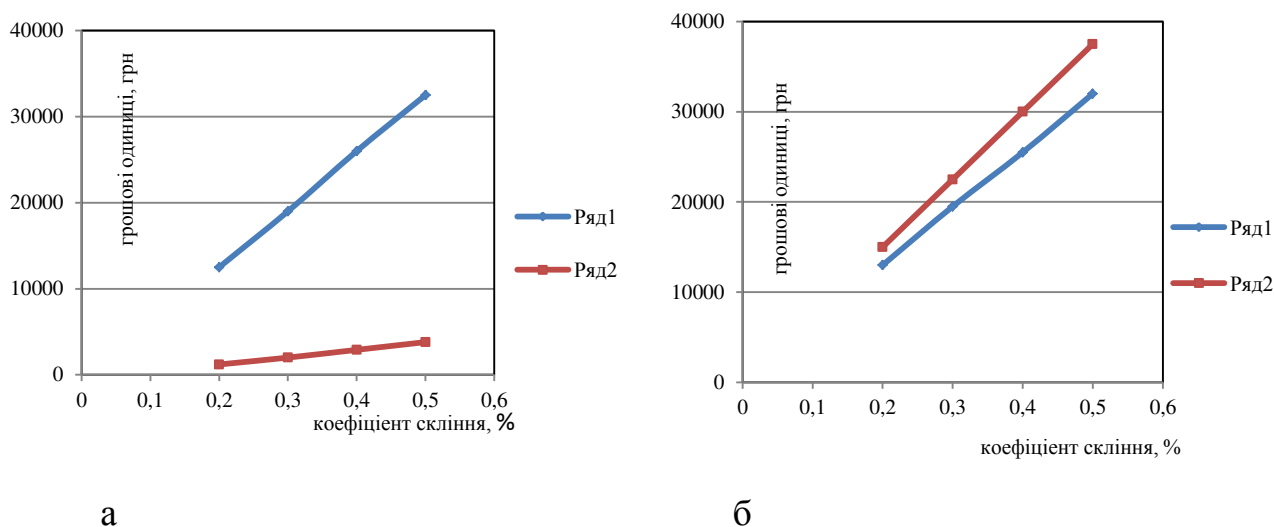


Рис. 5.2. Залежність інвестиційних витрат та економії енергії від коефіцієнта скління фасаду при застосуванні сучасних світлопрозорих конструкцій з опором теплопередачі  $0,75 \text{ м}^2\text{К/Вт}$  від коефіцієнту скління фасаду при 1 сценарії

Ряд 1 – початкові витрати, а) ряд 2 – річна економія енергії по 1-му сценарію, грн б) ряд 2 – економія енергії по 1-му сценарію за 11 років експлуатації, грн

При другому сценарії термін окупності становить вже 7 років (рис. 5.3), що є інвестиційно привабливим і дозволяє забезпечувати впровадження сучасних енергоефективних світлопрозорих огорожувальних конструкцій у широких масштабах при новому будівництві будівель громадського призначення.

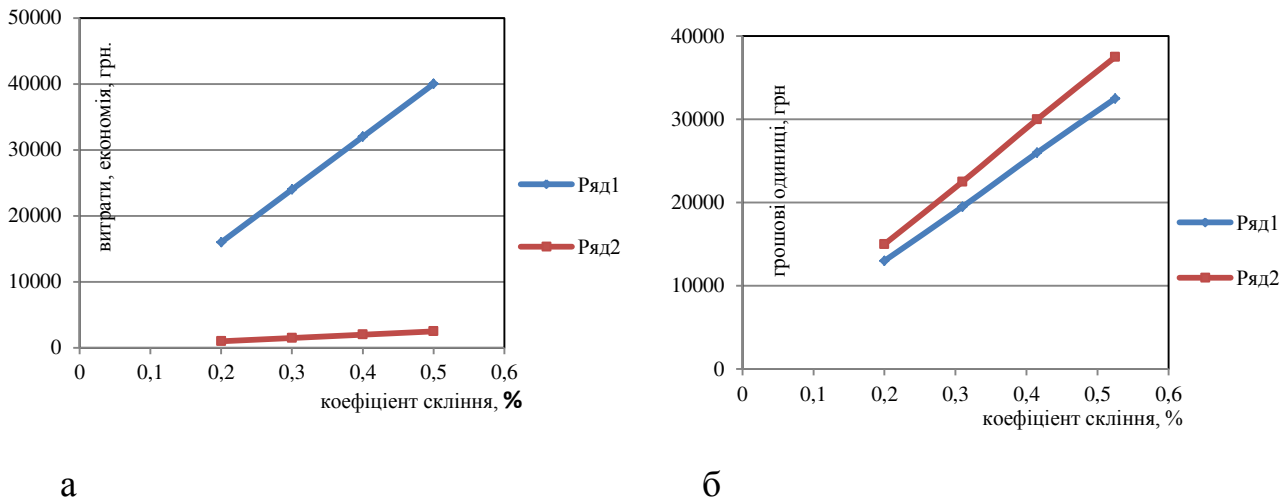


Рис. 5.3. Залежність інвестиційних витрат та економії енергії від коефіцієнту скління фасаду при застосуванні сучасних світлопрозорих конструкцій з опором теплопередачі  $0,75 \text{ м}^2\text{К/Вт}$  від коефіцієнту скління фасаду при 2 сценарії формування енергетичного ринку житлово-комунальних послуг  
Ряд 1 – початкові витрати, а) ряд 2 – річна економія енергії по 2-му сценарію, грн.; б) ряд 2 – економія енергії по 2-му сценарію за 7 років експлуатації, грн

### 5.3. Рекомендації з проектування сучасних світлопрозорих огорожувальних конструкцій

На підставі проведених досліджень у розділах 3-4 встановлені основні конструктивні рекомендації з влаштування світлопрозорих конструкцій, що направлені на забезпечення необхідного температурного режиму внутрішньої поверхні зовнішніх огорожень та нормативного повітрообміну внутрішніх приміщень, які необхідно враховувати при проектуванні нового будівництва та здійсненні термомодернізації багатоповерхових будівель.

1. В умовах 1-ї температурної зони України максимальний коефіцієнт скління фасаду є доцільним тільки для стін південної орієнтації. При цьому приведений опір теплопередачі світлопрозорих конструкцій повинен бути не менше  $0,75 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ .

2. Для забезпечення сучасних вимог з енергоефективності будівель треба застосовувати світлопрозорі конструкції, що мають високі значення опору повітропроникності – від  $1,2 \text{ м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{даПа}^{2/3} / \text{кг}$  та вище. При проектуванні світлопрозорих конструкцій треба враховувати їх розміщення по висоті багатоповерхової будівлі і визначати відповідний вплив інфільтраційних потоків на тепловий баланс в залежності від фактичних значень повітропроникності та зміни перепадів тиску повітря по висоті будівлі.

3. При проектуванні конструкцій фасадів на основі стійко-ригельних систем обов'язковим є проведення аналізу їх температурно-вологісного режиму за результатами двовимірних або тривимірних температурних полів. При цьому треба аналізувати запропоновані у дисертації типові вузли примикань світлопрозорих конструкцій до інших конструкцій теплоізоляційної оболонки будинку.

4. При проведенні оцінювання відповідності приведенного опору теплопередачі світлопрозорій конструкції, що проектується, вимогам чинних норм треба використовувати значення лінійних коефіцієнтів теплопередачі, які визначені у дисертації, в залежності від типу конструктивного вузла.

5. Для громадських будівель, що експлуатуються в кліматичних умовах 1-ї температурної зони України, теплові характеристики стійок з термоізоляційними вкладишами довжиною 24 мм відповідають необхідним вимогам тільки у рядовому їх виконанні (типовий вузол 1). Для стійок, що примикають до колон будівлі чи до стіни (типовий вузол 2), для вузлів стійки зі світлопрозорими елементами з фасадної сторони та теплоізоляційними шарами, що розміщені через повітряний прошарок з внутрішньої сторони склопакетів (типовий вузол 3), для стійок з примиканням до непрозорих теплоізоляційних елементів (типовий вузол 4) термоізоляційні вкладиші повинні мати довжину не менше 32 мм.

6. Для вузлів складної геометрії, що не підпадають у встановлені 4 типи, результати розрахунків двовимірного поля не відображають у повній мірі

реальне температурне поле, оскільки тепловий потік проходить одночасно крізь елементи огорожувальної конструкції, теплопровідність яких відрізняється між собою на п'ять порядків, наприклад, якщо потік проходить через металеві балки і композитні панелі, що розмежують теплу та холодну зони, необхідно проводити розрахунки тривимірних температурних полів.

7. При проектуванні конструктивних параметрів склопакетів слід враховувати газонаповнення і в залежності від складу газу вибирати оптимальне значення товщини газового прошарку згідно досліджень, проведених у дисертації. Найбільший енергетичний ефект мають газонаповнені склопакети з і-склом, яке встановлюється в залежності від особливостей застосування світлопрозорих конструкцій.

8. Для однокамерних склопакетів з відстанню між шарами скла більше 14 мм і зі склом, ступень чорноти якого менше 0,1, що експлуатуються в кліматичних умовах 1-ї температурної зони України, необхідно проводити розрахунки при перепаді температур між поверхнями шибок  $25^{\circ}\text{C}$  і температурі газового середовища  $-10^{\circ}\text{C}$ . У випадках двокамерних склопакетів в будь-яких комбінаціях, а також однокамерних склопакетів (дистанція менше 14 мм і склом зі ступенем чорноти  $\epsilon$  більше 0,1), опір теплопередачі критично не залежить від температурних моделей розрахунку і відхилення зумовленої характеристики нижче точності експериментального визначення опору теплопередачі світлопрозорих конструкцій.

9. На підставі експериментальних досліджень доведена можливість отримання склопакетів з опором теплопередачі від 1,5 до 1,9  $\text{m}^2\text{K/Wt}$ . Такі конструктивні рішення треба використовувати при проектуванні пасивних будівель, а також будівель з майже нульовим використанням енергії. Вид та склад газової суміші для забезпечення необхідного значення опору теплопередачі склопакетів при проектуванні світлопрозорих конструкцій вибирається на підставі отриманих у дисертації емпіричних формул.

10. При термореконструкції будівель, коли передбачається заміна світлопрозорих конструкцій при відсутності реконструкції системи вентиляції приміщень будинку для забезпечення нормального тепловологісного режиму та нормативної кратності повітрообміну приміщень, треба передбачати встановлення вентиляційних провітрювачів, які призначені для регулюємого притоку необхідної кількості повітря ззовні у приміщення. Для визначення кількості провітрювачів в залежності від їх модифікації, функціонального призначення будинку, температурної зони експлуатації та поверховості треба користуватися методикою розрахунку та експериментальними даними, що отримані у дисертації.

11. Для підвищення показників енергоефективності будівель можна застосовувати комбіновані світлопрозорі фасадні конструкції, які мають властивість пасивних геліоконструкцій, і їх застосування є ефективним у кліматичних умовах України, особливо у II-й температурній зоні.

### **5.3. Висновки за розділом**

1. Застосування сучасних світлопрозорих конструкцій з високим рівнем теплоізоляційних властивостей є економічно доцільним у сучасних громадських будівлях, в яких є відокремлені частини з різним функціональним призначенням.

2. Враховуючи об'єктивні вимоги з підвищення вартості енергії для житлово-комунального сектору і для підприємств як державної так і приватної форми власності, термін окупності застосування сучасних енергоефективних світлопрозорих конструкцій зменшується і може становити біля 7 років, що є інвестиційно привабливим для широких верст користувачів.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ РОБОТИ

У дисертації вирішено наукове завдання з підвищення енергетичних параметрів будинків шляхом раціонального вибору конструктивних рішень енергоефективних світлопрозорих огорожень громадських багатоповерхових будівель з високим коефіцієнтом скління фасаду.

Отримані в процесі дисертаційного дослідження результати, реалізовані мета і завдання дають підстави сформулювати такі висновки:

1. На основі аналітичних досліджень закономірностей тепломасопереносу у світлопрозорих огорожувальних конструкціях удосконалено інженерний метод розрахунку теплової ефективності світлопрозорих огорожувальних конструкцій та встановлено основні показники оцінки: повітропроникність конструкцій, опір теплопередачі, світлопрозорість, орієнтація фасадів за сторонами світу. Визначено доцільне значення опору теплопередачі світлопрозорих конструкцій –  $0,75 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ . Установлено, що підвищення опору повітропроникності на 100% знижує тепловтрати на 90%, і що в умовах 1-ї температурної зони України максимальний коефіцієнт скління фасаду є доцільним тільки для стін південної орієнтації.

2. У процесі аналітично-експериментальних досліджень сучасних стійко-ригельних світлопрозорих конструктивних систем, що поєднують світлопрозорі та непрозорі елементи в площині фасаду, визначено закономірності формування їх температурного режиму та розроблено технічні рішення, що дають змогу підвищувати мінімальну температуру внутрішньої поверхні непрозорої частини конструкції на 2–3 °С.

3. Уперше проведено аналітично-експериментальні дослідження впливу температур навколишнього середовища на опір теплопередачі склопакетів та з'ясовано, що для двокамерних склопакетів залежність опору теплопередачі склопакетів від температурного перепаду становить менше ніж 10% і може не враховуватися, в той час як для однокамерних

склопакетів з товщиною газового прошарку понад 14 мм опір теплопередачі змінюється на 20 % при зміні температурного перепаду на 10–15 °С, що потребує обов'язкового урахування при оцінках теплотехнічних показників світлопрозорих конструкцій в різних температурних зонах їх експлуатації.

4. Експериментальні дослідження дали змогу вивести емпіричні формули, за якими можна підбирати склад газової суміші для забезпечення необхідного значення опору теплопередачі, експериментально доведено можливість отримання склопакетів з опором теплопередачі до 1,9 м<sup>2</sup>·К/Вт, що може використовуватися при проектуванні пасивних будівель.

5. У результаті експериментальних досліджень доведено, що склад газу газонаповнених склопакетів змінюється не більше ніж на 5 % після 60 циклів кліматичних впливів, що дає змогу прогнозувати необхідну довговічність при їх виготовленні з двошаровою герметизацією та забезпечувати великі значення опору теплопередачі під час їх експлуатації у складі світлопрозорих огорожувальних конструкцій.

6. На підставі результатів, отриманих у процесі експериментальних досліджень віконних конструкцій з провітрювачами, виявлено можливість забезпечення нормативного повітрообміну приміщень згідно із санітарно-гігієнічними вимогами при застосуванні сучасних герметичних вікон з ПВХ-профілів та розраховано, що 1–3 провітрювачі, залежно від поверху, де вони розташовані, забезпечують нормативний повітрообмін приміщень  $n = 0,8$  (1/год) для типового приміщення площею 18 м<sup>2</sup>.

7. Доведено, що комбіновані світлопрозорі фасадні конструкції мають властивість пасивних геліоконструкцій і в кліматичних умовах України в сонячні дні зимових місяців у часи прямої інсоляції їх поверхневі теплові витрати близькі до нуля при температурах зовнішнього повітря до -17 °С, що приводить до підвищення загальних показників енергоефективності будівель.

8. На підставі проведених досліджень розроблені рекомендації для проектування сучасних світлопрозорих конструкцій, які дозволяють підвищувати енергетичні властивості багатоповерхових будівель.

Аналіз економічних характеристик конструктивних систем сучасних будівель та конструкцій фасадної теплоізоляції дав змогу встановити, що термін окупності світлопрозорих конструкцій з опором теплопередачі  $0,75 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  становить 7–13 років, що свідчить про інвестиційну привабливість сучасних світлопрозорих конструкцій та економічну доцільність їх застосування в сучасних багатоповерхових будівлях.



## ДОДАТОК А.



МІНІСТЕРСТВО РЕГІОНАЛЬНОГО РОЗВИТКУ, БУДІВНИЦТВА ТА  
ЖИТЛОВО-КОМУНАЛЬНОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ

**ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
„ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ  
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ”**



(ДП НДІБК)

вул. Преображенська, 5/2, м. Київ-37, 03037, тел. (044) 249-72-34, факс (044) 248-89-09

e-mail: niisk-office@ndibk.gov.ua; adm-inst@ndibk.kiev.ua Код ЄДРПОУ 02495431

### Довідка

**про використання результатів дисертаційної роботи Фаренюка Є.Г. в  
нормативних документах, що розробляються за планом Мінрегіонбуду  
України.**

Результати дисертаційної роботи здобувача Фаренюка Є.Г. «Тепловий режим світлопрозорих огорожувальних конструкцій сучасних багатоповерхових будівель» були враховані при розробці таких нормативних документів:

- Конструкції будинків та споруд. Теплова ізоляція будівель : ДБН В.2.6-31:2006. – [Чинний від 01.04.2007] . – К. : Мінбуд України, 2006. – 64 с.
- Конструкції будинків і споруд. Конструкції зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією. Вимоги до проектування, улаштування та експлуатації: ДБН В.2.6-33:2008. – [Чинний від 01.12.2008]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 43 с. – (Нац. стандарт України).
- Будинки і споруди. Метод визначення повітропроникності огорожувальних конструкцій в натурних умовах : ДСТУ Б В.2.2-19:2007. – [Чинний від 01.07.2008]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2008. – 43 с. – (Нац. стандарт України).
- Конструкції будинків і споруд. Метод визначення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій : ДСТУ Б В.2.6-101:2010. – [Чинний від

2010.20.01]. – К. : М–во регіон. розвитку та буд–ва України, 2010. – 84 с. – (Нац. стандарт України).

- Проектування. Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорту будинків при новому будівництві та реконструкції: ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007. – [Чинний від 01.07.2008]. – К. : М–во регіон. розвитку та буд–ва України, 2008. – 43 с. – (Нац. стандарт України).

- Розділ «Енергоефективність» у складі проектної документації об'єктів: ДСТУ Б А.2.2-8:2010. – [Чинний від 20.01.2010]. – К. : М–во регіон. розвитку та буд–ва України, 2010. – 47 с. – (Нац. стандарт України).

- Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель: ДСТУ Б В.2.6-189:2013. – [Чинний від 01.01.2014]. – К. : М–во регіон. розвитку та буд–ва України, 2013. – 51 с. – (Нац. стандарт України).

- Фасади навісні. Технічні умови (EN 13830:2003, IDT ): ДСТУ Б EN 13830:2014. – [Чинні від 01.10.2015]. – К. : М–во регіон. розвитку та буд–ва України, 2014. – 53 с. – (Нац. стандарт України).

Фаренюк Є.Г. є співавтором вищенаведених нормативних документів.

Заст. директора з наукової та  
нормативно-методичної роботи



к.т.н., с.н.с, Тарасюк В.Г.

## ДОДАТОК Б.



МІНІСТЕРСТВО РЕГІОНАЛЬНОГО РОЗВИТКУ,  
БУДІВНИЦТВА ТА ЖИТЛОВО-КОМУНАЛЬНОГО  
ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ

Департамент розвитку промислового будівництва та виробництва будівельних матеріалів

вул. Велика Житомирська, 9, м. Київ, 01601; (044) 590-47-39, факс (044) 590-47-37  
e-mail: ShernitsovaIP@minregion.gov.ua

від 26.08.2015 № 8/18.1-243-B на № 214-1573 від 14.08.2015

**Державне підприємство «Державний  
науково-дослідний інститут  
будівельних конструкцій»**

Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України розглянуло лист ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» від 14.08.2015 № 217-1513 стосовно надання інформації щодо використання результатів дисертаційної роботи завідувача лабораторії будівельної теплотехніки та акустики ДП НДІБК Фаренюка Є.Г. при виконанні робіт на замовлення Мінрегіону за договором від 19.10.2012 № 2398/Н-14/276-2012 та повідомляє.

Науково-дослідна робота «Дослідження сучасних теплоізоляційних систем та розробка принципових будівельно-технічних рішень термореконструкції фасадів житлових будинків 1960-1995 років забудови з метою підвищення їх енергоефективності та зниження рівня споживання енергоресурсів будівель житлового фонду» виконана Державним підприємством «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» згідно договору від 19.10.2012 № Н-14/276-2012 на підставі Наказу Мінрегіону України від 13.07.2012 № 351 «Про фінансування у 2012 році нових наукових і науково-технічних розробок в межах бюджетної програми КПКВК 2751030» та згідно доручень Кабінету Міністрів України від 16.05.2012 № 14941/39/1-12, від 29.05.2012 № 22342/0/1-12 щодо розробки єдиних критеріїв та підходів на здійснення заходів з термомодернізації, а також нормативно-правового забезпечення енергозбереження усіма категоріями споживачів та модернізації сфери теплопостачання.

Призначення наукової розробки (далі – Альбому) полягає в забезпеченні проєктувальників та посадових осіб відповідних органів виконавчої влади необхідною документацією для розробки та узгодження проєктів реконструкції будинків існуючого житлового фонду.

Основним завданням альбому є створення сукупності технічних рішень, схем і вузлів фасадної теплоізоляції стін, схем встановлення енергозберігаючих вікон, які могли б застосовуватися в проєктах термореконструкції житлового фонду України.

Технічні рішення утеплення розроблені з урахуванням різних конструктивних схем та специфіки зовнішнього огороження 5-ти, 9-ти та 16-ти поверхових житлових будинків масового будівництва 1960-1995 років.

В альбомі розглядаються конструктивні принципи технічних рішень, які слід застосовувати при термореконструкції фасадів багатоповерхових житлових будинків. В альбомі на підставі визначення температурного поля зовнішніх стін встановлено раціональне розміщення в них сучасних віконних та дверних конструкцій з ПВХ-профілей.

Основною характеристикою теплоізоляції світлопрозорих огорожувальних конструкцій (віконних та дверних блоків) є приведений опір теплопередачі, значення якого залежить від теплотехнічних показників світлопрозорої частини – склопакету, обрамлення та від співвідношення між площинами склопакету та обрамлення (коефіцієнту скління конструкції).

В альбомі наведені рекомендовані конструкції склопакетів для заповнення віконних блоків в залежності від типу ПВХ-профілю та температурних зон експлуатації. В альбомі наведені конструктивні рішення вузлів примикання вікон з ПВХ-профілів за ДСТУ Б В.2.6-23 до конструкцій зовнішніх стін.

Окремим розділом альбому є викладена методика розрахунку економічної ефективності застосування термореконструкції фасадних стін житлових будинків.

Результати науково-дослідної розробки розглянуто на засіданні секції містобудування та архітектури, будівництва об'єктів цивільного та промислового призначення, будівельних матеріалів і виробів Науково-технічної ради Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України (Протокол № 15 від 12.12.2012) та схвалено на засіданні Науково-технічної ради Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України (Рішення НТР № 218 від 13.12.2012).

Інформація про розробку Альбому доведена до потенційних замовників – обласних державних адміністрацій.

Співвиконавцем НДР «Дослідження сучасних теплоізоляційних систем та розробка принципів будівельно-технічних рішень термореконструкції фасадів житлових будинків 1960-1995 років забудови з метою підвищення їх енергоефективності та зниження рівня споживання енергоресурсів будівель житлового фонду» є завідувач лабораторії будівельної теплотехніки та акустики ДП НДІБК Фаренюк Є.Г.

Результати НДР використані при проведенні робіт з комплексної термомодернізації житлових будинків та об'єктів бюджетної сфери в містах: Київ (4 житлові будинки), Жовква Львівської області (5 житлових будинків і 1 дошкільний заклад), Тернопіль (9 житлових будинків, 1 дошкільний заклад, 1 загальноосвітня школа), Ніжин (1 житловий будинок) та Луцьк (1 житловий будинок).

Науково-дослідна робота є надзвичайно важливою у зв'язку з актуальністю вирішення проблеми енергоресурсозбереження. Застосування нових напрямів і методів будівельної теплофізики дозволило створити та впровадити у практику новітні конструктивні рішення, які відповідають найкращим закордонним аналогам. Експлуатація житлових будинків після термореконструкції фасадів призводить до зменшення споживання теплової енергії, що в свою чергу обумовлює економію паливних ресурсів.

**Заступник директора Департаменту –  
начальник відділу нормативно-методичного  
забезпечення промислової забудови**

**Н.Д. Гах**

## ДОДАТОК В.



### К.А.Н. ДЕВЕЛОПМЕНТ

01032, г. Киев, ул. Льва Толстого, 57, БЦ 101 Tower, 26 этаж  
тел./факс: +38 (044) 247-57-48/49 E-mail: office@kandevlopment.com

www.kandevlopment.com

#### ДОВІДКА

про впровадження дисертаційної роботи здобувача Фаренюка Є. Г. на тему «Тепловий режим світлопрозорих огорожувальних конструкцій сучасних багатоповерхових будівель»

Результати дисертаційної роботи здобувача Фаренюка Є. Г. «Тепловий режим світлопрозорих огорожувальних конструкцій сучасних багатоповерхових будівель» були враховані при виконанні робіт на об'єктах ТРЦ «Ocean Plaza» (м. Київ, вул. Антоновича, 176), офісного центру «IQ», (м. Київ, вул. С.Струтинського, 13-15), що виконувалися у 2013-2015 роках, в яких здобувачем був проаналізований тепловий режим світлопрозорих конструкцій та запропоновані рекомендації по усуненню недоліків проектних рішень.

Надані рекомендації були реалізовані на відповідних об'єктах.

З повагою,  
Заступник генерального директора -  
керівник проекту



С.Б.Зайченко



Мінрегіон України

**ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
„УКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ І ПРОЕКТНИЙ ІНСТИТУТ  
ЦИВІЛЬНОГО БУДІВНИЦТВА „УКРНДПЦИВІЛЬБУД”**

просп. 40-річчя Жовтня, 50, м. Київ, 03039, тел. (044) 257-10-79, факс (044) 257-50-44. E-mail: office@civilsilbud.com.ua  
Код ЄДРПОУ 02497683

№ 499 від 10.09.15

**ДОВІДКА**

**про впровадження дисертаційної роботи здобувача Фаренюка Є. Г. на тему  
«Тепловий режим світлопрозорих огорожувальних конструкцій сучасних  
багатоповерхових будівель»**

Світлопрозорі огорожувальні конструкції є одним із найважливіших елементів сучасних будівель з точки зору забезпечення їх архітектурної привабливості та ефективного використання енергії під час експлуатації. Проведення наукових досліджень, направлених на розвиток системи проектування сучасних світлопрозорих конструкцій, є актуальною задачею, що має суттєве практичне значення.

Державне підприємство «Український науково-дослідний і проектний інститут цивільного будівництва» постійно здійснює проектування житлових і громадських будівель по всій території України. Результати дисертаційної роботи здобувача Фаренюка Є. Г. «Тепловий режим світлопрозорих огорожувальних конструкцій сучасних багатоповерхових будівель» використовувалися у проектуванні при виборі світлопрозорих конструкцій за їх теплотехнічними та енергетичними показниками, а саме для об'єктів:

- житлові комплекси Чайка-1, Чайка-2, Брест-Литовський в с. Чайки Києво-Святошинського району Київської області,
- виробнича база дочірнього підприємства «Форд-Виннер» на Житомирській трасі біля села Капітанівка Київської області,
- реконструкція центрального та бібліотечно-інформаційного корпусів Академії Державної податкової служби в м. Ірпінь.

Проектування ефективних світлопрозорих конструкцій при будівництві та реконструкції сприяли суттєвому зниженню енерговитрат цих об'єктів при експлуатації.

Дослідження, проведені Фаренюком Є.Г., є актуальними, виконані на високому науковому рівні і мають практичне значення при проектуванні світлопрозорих конструкцій сучасних будівель.

Довідка надана для захисту дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук у спеціалізованій вченій раді К 47.104.06 при Національному університеті водного господарства та природокористування.

Директор ДП «УКРНДПЦИВІЛЬБУД»  
кандидат архітектури

  
О.П.Чижевський



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ковалко М. П. Энергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України / М. П. Ковалко, С. Л. Денисюк //– К. : НАН України, АТ “Енергозбереження”, 1998. – 506 с.
2. Фаренюк Е.Г. К анализу расчетных методов для определения теплотехнических характеристик светопрозрачных конструкций / Е. Г. Фаренюк, Ю. И. Калюх // Архитектура и стр-во в Азербайджане. – 2014. –№ 3. – С. 18–24.
3. Фаренюк Є.Г. Вплив на тепловий режим приміщення різних конструктивних рішень віконних систем / А. А. Худенко, Є. Г. Фаренюк // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. – К. : КНУБА, 2002. – Вип. 4.– С. 34–41.
4. Фаренюк Е.Г. Определение теплового состояния и оценка качества строительных объектов в условиях эксплуатации / Г. Ф. Синер, Е. Г. Фаренюк // Економія теплоти та енергії в проектуванні та будівництві: зб. доп. 1–ї всеукр. наук.-практ. конф. (Полтава, 1996 р.). – К. : КиївЗНДІЕП, 1996. – 82 с.
5. Фаренюк Е.Г. Конструктивные принципы повышения теплозащитных качеств оконных систем / Г. Г. Фаренюк, Е. Г. Фаренюк // Окон. технологии. – 1999. – № 1. – С. 46–49.
6. Фаренюк Е.Г. Теплотехнические характеристики фасадных комбинированных систем / Г. Г. Фаренюк, Е. Г. Фаренюк // Окон. технологии. – 2001. – № 6. – С. 35–45.
7. Фаренюк Е.Г. О закономерностях теплопередачи через светопрозрачные конструкции / Г. Г. Фаренюк, Е. Г. Фаренюк // Окон. технологии. – 2001. – № 7. – С. 38–40.
8. Фаренюк Е.Г. О сбережении тепла помещений энергоэффективными покрытиями стекол / Г.Г. Фаренюк, В.В. Горин, Е. Г. Фаренюк // Окон. технологии. – 2001. – № 8. – С. 50–51.



9. Фаренюк Е.Г. Метод расчета солнечной радиации при проектировании теплоизоляции светопрозрачных конструкций зданий и сооружений / Г. Г. Фаренюк, В. В. Горин, Е. Г. Фаренюк // Окон. технологии. – 2002. – № 11. – С. 38–47.

10. Фаренюк Е.Г. Температурный режим алюминиевых стоечно-ригельных узлов фасадных систем / Г. Г. Фаренюк, Е. Г. Фаренюк // Окон. технологии. – 2002. – № 13. – С. 66–70.

11. Патент 18147 А, Україна, E04B 1/74, F24P 5/10. Теплоакмулюючий пристрій / [Фаренюк Г. Г., Садовий В. С., Ткаченко І. М., Фаренюк Є. Г. та ін.]; заявник та патентовласник Наук.-дослід. ін-т буд. конструкцій. – Зареєстр. 27.04.1995, № 3769-ХІІ. оприлюдн.01.07.97. Бюл. № 3. – С. 7

12. Конструкції будинків та споруд. Теплова ізоляція будівель : ДБН В.2.6-31:2006. – [Чинний від 01.04.2007] . – К. : Мінбуд України, 2006. – 64 с.

13. Конструкції будинків і споруд. Конструкції зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією. Вимоги до проектування, улаштування та експлуатації: ДБН В.2.6-33:2008. – [Чинний від 01.12.2008]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 43 с. – (Нац. стандарт України).

14. Будинки і споруди. Метод визначення повітропроникності огорожувальних конструкцій в натурних умовах : ДСТУ Б В.2.2-19:2007. – [Чинний від 01.07.2008]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2008. – 43 с. – (Нац. стандарт України).

15. Конструкції будинків і споруд. Метод визначення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій : ДСТУ Б В.2.6–101:2010. – [Чинний від 2010.20.01]. – К. : М–во регіон. розвитку та буд–ва України, 2010. – 84 с. – (Нац. стандарт України).

16. Проектування. Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорту будинків при новому будівництві та реконструкції: ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007. – [Чинний від 01.07.2008]. – К. :

М–во регіон. розвитку та буд–ва України, 2008. – 43 с. – (Нац. стандарт України).

17. Розділ «Енергоефективність» у складі проектної документації об'єктів: ДСТУ Б А.2.2-8:2010. – [Чинний від 20.01.2010]. – К. : М–во регіон. розвитку та буд–ва України, 2010. – 47 с. – (Нац. стандарт України).

18. Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель: ДСТУ Б В.2.6-189:2013. – [Чинний від 01.01.2014]. – К. : М–во регіон. розвитку та буд–ва України, 2013. – 51 с. – (Нац. стандарт України).

19. Фасади навісні. Технічні умови (EN 13830:2003, IDT ): ДСТУ Б EN 13830:2014. – [Чинні від 01.10.2015]. – К. : М–во регіон. розвитку та буд–ва України, 2014. – 53 с. – (Нац. стандарт України).

20. Фаренюк Е.Г. Теплозащитное окно как элемент пассивного солнечного отопления / Е. Г. Фаренюк // Энергозбереження в будинках і спорудах: зб. доп. 2–ї всеукр. наук.-практ. конф. (Чернігів, 1998 р.). – К. : КиївЗНДІЕП, 1998. – 95 с.

21. Фаренюк Е. Г. Воздухопроницаемость ограждающих конструкций / Е.Г.Фаренюк // Окон. технологии. – 2002. – № 9. – С. 50–53.

22. Фаренюк Є.Г. Методика експериментальних досліджень довговічності сучасних світлопрозорих конструкцій / Є. Г. Фаренюк // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Днепропетровск : ГВУЗ «ПГАСА», 2012. – Вып. 65. – С. 618–624.

23. Фаренюк Є.Г. Вплив вентиляційних провітрювачів на теплотехнічні показники світлопрозорих огорожуючих конструкцій та нормативний повітрообмін у приміщенні / Є. Г. Фаренюк // Будівельні конструкції : зб. наук. пр. – К. : ДП НДІБК, 2013. – Вип. 77. – С. 31–38.

24. Фаренюк Є.Г. Особливості формування теплових показників конструктивних рішень вузлів примикання світлопрозорих фасадних систем / Є. Г. Фаренюк // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Днепропетровск: ГВУЗ «ПГАСА», 2013. – Вып. 69. –

С. 554–564.

25. Будівельні матеріали. Склопакети класні будівельного призначення. Технічні умови: ДСТУ Б В.2.7-107:2008. – [Чинні від 01.01.2010]. – К. : Держ. Ком. України у справах містобудування і архітектури, 2010. –38 с. – (Нац. стандарт України).

26. Использование тяжелых инертных газов в стеклопакетах / [А. А. Голубев, И. А. Архаров, Г. Г. Фаренюк, А. В. Криппа] // Светопрозрач. конструкции. – 2006. – № 2 – С.46-48

27. Мурадян М. Некоторые новые тенденции развития производства современных стеклопакетов / М. Мурадян, М. Саркисов, А. Спиридонов, А. Морозов // Окна и двери. – 2001. – № 3 (48). – С. 32-36

28. Світлопрозорі огороження будинків / [О. Л. Підгорний, І. М. Шепетова, О. В. Сергейчук та ін.]: за ред. О. Л. Підгорного. – К. : КНУБА, 2005. – 281 с.

29. Фаренюк Г. Г. Эффективные окна на основе алюминиевых сплавов / Г. Г. Фаренюк, В. Г. Ещенко // сб. науч. тр. / Экономія теплоти та енергії в проектуванні та будівництві: Тези доп. першої всеукр. наук.-практ. конф. – Полтава: Полт. техн. ун-т, 1996. – 81 с.

30. Борискина И. В. Проектирование современных оконных систем гражданских зданий : учеб. пособие / И. В. Борискина, А. А. Плотников, А. В. Захаров – М. : Изд-во АСВ, 2003. – 320 с.

31. SCHUCO. Aluminium Systeme Fassaden und Licht-dacher 1. – [S.l. :s.l.], 1999. – 60 s.

32. Вежховски Т. Структурное остекление. Основные принципы проектирования / Т. Вежховски // Витрина. – 2004. – № 2 (24). – С. 22–27.

33. Лисовец В. Г. Хрустальный дворец / В. Г. Лисовец // Окон. технологии. – 2000. – № 2. – С. 22–31.

34. Пост Х. Фасад, заменяющий кондиционер / Х. Пост // Витрина. – 2004. – № 2 (24) . – С. 34–37.

35. Исследование новых конструкций окон для жилых домов / [Н. И. Цаплев, И. В. Строков, Н. А. Андрианов, В. С. Самошин] // Конструкции жилых полносборных зданий: сб. науч. тр. / Центр науч.-исслед. и проект. ин-т. типового и эксперимент. проектирования жилища. – М. : ЦНИИЭП жилища, 1981. – С. 46–55.
36. Пермяков С. И. Определения сопротивления теплопередаче световых проемов, заполненных специальными видами стекла / С. И. Пермяков, Т. Г. Халатова // Совершенствование внутренней среды оборудования и конструкций обществ. зданий : сб. науч. тр., ЦНИИЭП учебных зданий. – М. : [б.и.], 1982. – С. 41–52.
37. Савин В. К. Теплотехнические, светотехнические и экономические основы проектирования окон для строящихся на севере сооружений / В. К. Савин. – М. : Стройиздат, 1983. – ....с.
38. Савин В. К. Многоцелевые светопропускающие заполнения и их основные свойства / В. К. Савин // Совершенствование светопрозрачных конструкций промышленных зданий : докл. 5-й науч.-практ. конф. (Москва, вып. 42, 1987 г.). – М. : Стройиздат, 1978. – С. 48-53
39. Савин В. К. Инженерный метод расчета теплопередачи через световые проемы / В. К. Савин, В. Н. Дворцов // Исследования по строительной физике : науч. тр. НИИСФ. – М. : [б.и.], 1984. – С.22-29
40. Дроздов В. А. Теплообмен в светопрозрачных ограждениях / В. А. Дроздов, В. К. Савин, Ю. П. Александров – М. : Стройиздат, 1979. – 306 с.
41. Carmody J. Window System for High-Perfomens Buildings / J. Carmody, S. Selkowits, E. Lee, D. Arastch, T. Willmert. – W.W.Norton&Company. – New York – London, 2004. – P. 400.
42. Кривошеин А. Д. Оценка теплотехнической эффективности дистанционных рамок различного конструктивного решения. / А. Д. Кривошеин, Д. А. Харламов. // Светопрозрач. конструкции. – 2007. – № 6. – С. 4–5.

43. Черных Л. Ф. Правильное стекло / Л. Ф. Черных, В. А. Одринская, О. С. Бордарева // Окон. технологии. – 2008. – № 32. – С. 81–84.
44. Зак Норберт. Новейшие технологии теплоизоляции и вентиляции с помощью окон и фасадов / Норберт Зак // Окон. технологии. – 2008. – № 32. – С. 68–71.
45. Могутов В.А. Новые принципы технологических расчетов светопрозрачных конструкций / В.А. Могутов // Светопрозрач. конструкции. – 1999. – № 1-2. – С. 46–49.
46. Кривошеин А. Д. Об оценке приведённого сопротивления теплопередаче оконных и дверных балконных блоков на основе расчётных методов / А. Д. Кривошеин, Д. А. Харламов // Светопрозрач. конструкции. – 2007. – № 4 (54). – С. 9–13.
47. Брилинг Р. Е. Воздухопроницаемость ограждающих конструкций и материалов / Р. Е. Брилинг. – М. : Стройиздат, 1948. – 102 с.
48. Васильев Е. Ф. Методика натуральных наблюдений температурно-влажностного режима жилых зданий / Е. Ф. Васильев // Исследования по строительной теплофизике. – М. : Стройиздат, 1959. – С.210
49. Константинова В. Е. Выбор надбавок к расчетным теплотерям, учитывающих сквозную инфильтрацию наружного воздуха через ограждения жилых зданий / В. Е. Константинова // Тр. НИИСТ. – М. : Стройиздат, 1959. – № 3. – С.58
50. Константинова В. Е. Расчет воздухообмена в жилых и общественных зданиях / В. Е. Константинова. – М. : Стройиздат, 1964. – 156 с.
51. Семёнова Е. И. Воздухопроницаемость окон жилых и общественных зданий / Е. И. Семёнова – М. : Стройиздат, 1969. – 144 с.
52. Теория здания : Монография : Т. 1. Здание – оболочка / [С. Н. Булгаков, В. М. Бодаренко, Ю. Я. Кувшинов и др.]. – М. : Изд-во АСВ. – 2007. – С. 141–152.

53. Исследование теплозащитных и звукоизолирующих свойств ограждающих конструкций жилых и общественных зданий / [под ред. Г. К. Авдеева, Э. М. Лалаева]. – М. : Стройиздат, 1974. – 212 с.
54. Копилов К. П. Теплопередача окон жилых зданий повышенной этажности : дисс. кан. техн. наук: спец. 05.23.01 “Строительные конструкции, дома и сооружения” / К. П. Копилов. – М., 1970. – 184 с.
55. Ушков Ф. В. Теплотехнические свойства крупнопанельных зданий и расчет стыков / Ф. В. Ушков. – М. : Стройиздат, 1967. – 238 с.
56. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К. Ф. Фокин. – (4-е изд. перераб. и доп.). – М. : Стройиздат, 1973. – 287 с.
57. Ильинский В. М. Проектирование ограждающих конструкций зданий (с учетом физико-климатических воздействий) / В. М. Ильинский. – М. : Стройиздат, 1964. – 294 с.
58. Ильинский В. М. Строительная теплофизика / В. М. Ильинский. – М. : Высш. шк., 1974. – 318 с.
59. Богословский В. Н. Тепловой режим здания / В. Н. Богословский. – М. : Стройиздат, 1979. – 248 с.
60. Богословский В. Н. Строительная теплофизика (Теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) / В. Н. Богословский. – М. : Высш. шк., 1982. – 415 с.
61. Богословский В. Н. Отопление и вентиляция / В. Н. Богословский, В. П. Щеглов, Н. И. Разумов. – М. : Стройиздат, 1980. – 249 с.
62. Турчин И. А. Влияние дискретно–распределительного вдува и отсоса на теплообмен при естественной конвекции у вертикальной поверхности : автореф. дис. канд. техн. наук : спец. 05.23.01 “Строительные конструкции, дома и сооружения” / Турчин И. А. – Минск, 1964. – 20 с.

63. Гигиенические аспекты оптимизации воздушной среды жилых и общественных зданий / [В. Я. Акименко, Н. М. Янко и др.] // Окон. технологии. – 2001. – № 7. – С. 45–23.

64. Методы и средства повышения теплоизоляционных качеств окон. Выбор сопротивления воздухопроницанию [Электронный ресурс] / [В. Б. Шевелев, М. И. Коляков, Черных Л.Ф., П. П. Полевой] // ЭСКО. Энергосбережение в зданиях / Энергосберегающая компания. – 2004. – № 6 (30). – Режим доступа к журналу: [http://esco-ecosys.narod.ru/2004\\_6/art29.htm](http://esco-ecosys.narod.ru/2004_6/art29.htm).

65. Черных Л. Ф. Воздухообмен в помещении / Л. Ф. Черных, П. А. Дац // Окон. технологии. – 2007. – № 28 (2). – С. 76-80.

66. Савин В. К. Комплексный метод расчёта СП ограждений и оценка их эффективности / В. К. Савин // Теплоизоляция зданий : сб. науч. тр. НИИСФ. – М. : [б.и.], 1986. – С. 20–26.

67. Савин В. К. Энергоэкономический анализ наружных ограждающих конструкций и оболочки здания в целом / В. К. Савин // Стены и фасады. – 2002. – № 4 (19). – С. 9–16.

68. Савин В. К. Долговечность и эффективность зданий / В. К. Савин // Окна и двери. – 2004. – № 5–6. – С. 31–36.

69. Дроздов В. А. Теплообмен в светопрозрачных ограждающих конструкциях / В. А. Дроздов, В. К. Савин, Ю. П. Александров. – М. : Стройиздат, 1979. – 307 с.

70. Сергиенко А. С. Тепловой и воздушный режимы оконных проёмов культовых сооружений на примере православных храмов / А. С. Сергиенко. – Н.Новгород, [б.и.], 2003. – 286 с.

71. Кривошеин А. Д. Окна из ПВХ: анализ теплового режима узлов сопряжения с наружными стенами различного конструктивного решения / А. Д. Кривошеин // Окна и двери : информ. бюл. – 1998. – № 5. – С. 14–16.

72. Власенко Д. Зима неизбежна. Из окон снова будет дуть / Д. Власенко // Светопрозрач. конструкции. – 2010. – № 4 (72). – С. 46–50.

73. Конструкції будинків і споруд. Методи визначення показників повітропроникності огорожувальних конструкцій і їх елементів в лабораторних умовах: ДСТУ Б В.2.6-37:2008. – [Чинний від 06.01.2009]. – К. : М-во регіон. розвитку та буд-ва України, 2009. – 20 с. – (Нац. стандарт України).

74. Проектирование тепловой защиты зданий : СП 23-101-2004. – М. : Госстрой России, 2004. – 139 с. – (Свод правил по проектированию и стр-ву).

75. Табунщиков Ю. А. Тепловая защита ограждающих конструкций зданий и сооружений / Ю. А. Табунщиков, Д. Ю. Хромец, Ю. А. Матросов. – М. : Стройиздат, 1986. – 378 с.

76. Табунщиков Ю. А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач – М. : АВОК–Пресс, 2002. – 193 с.

77. Табунщиков Ю. Энергоэффективные здания / Ю. Табунщиков, М. Бродач, Н. Шилкин – М. : АВОК-Пресс, 2003. – 200 с.

78. Матросов Ю.А. Энергосбережение в зданиях. Проблема и пути ее решения / Ю. А. Матросов. – М. : НИИСФ, 2008. – 496 с.

79. Wright J. L. Natural convection in sealed glazing units: a review / J. L. Wright, H. E. Sullivan // ASHRAE Trans. – 1989. – V. 95. – P. 592–602.

80. Петров Е. В. Влияние различных факторов на тепловые характеристики оконных заполнений: автореф. дис. канд техн. наук: спец. 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» / Петров Е.В. – Томск, 2000. – 20 с.

81. Савин В. К. Строительная физика. Энергоперенос. Энергоэффективность. Энергосбережение / В. К. Савин. – М. : Лазурь, 2005. – 432 с.

82. Ржеганек Я. Снижение теплопотерь в зданиях / Я. Ржеганек, А. Яноуш. – М. : Стройиздат, 1988. – 168 с.



83. Wright J. L. A correlation to quantify convective heat transfer between vertical window glazings / J. L. Wright // ASHRAE Trans. – 1996. – Vol. 102. – P. 940–946.

84. Cursija D. Two-dimensional natural convection over the isothermal indoor fenestration surface – Finite element numerical solution / D. Cursija, W. P. Goss // ASHRAE Trans. – 1993. – V. 99. № 1. – P. 274–287.

85. Білоус О. М., Колесник Є.С. / Конструктивні принципи забезпечення енергоефективності світлопрозорих огорожувальних конструкцій, // Сучасне промислове та цивільне будівництво. – 2011. – Т.7 №4– С. 243-250.

86. Korpela S. A. Heat transfer through a double pane window / S. A. Korpela, Y. Lee, J. E. Drummond // J. Heat Transfer. – 1982. – V. 104. – P. 539–544.

87. Лепин А. А. Электрообогреваемые стекла / А.А. Лепин // Строительные материалы. – 1995. – № 5. – С. 14–15.

88. Окна на основе электрообогреваемых стеклопакетов // Энергосбережение. – 1999. – № 5. – С. 24.

89. Вали Ю. Стеклопакеты с электрообогревом / Ю. Вали, В.А. Могутов // Светопрозрач. конструкции. – 1999. – № 3–4. – С. 44–45.

90. Термическое сопротивление заполнений оконных блоков / [М. И. Низовцев, В. И. Терехов, А. И. Гныря, Е. В. Петров] // Изв. ВУЗов. Строительство. – 1998. – № 11–12. – С. 90–94.

91. Петров Е. В. Исследование обогрева межстекольного пространства при тройном остеклении / Е. В. Петров, В. И. Терехов, М. И. Низовцев // Вестн. ТГАСУ. – 2000. – № 1 – С. 221–227.

92. Экспериментальное исследование влияния тепловыделения в межстекольном пространстве на тепловые характеристики окна / [М. И. Низовцев, В. И. Терехов, А. И. Гныря, Е. В. Петров] // Тр. ММФ. – Минск : [б.и.], 2000. – Т. 1. – С. 369–375.

93. Желих В. М. Розробка теплофізичних основ теплозабезпечення виробничих комплексів на базі комбінованих систем опалення із застосуванням інфрачервоного нагріву : автореф. дис. канд. техн. наук : спец. 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика» / Желих В. М. – К., 2013. – 31 с.

94. Слепцов В. В. Теплосберегающие стекла и энергосбережение / В. В. Слепцов, Д. Д. Спиваков, А. Ю. Александров // Теплоэнергетика. – 1999. – № 4. – С. 45–47.

95. Герасимов А. К. Современные требования к покрытиям для низкоэмиссионного стекла / А. К. Герасимов // Электровакуумная техника и технология : постоянно действующий науч.-техн. семинара : тр. – М. : [б.и.], 1997. – С. 129–136.

96. Glaser H. J. Large area glass coating / H. J. Glaser. – Dresden : 1st Engl. Edit., 2000. – 472 с.

97. Теплове розширення стекол  $Ge_xAs_{40-x}Se_{60}$  / В. С. Біланич, І. В. Бондар, Р. Б. Онищак [та ін.] // Наук. вісн. Ужгород. ун-ту. – Ужгород : Вид-во Ужгород. ун-ту «Говерла», 2010. – Вип. 28. – С. 52–56. – (Серія Фізика).

98. Маркус Т.А., Моррис Э.Н. Здание, климат и энергия. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 543 с.3

99. Экраны и жалюзи с теплоотражающими покрытиями / [М.И. Низовцев, В.И. Терехов, И.К. Хайритдинов и др.] // Современ. окна Сибири и Дальн. Востока. – 2005. – № 2. – С. 28–29.

100. Низовцев М. И. Межрамные экраны и жалюзи с теплоотражающими покрытиями / М. И. Низовцев, В. И. Терехов, И. К. Хайритдинов // Светопрозрач. конструкции. – 2005. – № 2. – С. 32–33.

101. Экраны и жалюзи с теплоотражающими покрытиями / [М. И. Низовцев, В. И. Терехов, И. К. Хайритдинов и др.] // Современ. окна Сибири и Дальн. Востока. – 2006. – № 1. – С. 26–27.

102. Rheault S. Heat transfer analysis in an automated venetian blind window system / S. Rheault, J. Sol, E. Bilgen // *Energy Eng.* – 1989. – Vol. 111. – P. 89–95.

103. Boehm R. Testing of air-flow windows for evaluation and application / R. Boehm, T. Bostrom // *Proceedings of ASME: Solar Energy Division Conf., Reno, NV.* – [S.l. :s.l.], 1981. – P. 168–179.

104. Карпис Е. Е. Теплотехнический эффект применения вентилируемых окон / Е.Е. Карпис // *Водоснабжение и санитар. техника.* – 1976. – № 9. – С. 32.

105. Etzion Y. Controlling the transmission of radiant energy through windows: a novel ventilated reversible glazing system / Y. Etzion, E. Erell // *Build. & Envir.* – 2000. – № 35. – P.433.

106. Кувшинов Ю.Я. Энергетическая эффективность вентилируемых окон / Ю.Я. Кувшинов // *Водоснабжение и санитар. техника.* – 1994. – № 9. – С.17–19.

107. Haddad K. Comparison of the monthly thermal performance of a conventional window and a supply-air window / K. Haddad, A. H. Elmahdy // *ASHRAE Trans.* – 1998. – Vol.104. – Pt. 1. – P. 1002–1024.

108. Диомидов М. В. Влияние расхода воздуха на тепловые характеристики вентилируемого окна / М. В. Диомидов, М. И. Низовцев, В. И. Терехов // *Изв. ВУЗов. Строительство.* – 2001. – № 1. – С. 66–69.

109. Sodergren D. Ventilating with the “exhaust air window” / D. Sodergren, T. Bostrom // *ASHRAE J.* – 1971. – № 4. – P. 51–57.

110. Диомидов М. В. Тепловые характеристики окон с тройным остеклением при естественной вентиляции внутренней межстекольной прослойки / М. В. Диомидов, М. И. Низовцев, В. И. Терехов // *Изв. ВУЗов. Строительство.* – 2001. – № 7. – С. 70–73.

111. Avedissian T. Free convective heat transfer in an enclosure with an internal louvered blind, *Int. J* / T. Avedissian // *Naylor, Heat Mass Transfer.* – 2008. – Vol. 51. – P. 283–293.

112. Costa V. A. F. Numerical of natural convection heat transfer in a window with a between-panes venetian blind, Int. / V. A. F. Costa // Symp. on Convective Heat and Mass Transfer in Sustainable Energy. (Tunisia, 2009, April 26 – May 1). – [S.l. :s.l.], 2009.

113. Naylor D. Experimental study of natural convection in a window with a between-panes venetian blind, Exp / D. Naylor, B.Y. Lai // Heat Transfer. – 2007. – Vol. 20. – P. 1–17.

114. Терехов В. И. Влияние геометрии вертикальной прослойки на свободноконвективный теплообмен в режиме многоячейстого течения / В. И. Терехов, В. В. Терехов, В. В. Грищенко // Тр. Минского международного форума по тепломассообмену ММФ-V. – Минск : [б.и.], 2004. – С. 10.

115. Математическое моделирование теплообмена в межстекольном промежутке / [В. В. Грищенко, М. И. Низовцев, В. В. Терехов, В. И. Терехов] // Изв. ВУЗов. Строительство. – 2002. – № 2. – С. 120–127.

116. Исследование теплообмена вентилируемом окне / [М. В. Диомидов, М. И. Низовцев, В. В. Терехов, В. И. Терехов] // Пром. теплотехника. – 2002. – № 2–3. – С. 40–44.

117. Численные методы исследования течений вязкой жидкости / [А. Д. Госмен, В. М. Пан, А. К. Ранчел и др.]. – М. : Мир, 1972. – 324 с.

118. Zhao Y. Prediction of the numerical flow of natural convection in fenestration glazing cavities / Y. Zhao, D. Curclja, W.P. Gross // ASHRAE Trans. – 1997. – Vol. 103. – № 1. – P. 1009–1020.

119. Кривобок Э. Н. Метод теплотехнического расчета вентилируемых окон / Э. Н. Кривобок // Водоснабжение и санитар. техника. – 1981. – № 7. – С. 13–16.

120. Конструкції будинків і споруд. Блоки віконні та дверні. Методи визначення повітро- та водопроникності : ДСТУ Б В.2.6-18-2000 (ГОСТ 26602.2-99). – [Чинний від 01.01.2001] . – К. : Держ. ком. буд-ва,

архітектури та житл. політики України, 2000. – 20 с. – (Нац. стандарт України).

121. Конструкції будинків і споруд. Блоки віконні та дверні. Методи визначення опору теплопередачі : ДСТУ Б В.2.6-17-2000 (ГОСТ 26602.1-99). – [Чинний від 01.01.2000]. – К. : Держ. ком. буд-ва, архітектури та житл. політики України, 2000. – 31 с. – (Наці.стандарт України).

122. Теплова ефективність будинків. Якісне виявлення теплових відмов в огорожувальних конструкціях. Інфрачервоний метод (EN 13187:1998, IDT): ДСТУ Б EN 13187:2011 – [Чинні від 01.01.2013]. – К. : Держ. ком. буд-ва, архітектури та житл. політики України,, 2013. – 32 с. – (Нац. стандарт України).

123. Будинки і споруди. Метод визначення питомих тепловитрат на опалення будинків : ДСТУ Б В.2.2-21:2008. – [Чинний від 01.06.2009]. – К. : Мін-во регіон. розвитку та буд-ва України, 2009. – 29с. – (Нац. стандарт України).

124. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций : ГОСТ 26254-84. – [Действует с 01.01.1985]. – М. : Гос. ком. СССР по делам стр-ва, 1985. – 24 с. – (Гос. стандарт Союза ССР).

125. Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций : ГОСТ 26629-85. – [Действует с 01.07.1986] . – М. : Гос. ком. СССР по делам стр-ва, 1986. – 9 с. – (Гос. стандарт Союза ССР).

126. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления воздухопроницанию ограждающих конструкций : ГОСТ 25891-83. – [Действует с 01.01.1984]. – М. : Гос. ком. СССР по делам стр-ва, 1983. – 15 с. – (Гос. стандарт Союза ССР).

127. Лыков А. В. Тепломассообмен : справ. / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1978. – 479 с.

128. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 599 с.
129. Исаченко В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел – М. : Энергоиздат, 1981. – 416 с.
130. Эккерт Э. Р. Теория тепло- и массообмена / Э.Р. Эккерт, Р. М. Дрейк. – М.–Л. : Госэнергоиздат, 1961. – 681 с.
131. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – Изд. 2-е, стереотип – М.: Изд-во Энергия, 1977. – 344 с.
132. Schmodt E. Das Temperatur-und geschwindikeitsfeld von einer warme abgebenden senkrechten platte bei naturlicher konvektion/ E. Schmodt, W. Beckmann. – Forschg. Ing.-Wes. 1, 1930. – 391 s.
133. Будівельна кліматологія : ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. – [Чинний від 2011-11-01] . – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 123 с. – (Нац. стандарт України).
134. Перетворювачі термоелектричні. Загальні технічні умови : ДСТУ 2857-94 (ГОСТ 6616-94). – [Чинний від 01.01. 1997]. – К. : Держ. ком. стандартизації метрології та сертифікації України, 1997. – 54 с. – (Нац. стандарт України).
135. Перетворювачі термоелектричні. Номінальні статичні характеристики перетворення : ДСТУ 2837-94 (ГОСТ 3044-94). – [Чинний від 01.01.1997]. – К. : Держ. ком. стандартизації метрології та сертифікації України, 1997. — 238 с. — (Нац. стандарт України).
136. Енергозбереження. Перетворювачі теплового потоку термоелектричні загального призначення. Загальні технічні умови : ДСТУ 3756-98 (ГОСТ 30619-98). – [Чинний від 01.07.2000]. – К. : Держстандарт України, 2000. — 21 с. — (Нац. стандарт України).
137. Прилади електричні прямого перетворення для вимірювання неелектричних величин. Загальні технічні вимоги та методи випробувань : ДСТУ ГОСТ 9736:2009. – [Чинний від 02.01. 2009]. – К. : Держ. Ком.

України з питань техн. регулювання та спожив. політики, 2008. – 13 с.– (Нац. стандарт України).

138. Енергозбереження. Будівлі та споруди. Методи вимірювання поверхневої густини теплових потоків та визначення коефіцієнтів теплообміну між огорожувальними конструкціями та довкіллям : ДСТУ 4035-2001 (ГОСТ 25380-2001). – [Чинний від 01.01.2002]. – К. : Держстандарт України, 2001. – 48 с. – (Нац. стандарт України).

139. Ковтун С. І. Еталонна установка для атестації перетворювачів теплового потоку виду допоміжної стінки : автореф. дис. канд. техн. наук : спец. 05.11.04 «Прилади та методи вимірювання теплових величин» / Ковтун С. І. – К., 2013. – 23 с.

140. Блоки віконні та дверні. Метод визначення загального коефіцієнту пропускання світла: ДСТУ Б В.2.6-20-2000 (ГОСТ 26602.4-99) – [Чинні з 2009.06.01]. - К.: Мін-во регіон. розвитку та буд-ва України, 2009. - 12 с. – (Нац. стандарт України)

141. The Building Regulations 2000. Approved document. Ventilation. Part 4. – London : NBS. – P. 14 -16.

142. Flueing and ventilation for gas appliances of rated input not exceeding 70 kW net (1st, 2nd and 3rd family gases) BSI British Standards: BS 5440-2-2000. – London : BSI. – 40 p.

143. Мартинов В. Л. Моделювання оптимальних геометричних параметрів енергоефективних будівель гранної форми : автореф. дис. д-ра. техн. наук : спец. 05.01.01 «Прикладна геометрія, інженерна графіка» / Мартинов В. Л. – К., 2015. – 36 с.

144. Курант Р. Методы математической физики / Р. Курант, Д. Гильберт. – Изд. г-е. – М. –Л.: Гостехиздат, 1951 – Т. 1. – 476 с.

145. Круглова А. И. Климат и ограждающие конструкции / А. И. Круглова. – М. : Изд. лит. по стр-ву, 1970. – 167 с.

146. EN ISO 14683:2007. Thermal bridges in building constructions. – Linear thermal calculation of heat flows and surface temperature. – Linear

thermal transmittance. – Simplified method and default values. – Brussels: CEN, 2007. – 23 p.

147. EN ISO 10077-1:2012. Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance – Part 1: General. – Brussels: CEN, 2012. – 46 p.

148. EN ISO 10077-2:2012. Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance – Part 2: Numerical method for frames. – Brussels: CEN, 2012. – 36 p.

149. Скло будівельне. Методика визначення коефіцієнта теплопередавання багат шарових конструкцій: ДСТУ EN 673:2009. — [Чинний від 2009-30.12]. — К.: Держспоживстандарт України, 2009. —13 с. — (Національний стандарт України).

150. Будівельні матеріали. Скло з низькоемісійним м'яким покриттям. Технічні умови (ГОСТ 31364-2007, MOD): ДСТУ Б.В.2.7-228:2009. — [Чинний від 2010-01.10]. — К.: Мінрегіонбуд України, 2009. —68 с. — (Національний стандарт України).

151. BS EN 12898:2001. Glass in building - Determination of the emissivity. – Brussels: CEN, 2001. – 16 p.

152. ISO 12567:2010. Thermal performance of windows and doors. Determination of thermal transmittance by the hot-box method. — Part 1: Complete windows and doors. — – Brussels: CEN, 2010. – 53 p.

153. Сергейчук О.В. Теплопередача через наклонные светопроемы в зимнее время / Аветиков А.В., Лисовец В.Г., Сергейчук О.В.// Витрина. – 2001. – № 10. – С. 16–23.

154. Лагарьков А. Н. Окна зданий в XXI веке / А. Н. Лагарьков, Е. А. Бондарь // Энергия, экономика, техника, экология. – 2001. – № 3. – С. 16–24.

155. Соловьев С. П. Рекомендации по проектированию светопрозрачных ограждений общественных зданий массового



строительства / С. П. Соловьев, С. И. Пермяков, Б. А. Крупнов. – М : Стройиздат, 1989. – 136 с.

156. Автономні рішення від RENAУ. Вентиляція і повітрообмін у віконному будівництві. // Вітрина. – 2001. – №3. – С. 46-49.

157. Плоский Г.О., Гетун Г.В., Кошева В.О. Особенности вентиляции многоэтажных жилых зданий // Строительство и техногенная безопасность. – 2012. – № 41 – С.193-194 .

158. Будинки і споруди. Житлові будинки. Основні положення: ДБН В.2.2-15-2005 - [Чинний з 01.01.2006]. – К.: Держбуд України, зміна від 01.04.2009 р. за наказом Мінрегіонбуду №339. – С. 20-21

159. Гришко В. И., Мисюра Л. И. Справочник по климату СССР. – Выпуск 10. Украинская ССР. – Часть 1. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 124 с.

160. ДСТУ Б EN ISO 13790:2011. Енергоефективність будівель. Розрахунок енергоспоживання при опаленні та охолодженні. – На заміну ГОСТ 2662985. – [Чинний з 01.01.2013]. – К. : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2013. – 229 с. – (Державний стандарт України).

161. ДСТУ Б EN 15603:2013. Енергетична ефективність будівель. Загальне енергоспоживання та проведення енергетичної оцінки (EN 15603:2008, IDT) – [Чинний з 01.01.2013]. - К. : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2014. – 52 с. – (Державний стандарт України).

162. ДСТУ Б EN 15459:2014. Енергетична ефективність будівель. Процедура економічної оцінки енергетичних систем будівель (EN 15459:2007, IDT). – [Чинний з 01.04.2015]. - К. : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2014. – 63 с. – (Державний стандарт України).

163. EN 15241. Ventilation for buildings – Calculation methods for energy losses due to ventilation and infiltration in commercial buildings. – Brussels: CEN, 2007. – 27 p.

164. EN 15316-2-1:2007. Heating systems in buildings – Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies – Part 2-1: Space heating emission systems. – Brussels: CEN, 2007. – 42 p.

165. ДСТУ Б EN 15316-2-1:2011. Системи теплозабезпечення будівель. Методика розрахунку енергопотреби та енергоефективності системи. Частина 2-1. Тепловіддача системою опалення (EN 1531621:2007, IDT) – [Чинний з 01.01.2013]. – К. : УкрНДІводоканалпроект, 2012. – 43 с. – (Державний стандарт України).

166. EN 15243. Ventilation for buildings – Calculation of room temperatures and of load and energy for buildings with room conditioning systems. – Brussels : CEN, 2007. – 158 p.

167. Конструкції будинків і споруд. Конструкції зовнішніх стін з фасадною теплоізоляцією. Класифікація й загальні технічні вимоги : ДСТУ Б В.2.6-34:2008 . - Чинні з 2009.06.01. - К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2009. - 12 с. – (Національний стандарт України).