МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
Науково-навчальний інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра теплофізики, молекулярної фізики та енергоефективності

Пояснювальна записка
до дипломної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем «магістр»

«ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ У СКЛОПАКЕТАХ»

Виконав: студент ІІ курсу, групи НФ-62
Дмитро ХОРОШУН
Спеціальність:
105 Прикладна фізика та наноматеріали
Керівник:
к.т.н., доцент Костянтин МЯГКОХЛІБ
Рецензент:_____

Харків – 2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра теплофізики, молекулярної фізики та енергоефективності
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) магістр
Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о. завідувача кафедри

_____ Ольга ЛІСІНА
підпис
"____"_____2021 року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Хорошун Дмитро Олександрович

1.Тема роботи «Дослідження процесу теплопередачі в склопакетах»

керівник роботи: Мягкохліб Костянтин Борисович к.т.н., с.н.с.

затверджені наказом по університету від «30» вересня 2021 року №0210-05/1959

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Перелік питань, які потрібно розробити:

огляд сучасних конструкцій склопакетів, аналіз їх переваг та недоліків; опис процесу теплопередачі в склопакетах в аналітичній формі; розрахунок процесу теплопередачі в склопакетах обраних конструкцій; моделювання процесу теплопередачі в склопакетах обраних конструкцій; порівняння результатів розрахунків.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Вибір, узгодження, та затвердження теми кваліфікаційної роботи
2	Огляд сучасних конструкцій склопакетів, аналіз їх переваг та недоліків
3	Опис процесу теплопередачі в склопакетах в аналітичній формі
4	Розрахунок процесу теплопередачі в склопакетах обраних конструкцій
5	Моделювання процесу теплопередачі
6	Порівняння результатів розрахунків, висновки.

5.**Дата видачі завдання _____**

Студент _____ Дмитро ХОРОШУН
підпис

Керівник роботи _____ Костянтин МЯГКОХЛІБ
підпис

Перелік скорочень та абревіатур

ККД – коефіцієнт корисної дії.

ПВХ – Полівінілхлорид.

Low-E – низька випромінювальна здатність.

VLT – коефіцієнт пропускання видимого світла.

SHGC – коефіцієнт збільшення сонячного тепла.

Hard-Coat – пасивне нізкоемисійне покриття.

Smart Glass – розумний склопакет.

Micro-Blind – мікро-жалюзі.

ААУ – Асоціація американських університетів.

Одн.кам. с. – Однокамерний склопакет.

Дв. кам. с. – двокамерний склопакет.

Навк. сер. – навколишнє середовище.

Внут. – внутрішня.

Енергоеф. – енергоефективний.

ДБН – Державні будівельні норми і правила.

Фотохром – фотохромний.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра виконана Хорошуном Дмитром Олександровичем на тему: Дослідження процесу теплопередачі у склопакетах.

Об’єктом дослідження дипломної роботи є склопакети різних конструкцій.

Предметом дослідження є процес теплопередачі.

Мета полягає у дослідженні теплопередачі в склопакетах різних конструкцій, їх порівнянні та аналізу енергоефективності.

У роботі розглядалися різноманітні типи конструкцій склопакетів, з яких були обрані кращі, за показниками енергоефективність, ціна, варіанти: однокамерний і двокамерний склопакети з наповненням повітрям та аргоном і фотохромним напиленням. Проведено розрахунки коефіцієнтів теплопередачі однокамерного та двокамерного склопакетів з різним наповненням, тепловий потік Q, щільність теплового потоку q та опір теплопередачі R для обраних конструкцій. Визначено тепловтрати та теплове надходження для обраного інтервалу температур. Побудовано графіки залежності вказаних параметрів від температури зовнішнього середовища. Змодельовано процес теплопередачі в однокамерних і двокамерних склопакетах з наповненням повітрям та аргоном. Результати моделювання співпадають з результатами розрахунків. За результатами проведених досліджень можна зробити висновок, що найкращі за параметрами енергоефективність/ціна одно та двокамерні склопакети заповнені аргоном та з фотохромною плівкою.

Кваліфікаційна робота магістра містить: 103 сторінки, 32 рисунка, 11 таблиць, 51 джерело.

Ключові слова: енергоефективність, склопакет, теплопередача, тепловіддача, передача тепла.

РЕФЕРАТ

Квалификационная работа магистра выполнена Хорошуном Дмитрием Александровичем по теме: Исследование процесса теплопередачи в стеклопакетах.

Объектом исследования дипломной работы есть стеклопакеты различных конструкций.

Предметом исследования является процесс теплопередачи.

Цель состоит в исследовании теплопередачи в стеклопакетах различных конструкций, их сравнении и анализе энергоэффективности.

В работе рассматривались различные типы конструкций стеклопакетов, из которых были выбраны лучшие по показателям энергоэффективность, цена, варианты: однокамерный и двухкамерный стеклопакеты с наполнением воздухом и аргоном и фотохромным напылением. Произведены расчеты коэффициентов теплопередачи однокамерного и двухкамерного стеклопакетов с разным наполнением, тепловой поток Q, плотность теплового потока q и сопротивление теплопередачи R для выбранных конструкций. Определены теплопотери и тепловое поступление для выбранного интервала температур. Построены графики зависимости указанных параметров от температуры внешней среды. Смоделирован процесс теплопередачи в однокамерных и двухкамерных стеклопакетах с наполнением воздухом и аргоном. Результаты моделирования совпадают с результатами расчетов. По результатам проведенных исследований можно заключить, что лучшие по параметрам энергоэффективность/цена одно и двухкамерные стеклопакеты заполнены аргоном и с фотохромной пленкой.

Квалификационная работа магистра содержит: 103 страницы, 32 рисунка, 11 таблиц, 51 источник.

Ключевые слова: энергоэффективность, стеклопакет, теплопередача, теплоотдача, теплопередача.

ABSTRACT

Qualification work of the master is executed by Khoroshun Dmitry Alexandrovich on a subject: Research of process of heat transfer in double-glazed windows.

The object of research of the thesis is double-glazed windows of different designs.

The subject of research is the process of heat transfer.

The aim is to study the heat transfer in double-glazed windows of different designs, their comparison and analysis of energy efficiency.

The paper considers various types of double-glazed windows, from which the best, in terms of energy efficiency, price, options were selected: single-chamber and double-chamber double-glazed windows filled with air and argon and photochromic spraying. Calculations of heat transfer coefficients of single-chamber and double-chamber double-glazed windows with different filling, heat flow Q, heat flux density q and heat transfer resistance R for selected structures are calculated. Heat losses and heat input for the selected temperature range are determined. Graphs of dependence of the specified parameters on ambient temperature are constructed. The process of heat transfer in single-chamber and double-chamber double-glazed windows with air and argon filling is modeled. The simulation results coincide with the calculation results. According to the results of the research, it can be concluded that the best in terms of energy efficiency / price single and double-glazed windows are filled with argon and with photochromic film.

The master's thesis contains: 103 pages, 32 figures, 11 tables, 51 sources.

Key words: energy efficiency, double-glazed windows, heat transfer, heat transfer, heat transfer.

ЗМІСТ

ВСТУП 9
1. СКЛОПАКЕТИ ТА ЇХ ТИПИ 12
1.1. Однокамерні склопакети. Їх переваги перед вікнами з одинарним склінням. 12
1.2. Двокамерні та трикамерні склопакети. 18
1.3. Енергоефективні склопакети 32
1.4. Смарт склопакети. Електричні склопакети. Склопакети з різноманітним наповненням. 35
2. ПЕРЕДАЧА ТЕПЛА ЧЕРЕЗ КОНСТРУЦКЦІЇ СКЛОПАКЕТІВ 47
2.1. Енергоефективність, тепловтрати та теплопередача. 47
2.2 Приклад розрахунку теплопередачі в віконних конструкціях 52
3. ОПИС МОДЕЛІ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ 69
3.1. Розрахунок теплопередачі через багатошарову пласку стінку 69
3.2. Моделювання процесу теплопередачі 87
ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА 97

ВСТУП

Актуальність:

Енергоощадність – діяльність (організаційна, науко-ва, практична, інформаційна), яка спрямована на раціональне використання та економне витрачання первинної та перетвореної енергії і природних енергетичних ресурсів в національному господарстві і яка реалізується з використанням технічних, економічних та правових методів [1].

Пасивний будинок – це будівельний стандарт, який по-справжньому енергоефективний, зручний і в той же час екологічний. Пасивні будинки дозволяють економити енергію, пов'язану з опаленням і охолодженням, до 90% в порівнянні зі звичайним будівлями [2]. Пасивні будинки також хвалять за високий рівень комфорту. Вони використовують джерела енергії всередині будівлі, такі як тепло тіла від жителів або сонячне тепло, яке надходить в будівлю, що значно спрощує опалення. Відповідні вікна з хорошою ізоляцією і оболонка будівлі, що складається з добре ізольованих зовнішніх стін, даху та плити перекриття, зберігають тепло в будинку взимку і захищають його влітку.

Енергоефективний будинок краще обігрівається чи охолоджується чим є максимально комфортним для людини. Досягнення енергоефективності будинка заощаджує гроші на комунальні послуги та підвищує комфорт для особи, яка перебуває в середині нього. Ізоляція, розташування і матеріали, що використовуються при будівництві є складовою енергоефективності будинку. Місцями де теплова енергія має найбільші свої втрати є стеля, підлога, стіни та вікна [3]. **Енергозберігальні (енергоефективні) заходи** – заходи, спрямовані на впровадження та виробництво енергоефективних продукції, технологій та обладнання [4]. Скло в вікнах, які використовуються в різних будівлях, також має вирішальне значення з точки зору енергозберігальних заходів. При виборі між вікнами з однокамерним або двокамерним, трикамерним, з різним напиленням і так далі, важливо знати відмінності між цими варіантами і який з них має найменші теплові втрати, що нас і цікавить в даній роботі.

Одиночне засклене вікно будується з використанням єдиного скління. Це означає, що єдине, що відокремлює будинок від зовнішнього середовища – це віконне скло. Типове віконне скло становить від 3 до 10 мм, що не забезпечує потрібної ізоляції, одне засклене вікно є до 20 разів менш ефективним, ніж ізольована стіна, при підрахунках втрати чи зберігання енергії [5].

У вікнах з подвійним склінням використовуються дві окремих частини скла, розділених вакуумом, повітрям, певною рідиною та різними газами. Інша назва – вікно з однокамерним склопакетом. Вакуумний шар діє як ізолюючий бар'єр. Скло, що використовується може бути ламінованим або тонованим під ультрафіолетове випромінювання, але в іншому воно схожа на скло, яке використовується у вікнах з одинарним склінням. Коли подвійне скління встановлюється на існуючу віконну установку, тепловий ККД може бути поліпшений до 80%. Заводські вікна з подвійним склінням можуть бути на 100% ефективніше, ніж їх аналог з одинарним склінням [5].

Найбільш очевидною перевагою від вікон з подвійним склінням є підвищення енергоефективності. Це означає, що в будівлі буде постійно стабільна температура. Це має велике значення для приміщень з кондиціонерами або будівель з власними системами опалення. Без подвійного скління тепловтрати набагато більші. Це означає, що внутрішня система регулювання комфортної умови повітря змушена працювати більше, щоб підтримувати відповідну температуру у приміщенні.

Завдяки склопакету втрати тепла в оптимальних умовах можуть бути зменшені вдвічі. У поєднанні зі спеціальним напиленням, електопідігрівним приладом або наповненням спеціальним газом чи рідиною склопакета, втрати тепла стають ще менше. З часом вікна зі склопакетом повинні окупитися за рахунок зниження витрат на електроенергію та опалення.

На сьогоднішній час майже всю площу огороджувальних конструкцій сучасних офісних будівель займають скляні склопакети. Дослідження

теплопередачі в склопакетах і розрахунок тепловтрат через склопакети мають велике практичне значення і дуже актуальні.

Мета:

Дослідження теплопередачі в склопакетах різних конструкцій, їх порівняння та аналіз енергоефективності.

Задача:

Дослідження процесу теплопередачі через різноманітні конструкції склопакетів.

Предмет дослідження:

Процес теплопередачі

Об’єкт дослідження:

Склопакети різник конструкцій.

Методи дослідження:

В даній роботі використані методи фізичного та математичного моделювання, зокрема методи теплотехнічного розрахунку огороджувальних конструкцій, коефіцієнтів їх теплових втрат та теплового балансу.

Науковою новизною кваліфіцкаційної роботи є те, що уперше проаналізовані, розраховані та смодельовані результати процесу теплопередачі у обраних типах конструкцій: однокамерний склопакет та двокамерний склопакети з наповнювачем у вигляді: повітря, аргон та фотохромне покриття.

1. СКЛОПАКЕТИ ТА ЇХ ТИПИ

1.1. Однокамерні склопакети. Їх переваги перед вікнами з одинарним склінням.

Соціологічні опитування показують, що громадяни, які мають за мету встановити пластикові вікна, часто не знають, що таке склопакет, і плутають його з звичайним вікном з одним склом (Рис. 1.1.). Потрібно звертати увагу при виборі віконного профілю на те, що в нього буде вставлятися. Одинарне скління – це класичне вікно, в раму якого вставлене одинарне скло. Це найпростіший варіант конструкції, що найменше захищає від холоду і шуму.



Рисунок 1.1. Вікно з одинарним склінням.

Для заощадження коштів на опаленні потрібно в будівлі замінити вікна з одним склом бо вони не запобігають втраті тепла. Дані вікна утворюють конденсат, особливо взимку. Протягом століть в віконних інсталяціях використовувалося одинарне скло. В даний час вони використовуються рідше.

Це тому, що його недоліки переважують гідності. Звичайне скло, яке використовується для вікон, має товщину від 3 мм до 10 мм [5]. Дані пункти є проблемою через:

– відсутність ізоляції. Рівень теплоізоляції, який передбачений у вікнах з одинарним склінням, практично відсутній. Рано чи пізно зовнішнє середовище почне впливати на температуру всередині. Рівень забезпечення ізоляції досить обмежений;

– немає захисту від шуму. Оскільки вікно складається тільки з одного скла, будь-який шум, створюваний зовні або поблизу, буде легше проникати через нього. Ось чому воно не буде ізолювати від шуму, виробленого зовні;

– міцність. Вони менш міцні. Їх легко зламати. Вони можуть розбитися при ударі. Тому рівень безпеки відрізняється від однокамерного склопакета [5].

Одинарне скління безумовно мало свою мету в той час, коли інших варіантів не було. Але в культурі, яка усвідомлює необхідність економії енергії для зменшення вуглецевого сліду або просто рахунків за електрику, одинарне скління більше не має сенсу.

Замість одинарного скління у вікнах, щоб уникнути проблем які йому присутні, можна використати склопакет. Склопакет об'єднує декілька шибок в єдину віконну систему. Більшість склопакетів мають два скла, які стають все більш поширеними через більш високі витрати на електроенергію та опалення. Шибки в склопакетах розділені прокладкою і нерухомим шаром повітря або газу. Потім скло вставляється в віконні рами, які стають ширшими відносного звичайного вікна, щоб вмістити в себе два скла.

Вікна ПВХ мають різний колір, профіль, форму, матеріал, розміри і так далі. Будь яке вікно може мати відповідний склопакет: однокамерний, двокамерний, трикамерний, з електричним підігрівом скла, з різним напиленням, заповнення різними рідинами і газами. Якщо будівля знаходиться

в країні де 12 місяців на рік тримається висока температура, то там ідеальним варіантом є однокамерне пластикове вікно.

Отже, як вже зазначалось в даній роботі однокамерний склопакет (Рис.1.2) складається з двох з'єднаних між собою шибок, які відокремлені один від одного повітряним прошарком або чимось іншим. Причина, по якій це скло найбільше підходить для жарких країн, полягає в тому, що воно не має сильних ізоляційних властивостей. Також однокамерний склопакет має відносно невелику вагу, що продовжує термін служби віконної конструкції, оскільки не навантажує фурнітуру і стіни, та в деяких випадках дає змогу встановити його самостійно. Сама головна перевага однокамерного склопакету в тому, що він найдешевший та самий розповсюджений вид склопакетів в світі, і в той же час має чудову функціональність. Звичайний однокамерний склопакет має одну повітряну камеру та два стекла. Прошарок дозволяє зберігати тепло в будівлі, запобігаючи проникненню холодного повітря. Герметичний повітряний зазор між двома листами скла діє як додатковий шар ізоляції. Влітку подвійне скління має ефект запобігання потрапляння небажаного тепла в будинок, взимку навпаки. Ця додаткова ізоляція знижує залежність користувача від штучних обігрівачів і кондиціонерів і може в кінцевому підсумку знизити витрати на електроенергію. Однокамерний склопакет також зменшує конденсацію, яка може привести до нездорового утворення цвілі. Такі склопакети з пластикових вікон вже давно монтуються у житлових приміщеннях, але мають ряд недоліків, наприклад, такі як погана звукоізоляція та теплоізоляція. Ця система складається з наступного: два скла по 4 мм і повітряний зазор між ними 16 мм, разом 24 мм, є конструкції з відхиленням від цього стандарту – 18 або 36 мм [6]. Для з'єднання скла використовується спеціальний алюмінієвий профіль. Дані склопакети полегшують потраплянню світла в приміщення.



Рис.1.2. Однокамерний склопакет

Однокамерні склопакети не мають великої термостійкості, але іноді їх установка доцільна і вигідна. Застосування однокамерних вікон:

– Лоджія або балкон. Коли немає необхідності утеплювати лоджію, тобто виносити додаткові батареї і проводити утеплення, то її можна обладнати цільним склопакетом. У цьому випадку між головним вікном і вікном лоджії буде розташовуватися простір, який буде додатковою камерою. Таким чином, незалежно від того, засклений балкон / лоджія на одне або два скла, температура буде однаковою.

– Дача. Тут використовують однокамерний і двокамерний склопакети. Різниця при установці в заміському будинку буде очевидна. Пластикові вікна коштують не вище дерев'яних рам, але їх можна придбати по зазначених розмірах. Тому для дачі такі вікна (однокамерні) - найоптимальніший варіант. Восени при включенні опалювального приладу вони збережуть тепло не гірше за своїх дерев'яних побратимів.

– Тераса. Часто таке приміщення навіть в капітальному будинку не утеплено і не має опалення, тому дуже до речі буде багатошаровий склопакет. При цьому пластикові конструкції відмінно вписуються в образ будь-якого приміщення.

– Вікна з одним склопакетом бажано встановлювати в південних регіонах, де найсуворіші зими супроводжуються морозами не менше 10 градусів [6].

Дивлячись на переваги склопакета, можна зрозуміти, що їх досить багато.

Деякі з причин, за якими вікна з подвійним склінням краще, ніж вікна з одинарним склінням, включають:

– правильна ізоляція. Одним з основних переваг склопакетів є ізоляційний шар, який знаходиться між двома шибками. Він може бути вакуумним або заповненим інертним газом. В обох випадках він діє як бар'єр між зовнішніми елементами погоди і навколишнім середовищем всередині;

– таким чином, рівень ізоляції, який забезпечують склопакети, знаходиться на більш високому рівні. Це гарантує, що температура всередині в значній мірі захищена від погодних умов ззовні. Таким чином, коли ви опалюєте свій будинок взимку, температура всередині не сильно впаде за допомогою ізоляційного шару вікон;

– енергоефективність. Як вище наводилось в даній роботі, системі опалення та кондиціювання повітря в будівлі легше підтримувати належну температуру незалежно від погоди на вулиці. Це тому, що внутрішнє скло не відповідає температурі, яка переважає в навколишньому середовищі. Воно

контактує з повітрям всередині і має температуру близьку до кімнатної. Це гарантує, що системам які підтримають комфортну температуру не доведеться працювати надмірно;

– коли система контролю теплових умов здатна легко підтримувати температуру, термічний ККД збільшується. У міру збільшення теплового ККД будинку енергія, необхідна для підтримки температури, зменшується. Це може допомогти заощадити на експлуатаційних витратах, а також на витратах на електроенергію;

– без конденсації. Ізоляційний шар всередині склопакету у вікнах також запобігає утворенню конденсату. В результаті є можливість легше підтримувати бажані кліматичні умови в будинку. З використанням склопакету особа всередині приміщення гарно почувається;

– зниження шуму. Якщо персона проживає на жвавій вулиці, склопакети вам практично необхідні. Вікна з подвійним склінням допомагають знизити шум зовні. Це гарантує, що у будинку буде тиха і спокійна атмосфера. Шум руху механічних транспортних засобів, а також будь-якої іншої роботи, яка ведеться поблизу, в більшій мірі усувається за рахунок додаткової теплоізоляції, яка може бути забезпечена вікнами з склопакетом;

– більш високий запас міцності. Завдяки додатковому склу ці вікна набагато безпечніші від звичайних. їх складніше зламати. Більш того, вони можуть витримувати і більш сильні удари. Для ще більшої безпеки можна вставити в склопакет загартоване або багатошарове скло [6].

Таким чином ці вікна досить зносостійкі та мають великий запас міцності.

Отже з досліджень та перерахованих вище факторів між одинарним склінням і однокамерним склопакетом випливає те, що вікна з подвійним склінням мають кращі характеристики.

1.2. Двокамерні та трикамерні склопакети.

Вибір правильного скління – це великі інвестиції в зменшення тепловтрат будівлі, тому, не буде зайвим розглянути та взяти до уваги вікна з двокамерним склопакетом та трикамерним склопакетом.

Вікна з двокамерним склопакетом (Рис. 1.3.) стають все більш популярним варіантом на сьогоднішньому ринку, але забудовники все ще думають про реальну вигоду з цих вікон, та чи зможуть вони переважити передбачувані витрати.



Рисунок 1.3. Двокамерний склопакет.

Вікна з потрійним склінням коштують приблизно на 20% більше, ніж з подвійним, що дає сумніви для його використання [7]. Інженери, які захищають дану модель склопакету підкреслюють, що в першу чергу мова йде про якість і комфорт, і що забудовникам слід розглядати двокамерний склопакет з тих же причин, за якими вони встановлюють підлоги з підігрівом.

Двокамерний склопакет складається з трьох шибок всередині герметичної рами, так само як однокамерний склопакет складається з двох плашок скла. Між кожним склом знаходиться кишеня з повітрям або інертним газом, наприклад аргоном; аргон важчий за повітря і працює як ізолятор як шуму, так і тепла.

Третє скло, розташоване на півдорозі між внутрішнім і зовнішнім склом двокамерного склопакета, створює два повітряних замкнутих середовища, які покращують енергетичні характеристики звичайного склопакета приблизно на 50% [7].

Енергоефективність додатково підвищується за рахунок таких змінних, як тип повітря або газу, що використовується в просторі між шибок, теплових крайових розпірок по периметру для зменшення теплових містків і різних покриттів на склі для зменшення втрат енергії зсередини. Самі рами також мають великий вплив на загальні характеристики (а також на ізоляцію). Треба звертати увагу на ізольовані каркаси з гарною герметичністю.

Приблизний і готовий метод порівняння енергоефективності вікон полягає в використанні вимірювання значення теплових втрат Q (1.1) точно так, як це застосовується для стін, підлоги і даху будинка [8].

$$Q = U \times A \times \Delta t \tag{1.1}$$

де Q – це теплові втрати,

U – загальний коефіцієнт теплопередачі,

A – площа,

Δt – різниця температур в приміщенні та зовні.

Виробники скла оволоділи мистецтвом нанесення покриттів і тонування скла за допомогою всіляких видів обробки, які можуть утримувати тепло, небажані ультрафіолетові випромінювання від сонячного світла, зменшувати відблиски і навіть самоочищатися. Кінцевий результат цієї скляної інженерії означає, що коефіцієнт теплопровідності скління різко знизився:

– Вікна з одинарним склінням можуть мати коефіцієнт теплопровідності близько 5,0-6,0 Вт / м² [9].

– Вікна з одинарним склопакетом раніше набирали більше 3 балів, а тепер досягають 1,4. В результаті цих поліпшень у виробничому процесі будівельні норми і правила тепер наполягають, щоб будь-яке вікно, яке встановлюється сьогодні, повинно мати значення теплопровідності (λ) не гірше 1,6.

– Стандарт пасивного будинку вимагає вікна з потрійним склінням із значенням λ не більше 0,8, але є деякі постачальники, які заявляють, що досягають усього 0,5 [10].

Значення λ, необхідне для стін, в даний час складає менше 0,3, тому можна спостерігати, що вікна залишаються слабкими місцями в загальній тепловій ефективності захисної конструкції будівлі. Звідси величезний тиск з метою ще більшого поліпшення характеристик склопакетів [10].

Хоча вікна з двокамерним склопакетом довгий час мали репутацію майже вдвічі дорожчих, ніж однокамерні пакети, деякі європейські виробники настільки зайняті створенням вікон з потрійним склінням для своїх європейських клієнтів, що створювати однокамерні склопакети для них вже втрачає інтерес.

Економія енергії при переході з однокамерного склопакета на двокамерний склопакет значна, але різниця між значенням λ, скажімо, 1,4 Вт / м² (подвійне скління) і близько 0,8 Вт / м² (потрійне засклення) набагато менше і становить, можливо, 5% від поліпшення загальних енергетичних показників нового будинку (зазвичай на вікна припадає близько 20% загальних теплових

втрат.) Якщо перевести цю економію в гривні при переході на двокамерний склопакет то приблизною економією буде від 800 до 1600 гривень за рік на рахунках по опаленню, де за стандарт береться будівля площею біля 100 м^2 [10].

Проте, підвищення енергоефективності є значним і добре відомим фактором для всієї конструкції так званого пасивного будинку (будинок з низьким рівнем енергоспоживання, що досягається за допомогою величини ізоляції, розмірів і орієнтації вікон, деталей з'єднання, матеріалів та схеми будівлі), де рахунки за електроенергію складають всього 4400 гривень на рік, що більш ніж достатньо, щоб окупити початкові інвестиції після декількох років.

Ключові переваги двокамерного склопакету дійсно пов'язані з комфортом. Якщо при утепленні стін, даху і підлоги будинку та не звертати уваги на скління, в кінцевому підсумку це призведе до отримання холодних точок навколо вікон в нічний час, які викликають протяги, відводять тепло від особи, яка знаходиться біля вікна, і в результаті потоки конденсату стікають по склу, а сам конденсат може визивати грибкові нарости на площах навколо віконної конструкції.

Таким чином, по суті, стандарт скління повинен відповідати стандарту ізоляції в інших частинах будинку, щоб утеплення навколо та всередині будівлі працювало стабільно.

Плюси двокамерного склопакету:

– рівні теплового комфорту. При порівнянні вікон з однокамерним та двокамерним склопакетом, вікна з двокамерним склопакетом набагато кращі, тому що вони мають менші тепловтрати (температура поверхні сучасного енергоефективного вікна з подвійним склінням становить 16 °С в кімнаті, нагрітої до 21 °С, де двокамерний склопакет може забезпечити 18 °С);

– акустичні характеристики і зниження шуму. Склопакети можуть досягати акустичних характеристик в діапазоні звукоізоляції (Rw) 32 дБ. Ці

характеристики можуть бути покращені до низьких 40 дБ за допомогою деяких типів двокамерних склопакетів;

– знижений ризик конденсації. Більш низькі значення λ біля вікон з двокамерним склопакетом допомагають звести до мінімуму проблеми внутрішньої конденсації, оскільки тепло утримується всередині будівлі і зазвичай запобігає реакції холодної зовнішньої температури з внутрішнім теплим повітрям, що звичайно призводить до конденсації. (Однак основною причиною внутрішньої конденсації є високий рівень внутрішньої вологості (сушильні барабани (пральна машина) / вологі приміщення по типу ванних кімнат чи підвалів і відсутність належної продувки / вентиляції повітря)) [10].

Негативні фактори двокамерного склопакету:

– Більша ціна.

– Їх більш важкі рами можуть пошкодити стіни, якщо вони не підтримуються належним чином.

– Вони повинні бути встановлені герметично інакше їх продуктивність може бути знижена.

Вікна поводяться інакше, ніж стіни і дах, в тому сенсі, що, коли світить сонце, вони здатні поглинати тепло. Фактично, найкращі вікна з однокамерним склопакетом вже здатні вносити чистий внесок в теплопередачу протягом опалювального сезону. Навпаки, вікна з двокамерним склопакетом трохи знижують характеристики поглинання тепла вікна.

Щоб відобразити ці складності, Британська рада по рейтингах вікон розробила схему енергетичного маркування вікон від A до G (Рис. 1.4.) [11]. Найвищий рейтинг зарезервований для вікон, які, як вважається, поглинають стільки тепла, скільки і втрачають.



Рисунок 1.4. Схема енергетичного маркування вікон від A до G.

Поступово людство заохочують переходити з однокамерного склопакету на двокамерний склопакет. Це ще не досить помітно, але на сьогодні інженери прагнуть поліпшити енергоефективність вікон, і зараз наближається стадія, коли простого двокамерного склопакету вже буде недостатньо.

В умовах, коли уряди розвинених країн відчувають все більший тиск з метою скорочення викидів вуглекислого газу, а глобальне потепління стає все більш важливим для суспільної свідомості, в двадцять першому столітті потрібно прихильно ставитися до об'єктів нерухомості, які скорочують споживання енергії за рахунок конструкції або вдосконалених функцій (таких як вікна з відповідними склопакетами і двері).

Щодо переходу на двокамерні склопакети в металопластикових вікнах думки розділяються. Потрійне скління широко використовується в країнах з холодним кліматом, таких як Швеція і Норвегія, а стандарт пасивного будинку з наднизьким енергоспоживанням вимагає установку вікон з двокамерним склопакетом із значенням λ не більше за 0,8 [10]. Щоб Отримати вікно з таким низьким значенням λ, потрібно не тільки перейти на потрійний склопакет , а й

ізолювати саму віконну раму, а також використовувати більш дорогі технології виробництва – замість аргону, як правило, використовується газовий криптон в середині кишені.

Деякі вчені стверджують, що двокамерний склопакет просто не має сенсу в такому кліматі, як наш (помірний). Двокамерний склопакет дорожче у виробництві, однак прихильники потрійного скління схильні стверджувати, що це грубі розрахунки початкових витрат у порівнянні зі значеннями теплопровідності і рахунками за електроенергію. Великим плюсом потрійного скління є те, що воно додає нематеріальний фактор комфорту до життя в приміщенні в холодні місяці.

Подальшими інноваціями є виробництво вікон з трикамерним склопакетом (Рис. 1.5.). Однак є технічні проблеми з простим додаванням все більшої і більшої кількості шибок: не тільки утворюване вікно стає занадто важким, але і додаткове скло не дуже гарно пропускає світло. Фактично, з точки зору енергоефективності, може навіть бути її падіння, оскільки кількість сонячного світла, яке може поглинати вікно, зменшується.



Рисунок 1.5. Трикамерний склопакет

Трикамерні склопакети містять чотири високопродуктивних шара скла з трьома герметичними повітряними просторами, заповненими аргоном, або вакуумом між ними. З доданою шибкою дані вікна є серйозним оновленням в порівнянні з двокамерною віконної системою з точки зору ізоляції, теплопередачі та інших аспектів. Багатошарове скління підвищує тепловий комфорт (за рахунок зменшення низхідних конвекційних потоків, що прилягають до шибки), і може знизити викиди парникових газів за рахунок мінімізації потреби в обігріві та охолодженні. У різних країнах діють різні стандарти енергоефективності.

Метою законодавства про енергозбереження є регулювання відносин між господарськими суб’єктами, а також між державою і юридичними та фізичними особами у сфері енергозбереження, пов’язаної з видобуванням, переробкою, транспортуванням, зберіганням, виробленням та використанням паливно-енергетичних ресурсів, забезпечення заінтересованості підприємств, організацій та громадян в енергозбереженні, впровадженні енергозберігаючих технологій, розробці і виробництві менш енергоємних машин та технологічного обладнання, закріплення відповідальності юридичних і фізичних осіб у сфері енергозбереження [12].

Економічні заходи для забезпечення енергозбереження передбачають:

а) комплексне застосування економічних важелів та стимулів для орієнтації управлінської, науково-технічної і господарської діяльності підприємств, установ та організацій на раціональне використання і економію паливно-енергетичних ресурсів;

б) визначення джерел і напрямів фінансування енергозбереження;

{Пункт "в" частини першої статті 11 виключено на підставі Закону № 124-IX від 20.09.2019}

{Пункт "г" частини першої статті 11 виключено на підставі Закону № 124-IX від 20.09.2019}

д) введення відрахувань від вартості фактично використаних підприємствами паливно-енергетичних ресурсів;

{Пункт "е" статті 11 виключено на підставі Закону № 5463-VI від 16.10.2012}

{Пункт "є" статті 11 виключено на підставі Закону № 5463-VI від 16.10.2012}

ж) надання юридичним і фізичним особам субсидій, дотацій, податкових, кредитних та інших пільг для стимулювання розробок, впровадження

патентних винаходів та використання енергозберігаючих технологій, обладнання і матеріалів;

з) матеріальне стимулювання колективів та окремих робітників за ефективне використання та економію паливно-енергетичних ресурсів, впровадження розробок, захищених патентом [12].

Україна бере участь у міжнародному співробітництві у сфері енергозбереження на державному та громадському рівнях відповідно до законодавства України та міжнародного права [12].

Якщо міжнародними договором, укладеним Україною, встановлено інші правила, ніж ті, що передбачені законодавством України про енергозбереження, то застосовуються правила міжнародного договору [12].

{Частина друга статті 28 із змінами, внесеними згідно із Законом № 3260-IV від 22.12.2005}

Україна вживає заходів до розвитку та зміцнення міжнародного співробітництва з іншими державами у сфері енергозбереження та у рамках діяльності ООН і організацій, що входять до її системи, інших урядових і неурядових міжнародних організацій щодо розвитку енергетики та енергозбереження [12].

Чотиришарове скління може знадобитися для досягнення бажаного рівня енергоефективності в арктичних регіонах або для забезпечення більш високих коефіцієнтів скління в навісних стінах без збільшення втрат тепла взимку. Трикамерний склопакет дозволяє проектувати елементи скління будівлі без модульованого зовнішнього затінення від сонця, враховуючи, що низький коефіцієнт теплопередачі чотирьох або більше шарів скління дозволяє адекватно регулювати сонячне випромінювання безпосередньо за рахунок самого віконного скління. У країнах Північної Європи деякі існуючі будівлі з потрійним склінням модернізуються до чотирьох або більше шарів скління.

Бажане значення загального коефіцієнта теплопередачі вікна нижче приблизно 0,4 $Вт/(м^2К)$ можливо без необхідності залежати від модульованого

зовнішнього затінення [13]. Дослідження показали, що при таких низьких значеннях коефіцієнта теплопередачі вікна склопакет з помірним коефіцієнтом сонячного випромінювання працює порівняно з склопакетом з таким самим значенням коефіцієнта теплопередачі зі змінним зовнішнім затінюванням і високим коефіцієнтом сонячного випромінювання. Це відбувається тому, що з поліпшеними загальними показниками λ потреба будинку в опаленні знижується до такого ступеня, що одного лише сонячного тепла в зимовий період може бути досить для обігріву будівлі [13].

Через залежних від кута падіння відображень Огюстена Жана Френеля оптичні характеристики багатошарового скління також помітно змінюються в залежності від сезону. Оскільки середня висота Сонця змінюється протягом року, ефективне сонячне посилення влітку значно менше. Ефект в деякій мірі видно неозброєним оком (Рис. 1.6.) [13].

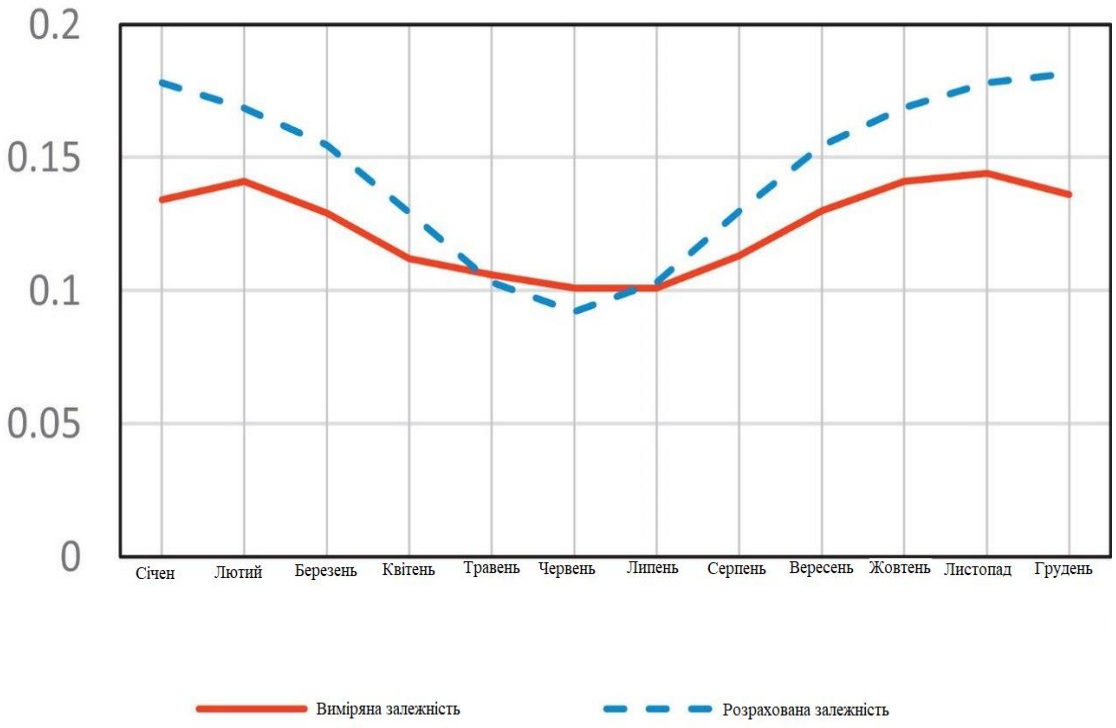


Рисунок 1.6. Виміряна і розрахована при безхмарному небі сезонна залежність прямого пропускання сонячної енергії в багатошаровому склопакеті.

Порівняно з традиційними вікнами з двокамерним або трикамерним склопакетом з механічною або структурною системою затримок, трикамерний склопакет облегшує огляд між внутрішнім та зовнішніми середовищем. Низьке значення λ підтримує температуру всередині вікна на більш рівномірному рівні протягом усього року [13]. Зимою спадні конвекційні потоки дуже малі, що дозволяє людям розташовуватись поряд з таким багатошаровим вікном, відчувати себе поруч із ним, так комфортно, як ніби вони сиділи би біля твердої стені (Рис. 1.7.). Звичайно, приховування або затемнення можуть знадобитися, наприклад, у конфіденційності.

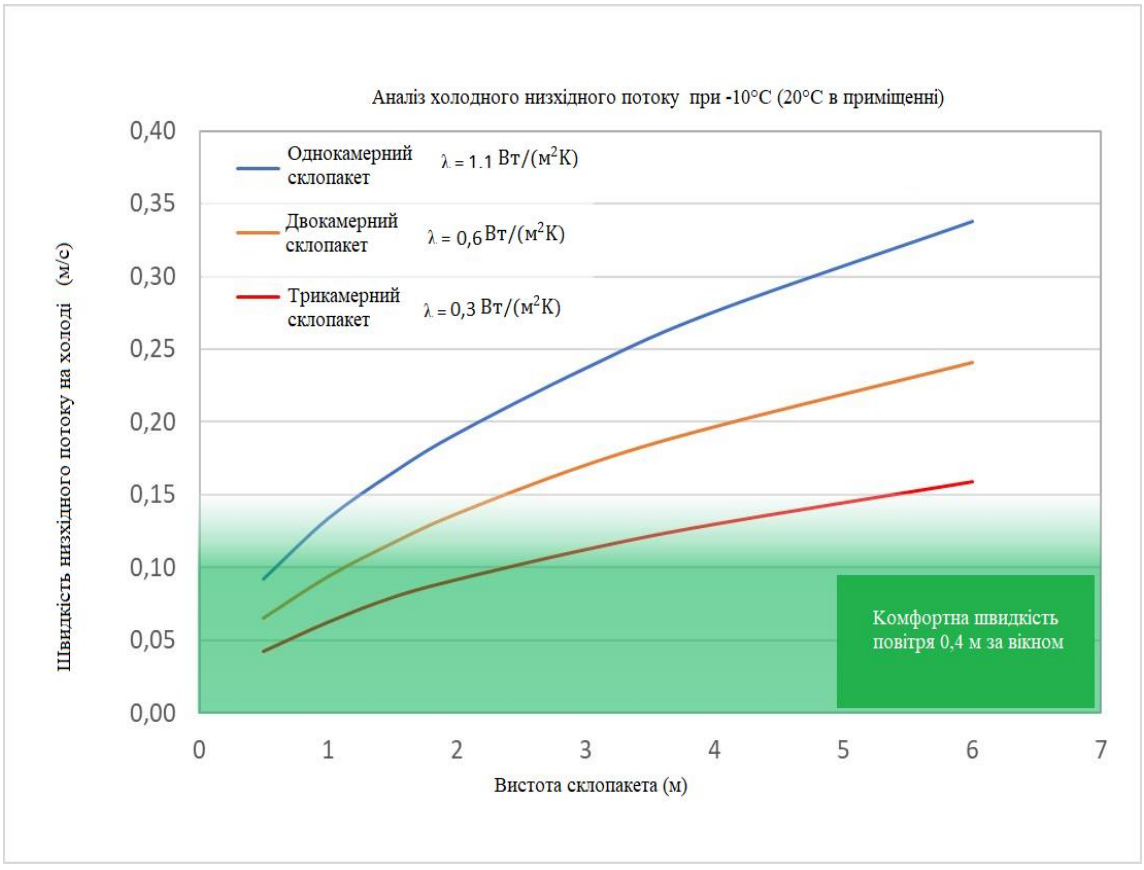


Рисунок 1.7. Аналіз холодного спадного потоку при багатошарових склопакетів відносно однокамерного склопакета

Треба дивитись на переваги і недоліки вікон з трьома камерами.

Плюси:

– вікна з трикамерним склопакетом мають кращі значення λ, ніж вікна з двокамерним склопакетом. Щоб проілюструвати це, потрібно створити візуалізацію, що вікна з 4 шибками можуть бути краще ізольовані, ніж стіна будинку або ізольовані гаражні ворота;

– подібні багатошарові вікна володіють ефективними звукоізоляційними властивостями. Це робить будинок тихіше, прибираючи небажаний шум і створюючи ідеальну атмосферу всередині нього;

– запобігає утворенню конденсату на вікнах при зимових температурах, зберігаючи кристально чистий вид на вулиці [13].

Недоліки:

– через необхідність використання чотирьох шибок вони, природно, більш важкі і вимагають більш жорстких і довговічних віконних рам. Як і слід було очікувати, складніша установка великих чотирикамерних склопакетів;

– вікна з трикамерним склопакетом може бути в два рази дорожче від вікон з двокамерним склопакетом, але вони можуть забезпечити тільки на 20% більше теплового опору [13].

Вікна з чотирикамерним склопакетом починають завойовувати ринок, але попереду ще довгий шлях. Виробники, установники і замовники зазнають сейсмічного зсуву, щоб встановити додаткову скляну панель. І справедливо те, що більш висока ціна може не влаштувати домогосподарства, які вже знайшли свою долю комфорту в інших віконних системах.

В дуже холодних географічних місцях, де ізоляція і енергоефективність просто не можуть бути порушені, вікна з трикамерним склопакетом – це те що потрібно. У той час як двокамерні склопакети також відмінно працюють в таких умовах, вікна з чотирма шибками дійсно закривають проблему, коли ртуть на термометрі різко падає.

Коли мова йде про звукоізоляцію і теплоізоляції будь якої будівлі, вибір правильної віконної системи стає дуже важливим. А оскільки технології розвиваються не по днях, а по годинах, дуже важливо зважити всі за і проти кожного варіанту і вибрати той, який добре відповідає потрібним характеристикам.

У той же час має сенс знати, що, хоча вікна з трьома і чотирма панелями дуже ефективні, вікна з двома панелями також можуть бути ефективні в багатьох випадках. І якщо зниження шуму є першочерговим завданням, вікна з різних шибок також є хорошим варіантом.

У склопакетах можна використовувати широкий спектр різних типів скла, таких як низькоемесійне і ламіноване, для подальшого підвищення енергоефективності та зниження рівня шуму. Низькоемесійне скло ще більше знизить кількість тепла, що виділяється, в той час як більш товсте ламіноване скло руйнує звукові хвилі, покращуючи акустичні характеристики.

Більш ймовірно, що майбутні розробки віконних технологій будуть розвиватися навколо нових покриттів або матеріалів з фазовим переходом, які поглинають тепло сонячного світла і виділяють його вночі.

Альтернативний варіант, який може мати більше сенсу – це повернутися до традиційної практики затягування штори на вікнах після настання темряви. Це може бути не технологічно в порівнянні з заскленими порожнинами, заповненими криптоном, але це щось на зразок природної звички, і це дійсно скорочує втрати тепла. Але, якщо серйозно, то можливо, прийшов час звернути увагу на поліпшення характеристик вже відомих нам склопакетів, замість того, щоб продовжувати проектувати склопакети з все більшою кількістю камер для досягнення все більш низьких значень λ.

1.3. Енергоефективні склопакети

Енергоефективний склопакет є гарантією зменшення тепловтрат через вікно. Скло з низьким коефіцієнтом випромінювання було створено для мінімізації кількості інфрачервоного і ультрафіолетового світла, що проходить через скло, без мінімізації кількості світла, що потрапляє в будівлю. Вікна з низькоемісійного скла мають мікроскопічно тонке покриття, прозоре і відображає тепло. Саме покриття має товщину меншу за людську волосину. Покриття Low-E підтримує постійну температуру в домі, відображаючи внутрішню температуру всередині.

За даними Центру освіти по склу Vitro (раніше PPG), існує кілька факторів, які використовуються для вимірювання ефективності скла з покриттями Low-E:

– коефіцієнт збільшення сонячного тепла (SHGC): це частка падаючого сонячного випромінювання, яке пропускається через вікно. Сонячне випромінювання може бути або безпосередньо передано і поглинено, або випромінюване всередину;

– λ-значення: це рейтинг, який присвоюється склопакету в залежності від того, скільки тепла воно допускає;

– коефіцієнт пропускання видимого світла (VLT): міра того, скільки видимого світла проходить через скло;

– світло / коефіцієнт посилення сонячного випромінювання: співвідношення між коефіцієнтом пропускання видимого світла вікна і його коефіцієнтом посилення сонячного випромінювання [14].

Типи низькоемісійних покриттів:

1) пасивне нізкоемисійне покриття (Hard-Coat): пасивне нізкоемисійне покриття виробляється з використанням піролітичного процесу, який створює піролітичне покриття. Потім покриття наноситься на флоат-скло, що змушує покриття «зплавлятися» з гарячою скляною поверхнею. Цей сплав створює міцний зв'язок або «тверде покриття», яке дуже міцно тримається;

2) Покриття Solar Control Low-E (Soft-Coat) (Рис. 1.8.): Покриття Solar Control Low-E виробляється з використанням процесу магнетронного розпилення з парової фази (MSVD), що означає, що покриття наноситься автономно на попередньо розрізане скло у вакуумній камері при кімнатній температурі. Це покриття, яке також називають «м'яким покриттям», необхідно герметизувати в склопакеті (IG). М'яке покриття має більш низький коефіцієнт випромінювання і чудові сонцезахисні характеристики. Це покриття забезпечує найвищий рівень захисту від сонячних променів [15].

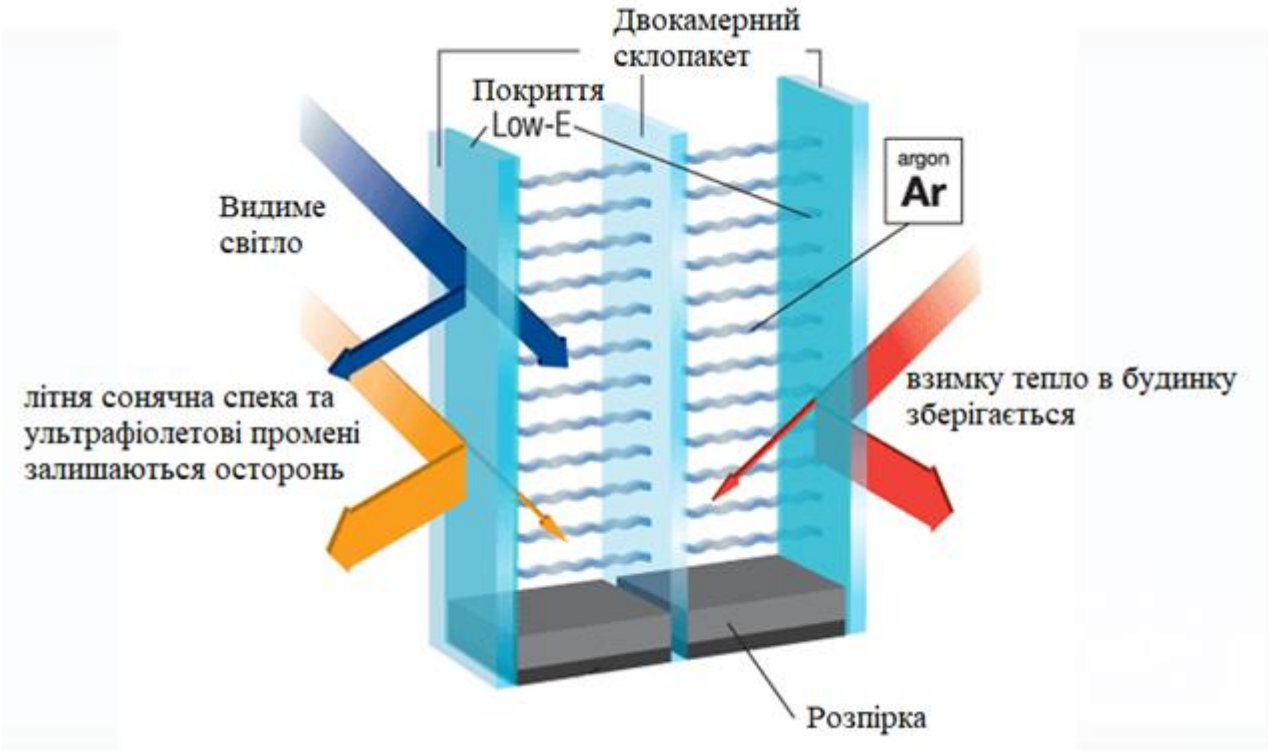


Рисунок 1.8. Склопакет з Low-E покриттям.

Для того, щоб зрозуміти який тип скла Low-E підходить для певного клімату, потрібно спочатку враховувати клімат цього регіону:

– якщо будівля знаходиться в дуже холодному кліматі, потрібно використовувати скло Low-E з твердим покриттям, тому що воно дозволяє

частині короткохвильовій інфрачервоній енергії сонця проходити через скло. Це допомагає обігріти забудову взимку і дозволяє склопакету відбивати довгу хвилю теплової енергію всередині приміщення;

– однак, якщо будівля знаходиться в помірному кліматі, в якому знаходиться майже вся територія Європи, найкраще підходить скло Low-E з м'яким покриттям, так як воно забезпечує кращий захист від ультрафіолету і має кращий загальний коефіцієнт теплопровідності. М'яке покриття Low-E також відбиває тепле і прохолодне повітря назад в кімнату де встановлений склопакет з даним покриттям, замість того, щоб пропускати його назовні.

1.4. Смарт склопакети. Електричні склопакети. Склопакети з різноманітним наповненням.

Смарт склопакети.

Розумний склопакет – це склопакет, в якому використовуються передові технології для блокування світла і ізоляції. На пропускні властивості світла через склопакет може впливати світло, тепло або електрика. В основному це означає, що скло змінюється з напівпрозорого на прозоре, блокуючи деякі, всі або певні світлові хвилі. Ця технологія може застосовуватися для управління освітленням, теплом і усамітненням в будинках, на підприємствах і в установах, таких, наприклад як лікарні або офісні забудови. Вони забезпечують більш чисте довкілля і пропонують більш високий і диференційований рівень контролю, ніж рішення, які потребують людських рук, такі як жалюзі, штори або ролети [16].

Типи технологій Smart Glass:

– електрохромний;
– фотохромний;
– термохромною;
– зважені частинки;
– мікро-жалюзі;
– полімерно-дисперсні рідкі кристали [17].

Електрохромний склопакет: як випливає з назви, ці пристрої змінюють властивості скла у відповідь на електричне напруження і, отже, дозволяють контролювати кількість переданого світла і тепла, як тільки бажаний рівень непрозорості встановлений, для його підтримки більше не потрібна електрика [18]. Ця зміна відбувається повільно, але налаштування можна змінити відповідно до власних уподобань. Вікна будівель, дзеркала заднього виду та музейні вітрини – це приклади того, як можна використовувати електрохромний розумний склопакет. Одним з недоліків технології є те, що вона може вплинути на довговічність скла.

Фотохромний склопакет (Рис. 1.9.): аналогічно електрохромному склопакету, на передачу світла через фотохромний склопакет впливає зовнішнє джерело, тільки на цей раз це ультрафіолетове випромінювання (але, зазвичай, на нього може впливати будь-яке світло достатньої інтенсивності), однак, на відміну від електрохромного склопакету, прозорість змінюється при зміні застосовуваного джерела світла [19]. Ця технологія дозволяє відмовитись від звичних штор або жалюзів, закриваючи вуличні сонячні промені, але в той же час вони чудово пропускають світло в кімнату.

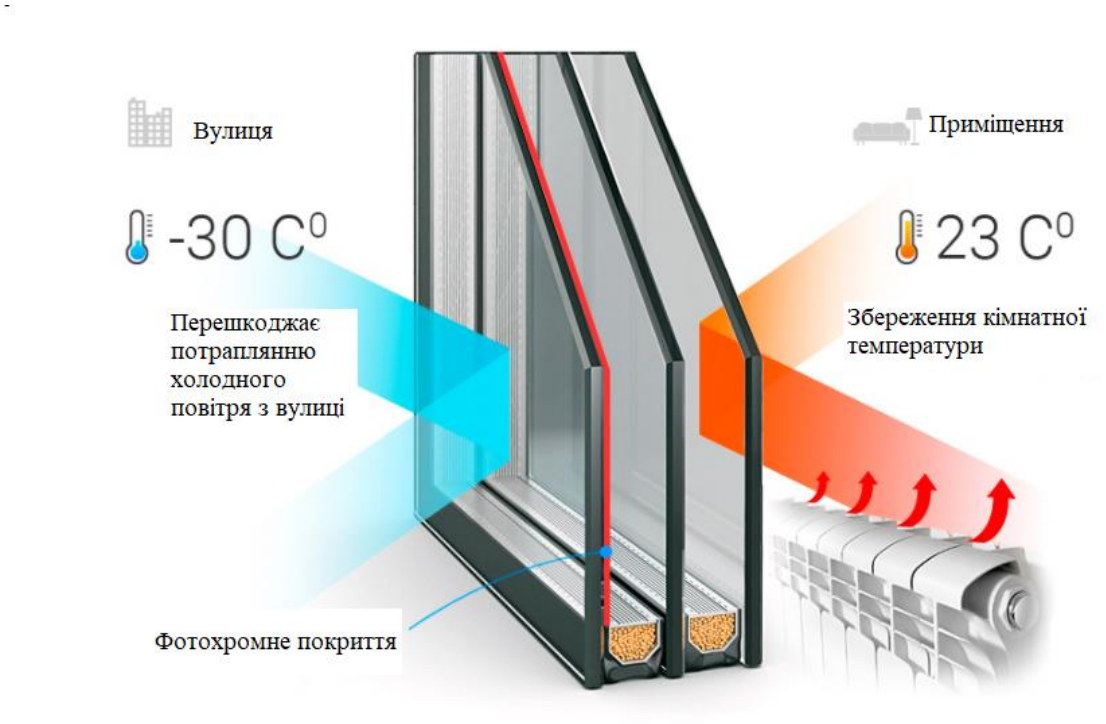


Рисунок 1.9. Фотохромний склопакет.

Термохромний склопакет: як стає зрозуміло з назви, прозорість термохромного скла змінюється при впливі тепла, ця зміна відбувається, коли зовнішня температура піднімається вище температури переходу і термохромний фільтр на склі активується, змінюючи відтінок на вікні всього за кілька хвилин [19]. Ця технологія блокує світло, тепло і відблиски, зберігаючи чіткий вид через скло.

Склопакет з зваженими частинками: для непрозорості наночастинки на цьому типі розумного склопакету розташовані випадковим чином, щоб блокувати і поглинати світло, коли подається електричне напруження, зважені частинки вирівнюються, дозволяючи світлу проходити [20]. Кількість світла, що проходить залежить від зміни напруги, що дає користувачеві повний контроль. Завдяки електричному перемиканню інтелектуального склопакету напругу можна контролювати за допомогою фотосенсорів, детекторів руху, додатків, інтеграції з комп'ютерними системами або регуляторів і перемикачів.

Смарт-склопакет Micro-Blind (мікро-жалюзі): за допомогою цього типу розумного склопакету можна управляти мікро-жалюзями (тонкі рулонні металеві жалюзі) – на склі за допомогою електричного току, коли немає напруги, жалюзі опускаються, і світло може проходити крізь них, коли подається електрика, між склом і жалюзями утворюється електричне поле, яке змушує жалюзі розгортатися і розпрямлятися, блокуючи світло [16]. Цей тип розумного скла також забезпечує рівень конфіденційності і може регулюватися, як звичайні жалюзі, для управління освітленням і налаштуваннями конфіденційності.

Полімерно-дисперсний рідкокристалічний склопакет: розчинені рідкі кристали на полімері або склі в цій технології тверднуть і утворюють краплі по всьому полімеру або скляному листу, оскільки кристали несумісні з іншими матеріалами, ці крапельки розсіюють світло і надають склу молочний відтінок [16]. Коли подається електричне напруження, рідкі кристали вирівнюються і пропускають світло, подібно склу з зваженими частинками. Цей тип розумного скла зазвичай використовується у ванних кімнатах, конференц-залах і в відділеннях інтенсивної терапії лікарень для забезпечення конфіденційності.

Електричні склопакети.

Електрообігрівний склопакет (Рис. 1.10.) – це особливий тип обробленого скла, на яке нанесено прозоре електропровідне покриття,

електричний струм проходить через кабелі на цьому покритті, виділяючи тепло і змушуючи скло випромінювати тепло [21].



Рисунок 1.10. Електрообігрівний склопакет.

Інтенсивність тепла може бути різною; це залежить від рішення користувача. Скло може бути одинарним багатошаровим або інтегрованим в подвійній або потрійний склопакет.

Склопакет з електричним обігрівом працює за допомогою випромінювання променистого тепла з електронним управлінням. Скло з електричним обігрівом є інтегрованим і невидимим рішення для обігріву будівлі. Це забезпечує підвищений візуальний і тепловий комфорт в приміщенні та значно зменшує тепловтрати у приміщенні. У той же час цей механізм вирішує структурні проблеми технічного обслуговування і видимості, пов'язані з конденсацією або снігом. Потреба в звичних нам теплових батареях та радіаторах може зникнути з встановленням даних склопакетів, плюсом до чого буде відсутність «холодних стін» та протягів. Зникає необхідність в

системі вентиляції, склопакет буде чистий і завжди прозори. Відсутність хімічного використання для танення снігу, зниження ризику пошкодження від снігопаду і льоду з дахів. Дані склопакети є ідеальним варіантом для будівель з низьким рівнем енергоспоживання.

Галузь застосування:

– альтернативне джерело обігріву квартири або будинку;
– тераси в ресторанах;
– вхідні групи дверей в торгових центрах;
– автономні плаваючі будинки;
– скляні дахи;
– теплиці.

Переваги Електросклопакета.

– Гартоване скло в чотири рази міцніше ніж звичайні.
– Обігрів в рази дешевше, ніж іншими електричними системами опалення.
– Економія на кондиціонуванні – скло не пропускає в будинок літню спеку.
– Скло витримує перепади напруги до 400В і нагрів до 300 ° С [21].
– Можливість підключення скла до охоронної сигналізації системи розумний будинок.
– Скло перешкоджає прослуховування приміщення, яке здійснюється за допомогою спрямованого лазерного променю.
– Не спалює кисень і не пересушує повітря.
– Корисний для людини ІЧ-обігрів в довгохвильовому діапазоні.
– Максимальне використання природного освітлення.
– Усунення точки роси – відсутність запотівання і конденсату.
– Швидкий і комфортний обігрів приміщення з можливістю відмови від радіаторів.

Склопакети з газами та рідинами.

Аргоновий склопакет (Рис. 1.11.) – це склопакет в якому між двума шибками в ізоляції знаходиться газ аргон, де аргон – це лише один головний компонент, який поліпшує ізоляційну здатність всього віконного блоку [22].

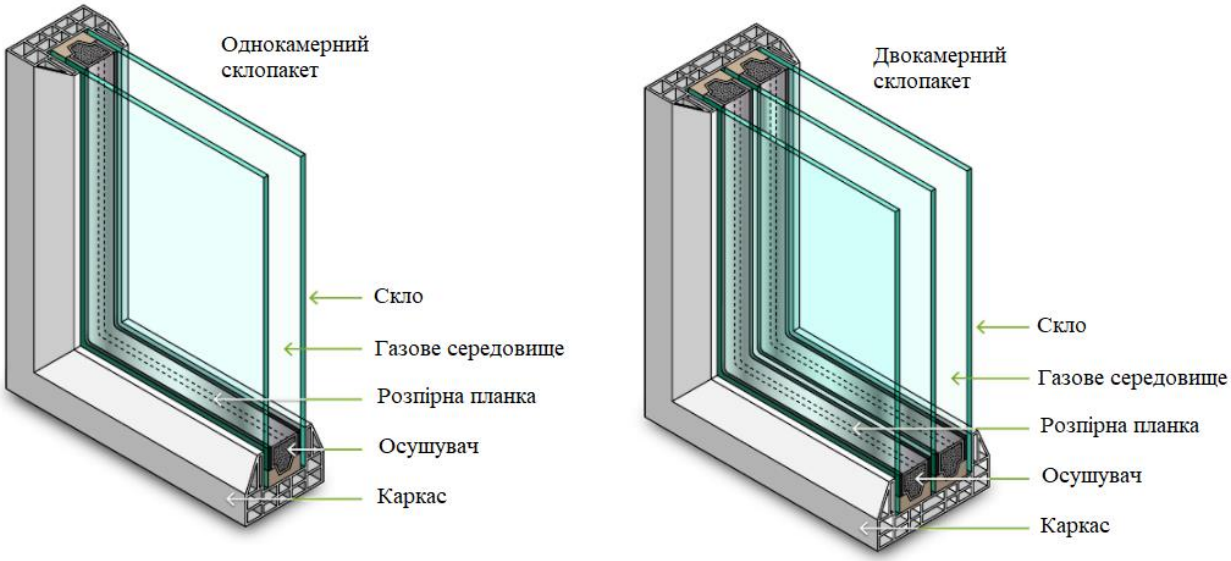


Рисунок 1.11. Склопакет з газовим наповненням

Газ аргон – це один з двох типів газів, часто використовуваних в склопакетах, інший – газ криптон.

Склопакети з аргоном виготовляються шляхом взяття двох (або трьох) шибок і введення газу між порожніми просторами. Додатковий компонент в склопакетах збільшує бар'єр між внутрішньою частиною будинку і зовнішнім середовищем. Аргон можна використовувати як в двокамерних, так і в трикамерних склопакетах.

Аргон – інертний газ. Він безбарвний, без запаху, стабільний (що означає, що він рідко вступає в реакцію з іншими хімічними речовинами) [23].

Завдяки цим характеристикам людство використовує благородні гази в різних галузях промисловості. Газ аргон нетоксичний, тому не дивно, що він присутній у багатьох повсякденних продуктах. Він є в лампочках і хладагентах.

Він також використовується в деяких харчових упаковках, щоб запобігти потраплянню вологи. Є деякі склопакети, які працюють тільки з повітрям. Через вміст кисню в цих вікнах може утворюватися конденсат. Вікна, заповнені газом аргоном - кращий спосіб уникнути цього.

Більшість склопакетів з аргоном містять комбінацію аргону і кисню (повітря). Аргон щільніше повітря і має коефіцієнт теплопровідності на 60% нижче повітря [24]. Через таку щільності передача тепла і холоду стає набагато складніше в склопакетах, заповнених аргоном.

Збільшення терміну служби вікон допомагає підвищити рентабельність інвестицій. Ізоляційні властивості газоподібного аргону забезпечують довгострокову перевагу в плані енергоефективності. Коефіцієнт сонячного тепла (SHGC) і λ-фактор оцінюють, наскільки добре вікно запобігає накопиченню тепла і передачі тепла чи холоду. Чим нижче рейтинг, тим краще ізоляційні властивості. Негерметичні вікна нікому не потрібні. У разі, якщо склопакет пошкоджено, то буде витік цінного газу. Аргон в склопакеті грає ключову роль в зниженні теплопередачі. Якщо він протікає, це означає, що ефективність вікна сильно падає. З естетичної точки зору просочування аргону означає, що між склом більше повітря, з чого випливає затуманення скла.

Аргон – інертний газ, який набагато щільніше атмосфери. Стабільність цього газу робить його придатним для використання в склопакетах - подвійних чи потрійних склопакетах. Більш щільний, ніж повітря, аргон уповільнює теплопередачу, щоб зменшити коливання температури в приміщенні [24].

Більшість теплових вікон заповнене газом аргоном або криптоном, але в деяких використовується комбінація цих газів і / або ксенону, азоту або кисню. Основні відмінності між аргонових і криптоновими вікнами полягають у вартості і енергоефективності. Вікна з заповненням з криптону, як правило, мають більш низький коефіцієнт теплопровідності (краще ізоляційне якість) і коштують дорожче, ніж вікна, заповнені аргоном. Аргон зазвичай являє собою кращу цінність в цілому, особливо з вікнами з подвійним склом. Дешевший,

аргон зазвичай використовується для заповнення більш широких 1/2-дюймових проміжків між склом в двокамерних вікнах, в той час як криптон, з його кращими ізоляційними якостями, часто використовується для більш тонких 1/4- або 3/8-дюймових вікон в проміжки між склом на трикамерних вікнах [24].

Як і газ аргон, криптон не має запаху, кольору і нетоксичний. Жоден з газів не представляє небезпеки для жителів будинку через витік газу. Вибір між аргоном і криптоном зазвичай зводиться до вартості всього терміну служби вікна з урахуванням купівельної ціни і економії енергії вікна протягом терміну його служби.

Чотиристоронє або багатошарове скління часто проектується з більш тонкими проміжними шибками, щоб зменшити вагу. Щоб запобігти розтріскування проміжних шибок від термічного напруги, іноді потрібно використовувати термічно зміцнене скло. При наявності більше трьох шибок особливу увагу слід приділяти температурі роздільника і герметика, оскільки проміжні скляні панелі, що контактують з цими елементами скління, можуть легко вийти за межі проектних температурних меж відповідних матеріалів через сонячне випромінювання (нагріву). Нагрівання проміжних шибок сонячним випромінюванням суттєво зростає зі збільшенням кількості шибок (Рис. 1.12). Багатошарове скління повинно бути ретельно спроектовано з урахуванням розширення ізолюючих газів, які містяться між шарами скла, тому що таке газове розширення стає все більш важливим фактором у міру збільшення кількості шибок. Спеціальні вентиляційні отвори, а також невеликі вентиляційні отвори, сполучені між просторами шарів, можуть бути включені, щоб управляти цим ефектом випучування скла. Аналіз методом кінцевих елементів часто використовується для розрахунку міцності листів скла.

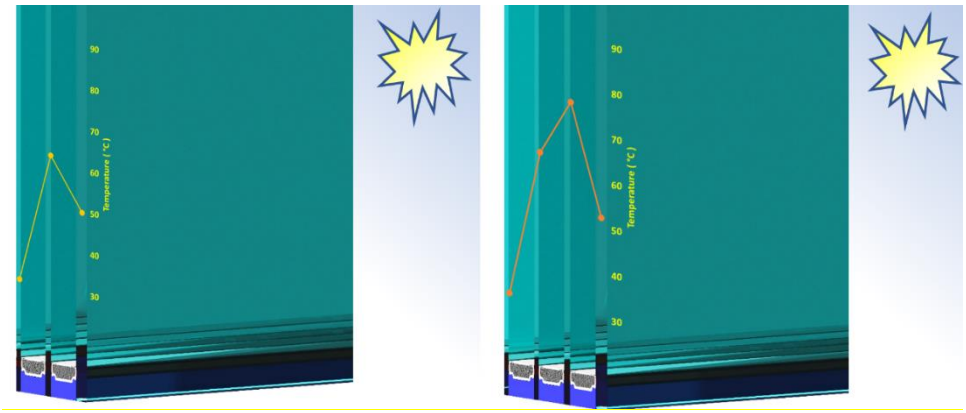


Рисунок 1.12. Температурний профіль, викликаний піковим нагріванням сонячного випромінювання, двукамерного і трикамерного склопакету, що містить низкоемисійне покриття і наповнювач з газоподібного аргону.

Іншим варіантом для досягнення гарної енергоефективності в приміщенні є склопакети з відповідною рідиною (Рис. 1.13.). Винахідом є з себе склопакет, в якому всередині знаходиться рідина, котра складається з таких компонентів, як гідрогель, вода, стабілізатор, і мікрогідрогель; за допомогою високої питомої теплоємності, вода має змогу насичуватись великою кількістю тепла від сонця, тим самим вона запобігає нагріванню у внутрішньому середовищі будівлі [25]. Заповнене рідиною вікно поглинає сонячне тепло вдень і відводить його вночі.



Рисунок 1.13. Енергоефективний склопакет з рідиною, яка становиться непрозорою при нагрівання УФ-променями.

Хоча склопакети дійсно допомагають економити енергію, сінгапурські вчені змінили концепцію, щоб зробити її ще більш ефективною. Замість того, щоб залишати повітряний зазор всередині склопакету, дослідники залили теплопоглинаючуі блокуючу світло рідину.

Новий експериментальний склопакет з рідиною, розроблений в технологічному університеті Наньянг, складається з двох шибок зі звичайного скла, простір між якими заповнено розчином, Протягом дня, коли сонячне світло проходить через вікно, рідина поглинає і зберігає теплову енергію світла. Це зберігає кімнату від нагрівання, зменшуючи потребу в включенні кондиціонування повітря.

Крім того, коли рідина нагрівається, гідрогель в ній змінює свій колір з прозорого на непрозорий (Рис.1.14.). Хоча ця функція псує вигляд з вікна, але

вона також зменшує кількість видимого світла, що проходить зовні, що ще більше допомагає підтримувати прохолоду в кімнаті.

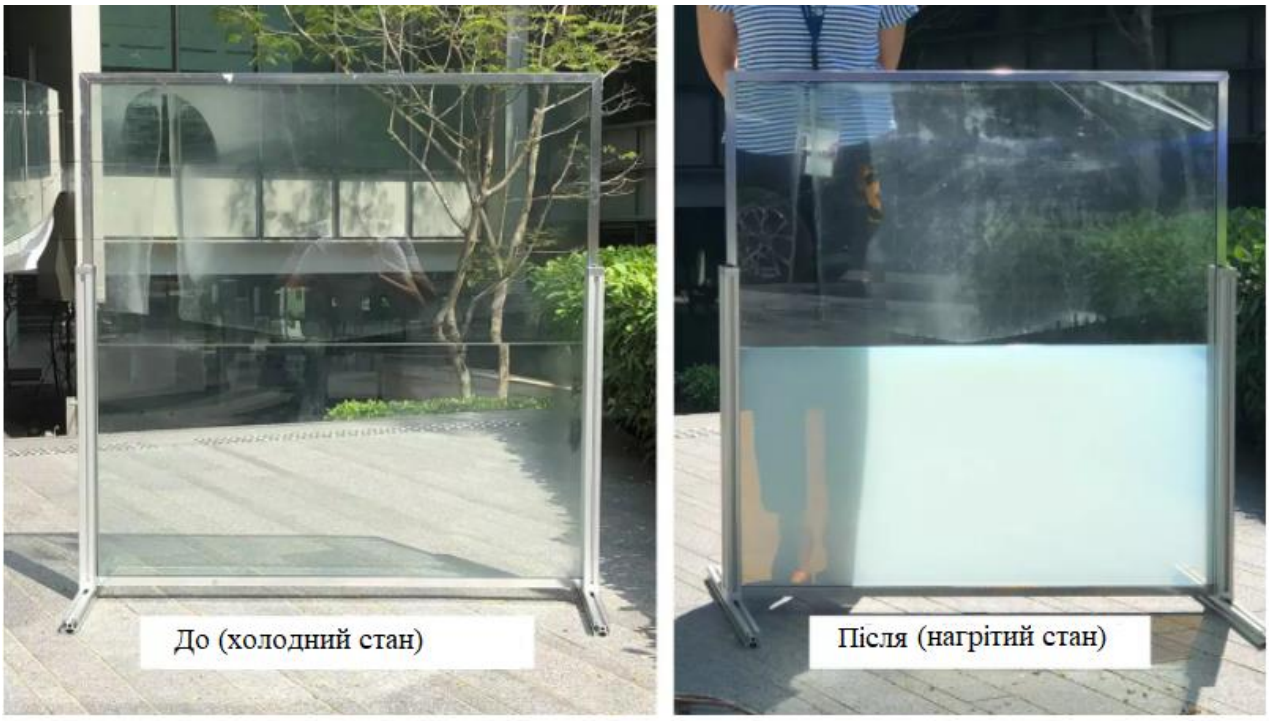


Рисунок 1.14. Зміна кольору гідрогелю від нагріву.

Коли сонце сідає вночі, гель охолоджується і знову стає прозорим, вивільняючи накопичену теплову енергію. Частина цієї енергії проходить через скло в кімнату, знижуючи навантаження на систему опалення будівлі.

І як додатковий бонус, розумне вікно, як повідомляється, поглинає зовнішній шум на 15 відсотків ефективніше, ніж традиційні вікна з однокамерним склопакетом [25]. На основі моделювання і реальних випробувань було визначено, що використання даних склопакетів може знизити споживання енергії в офісних будівлях до 45 відсотків [25].

Вчені з британського університету Лафборо працювали над подібною системою, хоча в їх системі використовується звичайна вода. Як тільки вода нагрівається на сонці, її викачують з вікна і зберігають в резервуарі. Вночі

тепла вода відкачується з резервуара у труби у стінах, обігріваючи внутрішній простір будівлі.

2. ПЕРЕДАЧА ТЕПЛА ЧЕРЕЗ КОНСТРУЦКЦІЇ СКЛОПАКЕТІВ

2.1. Енергоефективність, тепловтрати та теплопередача.

Енергоефективністю є використання меншої кількості енергії для виконання тієї ж роботи, а також скорочення рахунків за електроенергію та зменшення забруднення [26]. Багато будинків споживають більше енергії, ніж їм дійсно потрібно, через неефективність і втрат енергії. Енергоефективність – це один з найпростіших способів уникнути втрат енергії і знизити витрати на електроенергію. Це також один з найбільш економічно ефективних способів боротьби зі зміною клімату, очищення повітря, допомоги в економії на опаленні і допомоги підприємствам у поліпшенні їх прибутків.

Скрізь, де використовується енергія, є можливість підвищити ефективність. Деякі продукти, такі як енергоефективні лампочки, просто споживають менше енергії для отримання того ж кількості світла. Інші продукти не використовують енергію безпосередньо, але вони підвищують загальну ефективність і комфорт будинку або будівлі (наприклад склопакети).

Енергоефективні склопакети зроблені з матеріалів, які зменшують теплообмін і витік повітря, а це означає, що втрачається потреба в великій кількості енергії для обігріву або охолодження приміщення. Енергоефективність захищає навколишнє середовище.

Більшість вимикачів і розеток харчуються електрикою від довколишніх електростанцій. Ці електростанції зазвичай використовують викопне паливо, таке як природний газ і вугілля. Побічним продуктом спалювання викопного палива є викид парникових газів, таких як вуглекислий газ, які сприяють зміні клімату.

Ці викиди електростанцій також містять інші шкідливі забруднювачі повітря, такі як оксиди азоту, діоксид сірки і тверді частинки, які призводять до забруднення повітря.

Енергоефективні склопакети коштують дорожче ніж інші варіанти, але зазвичай вони економлять гроші в довгостроковій перспективі. Більш висока закупівельна ціна більш ніж компенсується триваючою економією на рахунках, що знижує витрати на електроенергію для споживачів і підприємств.

Втрати тепла – це передача тепла зсередини будинку назовні через конструкції будівлі, показник втрат тепла часто виражається в кіловатах (кВт) [27]. Визначення показника втрат тепла допоможе визначити кількість енергії, необхідної для підтримки бажаної температури в приміщенні в холодні дні. Важливо розуміти, що представляють собою втрати тепла, як їх зменшити. Віднімання показника тепловтрат з теплової потужності системи опалення допоможе визначити, чи підходить система енергоефективних склопакетів для обігріву кімнати.

Втрати тепла впливають на установку енергоефективних склопакетів. Наприклад, ізоляція будинку може дозволити використовувати систему енергоефективних склопакетів в якості основного джерела опалення. Потрібно порівняти цю потужність з тепловими втратами, щоб переконатися, що система буде виробляти достатню кількість тепла. Теплова потужність системи повинна бути вище, ніж теплові втрати, щоб вона забезпечувала досить тепла для обігріву будинку.

Втрати тепла залежать від швидкості теплопередачі. З іншого боку, швидкість теплопередачі вимірюється в значеннях u. Важливо визначити швидкість теплопередачі в стінах, дахах і підлогах. Значення u відноситься до загального коефіцієнту теплопередачі. Він відображає ефективність теплопередачі різних частин будівлі. Якщо будівля добре ізольована, вона буде мати менше значення u. З іншого боку, будівлі з високими значеннями U мають погані теплові характеристики, як правило, через погану ізоляцію.

Значення u має значення, тому що воно є основою стандартів енергії і скорочення викидів вуглецю. Значення u будівлі визначає, чи відповідає

будівля необхідним нормативним стандартам. Необхідно знати склад і товщину будь-якого склопаету, щоб визначити його значення u.

Є кілька причин, за якими важливо визначити тепловтрати склопакетів:

Розрахунок втрат тепла дозволяє визначити необхідні вимоги до опалення і потужності, щоб забезпечити належне опалення будинку.

Визначення втрат тепла допоможе дізнатися, чи відповідає склопакет нормативним вимогам та чи є різниця між енергоефективними склопакетами та звичайними.

Дуже важливо знайти втрати тепла в будинку або кімнаті, перш ніж навіть встановлювати певний склопакет. Таким чином, можна завчасно визначити який склопакет буде відповідати потрібним нормам.

Теплова потужність системи склопакетів буде варіюватися в залежності від декількох факторів:

Розмір площі віконної конструкції – має значення співвідношення площі склопакету до загального розміру приміщення.

Теплопередача описує потік тепла (теплової енергії) через різницю температур і подальшого розподілу і змін температури [28].

Вивчення явищ переносу стосується обміну імпульсом, енергією і масою в формі провідності, конвекції і випромінювання. Ці процеси можна описати математичними формулами.

Основи цих формул лежать в законах збереження імпульсу, енергії і маси в поєднанні з основними законами, співвідношеннями, які описують не тільки збереження, а й потік величин, що беруть участь в цих явищах. Для цього використовуються диференціальні рівняння, щоб найкращим чином описати згадані закони і визначають співвідношення. Рішення цих рівнянь – це ефективний спосіб дослідження систем і прогнозування їх поведінки.

Закон Фур'є стверджує, що тепловий потік (q), що виникає внаслідок теплопровідності, прямо пропорційний величині температурного градієнта. Якщо ми називаємо константу пропорційності, k, це означає:

$$q = -k\frac{dT}{dx} \tag{2.1}$$

Константа, k, називається теплопровідністю з розмірностями $\frac{\text{Вт}}{\text{м} * K}$ [29].

Треба мати на увазі, що тепловий потік є векторною величиною. Рівняння (1) говорить, що якщо температура зменшиться з *x*, q буде позитивним, тобто тече у позитивному *x*-напрямку. Якщо T збільшується то *x*, q буде від'ємним; він буде текти в негативному напрямку *x*. У будь-якому випадку q буде перетікати від більш високих температур до нижчих, як уже згадувалося. Рівняння (2.1) є одновимірним формулюванням закону Фур'є. Тривимірною еквівалентною формою є:

$$\vec{q} = -k\nabla T$$

де ∇ позначає градієнт [30].

У одновимірних задачах теплопровідності немає проблем із визначенням напрямку теплового потоку. З цієї причини часто буває зручно записати закон Фур’є у простій скалярній формі:

$$q = k\frac{\Delta T}{\delta} \tag{2.2}$$

де δ - товщина у напрямку теплового потоку, а q і ΔT записуються як додатні величини. Потрібно пам’ятати, що q завжди тече від високої до низької температури [29].

Теплопровідність газів можна зрозуміти за допомогою уяви молекул. Ці молекули переміщуються шляхом теплового руху з одного положення в інше, як видно на малюнку нижче (Рис. 2.1.)

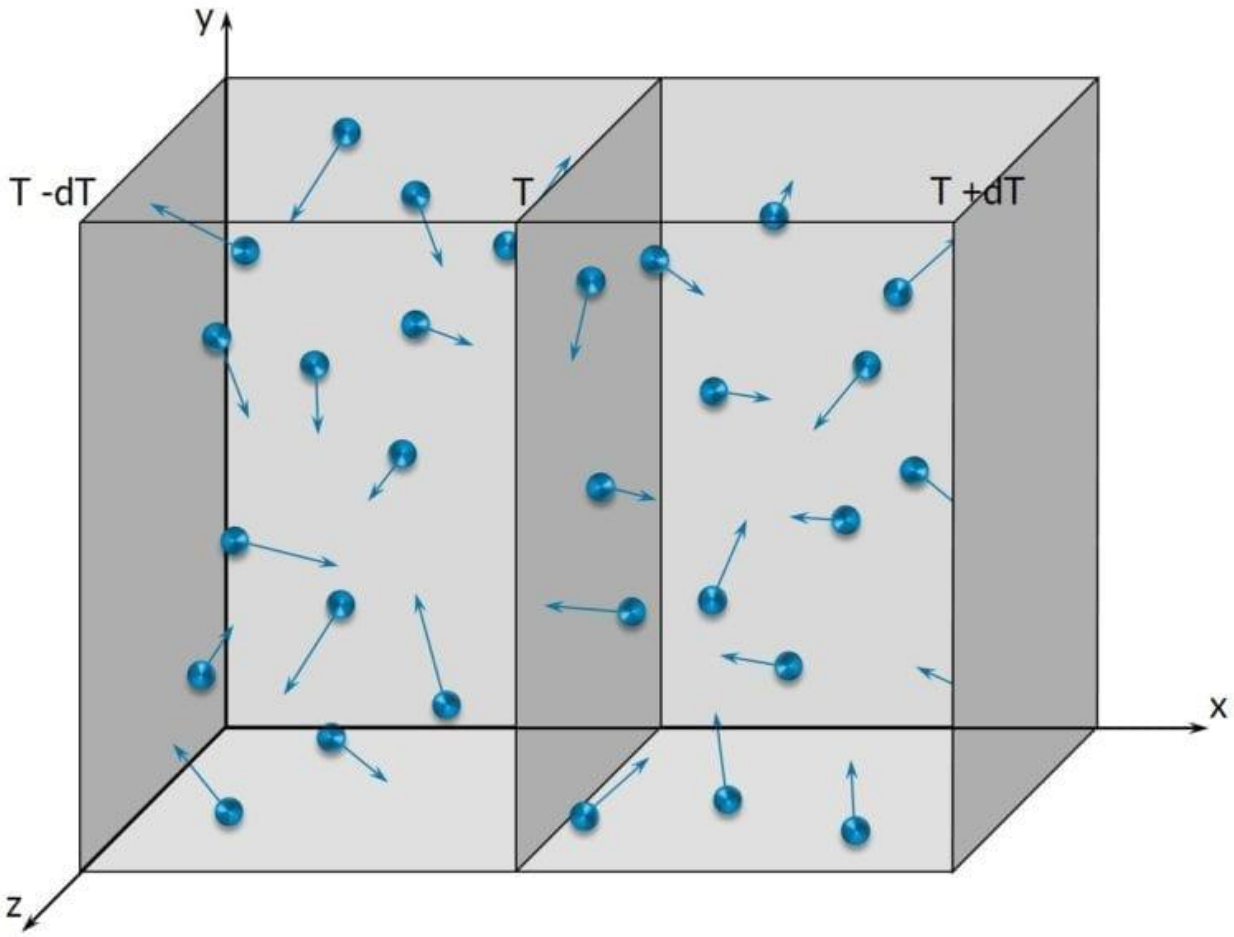


Рисунок 2.1. Теплопровідність газу.

Внутрішня енергія молекул передається при ударі з іншими молекулами. Території з низькими температурами будуть зайняті молекулами високих температур і навпаки. Теплопровідність можна пояснити цією уявою та отримати кінетичну теорію газів:

$$T = \frac{2}{3}\frac{K}{Nk_B}$$

яка стверджує, що «середня молекулярна кінетична енергія прямо пропорційна абсолютній температурі ідеального газу» [31]. Теплопровідність не залежить від тиску і зростає із зростанням температури.

Цю теорію досить важко зрозуміти для інших предметів, крім металів. А для рідин це ще складніше, тому що немає простої теорії. У неметалевих

компонентах тепло передається за допомогою коливань решітки (фонон). Теплопровідність, що передається фононами, також існує в металах, але перевершується провідністю електронів.

Низька теплопровідність ізоляційних матеріалів, таких як полістирол або скловата, заснована на принципі низької теплопровідності повітря (або будь-якого іншого газу). У наведеній нижче таблиці (Табл. 2.1.) перераховані деякі загальновживані елементи/матеріали та їх теплопровідність [32]:

Таблиця 2.1.

Елементи та їх теплопровідність

Матеріал	Теплопровідність Вт/(м·К)
Кисень	0,023
Полістирол	0,032-0,050
Вода	0,5562
Скло	0,76
Залізо	80,2
Аргон	0,0164
Повітря	0,0259
Криптон	0,0854

2.2 Приклад розрахунку теплопередачі в віконних конструкціях

Вікна – це засклені отвори в огородженні будівлі, які зазвичай складаються з одинарного або багаторазового скління (скла або пластику), обрамлення та наповнення. У огороджувальних конструкціях вікна мають найменший опір теплопередачі. У типовому будинку близько третини загальних втрат тепла взимку відбувається через вікна. Крім того, більшість проникнення повітря відбувається по краях вікон. Сонячне тепло, яке надходить через вікна, відповідає за більшу частину охолоджуючого

навантаження влітку. Чистий вплив вікна на тепловий баланс будівлі залежить від характеристик та орієнтації вікна, а також даних про сонячну енергію та погоду. Виготовлення вікон та їх встановлення є дуже важливим у будівництві, щоб забезпечити ефективну герметизацію країв, одночасно дозволяючи їх легко відкривати та закривати.

Незважаючи на те, що настільки небажані з точки зору енергозбереження, вікна є невід'ємною частиною будь-якої будівлі, оскільки вони покращують зовнішній вигляд будівлі, дозволяють проникати денному та сонячному теплу, дозволяють людям оглядати та спостерігати навколигнє середовище та останні винаходи у виді спеціальних склопакетів ще й дозволяють опалювати будівлю. У малоповерхових будинках вікна також забезпечують легкий вихід з нього під час надзвичайних ситуацій, таких як пожежа. Важливими міркуваннями при виборі вікон є тепловий комфорт та енергозбереження. Вікно повинно мати хорошу світлопроникність, забезпечуючи при цьому ефективний опір теплопередачі. Вимоги до освітлення будівлі можна звести до мінімуму, максимально використовуючи природне денне світло. Втрати тепла взимку через вікна можна мінімізувати, використовуючи герметичні однокамерні або двокамерні вікна зі спектрально вибірковими плівками або покриттями, за допомогою чого можна пропускати якомога більше сонячного тепла. Приріст тепла і, отже, навантаження на охолодження влітку можна мінімізувати за допомогою ефективного внутрішнього або зовнішнього затінення вікон.

Далі нижче наведені дослідження за темою передачі тепла через віконні конструкції, які були здійснені Асоціацією американських університетів (ААУ), та наступні за дослідженням відповідні розрахунки. Асоціація американських університетів (ААУ) – це організація, яка базується у Вашингтоні та представляє шістдесят один із найпрестижніших вищих навчальних закладів Північної Америки, п'ятдесят дев'ять у Сполучених Штатах та два в Канаді [33]. Членство можливе лише на запрошення, приблизно 50 відсотків від загальної кількості державних та приватних

організацій, більшість 75 відсотків нинішніх членів повинні схвалити організацію, перш ніж вона зможе стати новим членом [33] Щорічно установи ААУ присуджують близько половини докторських ступенів, що присвоюються в Сполучених Штатах, один п'ятий ступінь магістра і один шостий ступінь бакалавра. Згідно з веб-сайтом асоціації, установи-члени ААУ вносять більше половини результатів досліджень та розробок вищої освіти та отримують близько 60 відсотків федеральних коштів на академічні дослідження [33].

Навіть за відсутності сонячного випромінювання та проникнення повітря передача тепла через вікна є більш складною, ніж здається. Це пояснюється тим, що структура і властивості каркаса сильно відрізняються від скління. В результаті тепловіддача через каркас і крайову частину скління, що прилягає до рами, є двовимірною. Тому прийнято розглядати вікно в трьох областях при аналізі теплопередачі через нього: (1) центр склопакету, (2) край склопакету та (3) області рами (Рис. 2.2.). Тоді загальна швидкість теплообміну через вікно визначається шляхом додавання теплопередачі через кожну область як

$$Q_{вікна} = Q_{центр} + Q_{край} + Q_{рамка} = U_{вікна} A_{вікна}(T_{приміщення} - T_{навк.сер.}) \qquad (2.3)$$

де

$$U_{вікна} = (U_{центр}A_{центр} + U_{край}A_{край} + U_{рама}A_{рама}) / A_{вікна} \qquad (2.4)$$

де U загальний коефіцієнт тепловіддачі вікна; $A_{вікна}$ – це площа вікна; $A_{центр}$, $A_{край}$ та $A_{рама}$ – це площі центральної, крайової та рамної часті відповідно; $U_{центр}$, $U_{край}$ та $U_{рама}$ – коефіцієнти тепловіддачі для центральної, кромкової та рамної секцій вікна [34]. Треба зауважити, що $A_{вікна} = A_{центр} + A_{край} + A_{рама}$. і загальний коефіцієнт вікна визначається із знайдених по площині коефіцієнтів U кожної області вікна. Також зворотним коефіцієнтом U є значення R, яке є одиничним тепловим опором вікна (тепловий опір для одиниці площі).

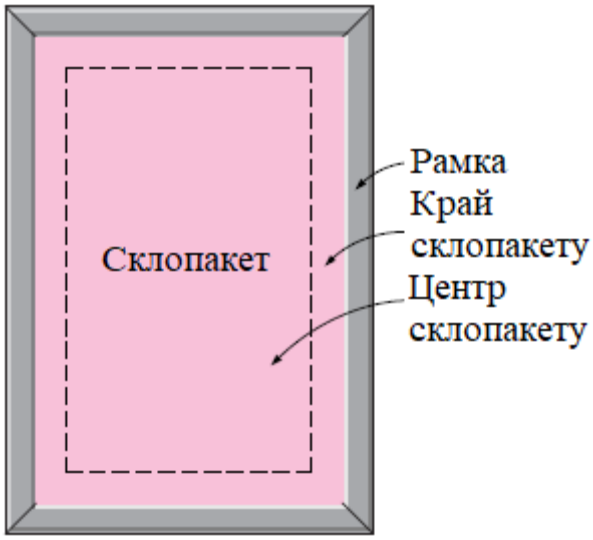


Рисунок 2.2. Три області вікна, що враховуються при аналізі теплопередачі.

Далі в роботі розглянуто стабільний одновимірний теплообмін через склопакет з товщиною δ і теплопровідністю λ. Мережа теплового опору цієї проблеми складається з опору поверхні на внутрішній і зовнішній поверхнях та опору провідності скла послідовно (Рис. 2.3.), а загальний опір на одиниці площі можна виразити як

$$R_{\text{всього}} = R_{\text{прим.}} + R_{\text{скло}} + R_{\text{навк.сер.}} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{\text{скло}}}{\lambda_{\text{скло}}} + \frac{1}{\alpha_2} \text{ [34]} \qquad (2.5)$$

де α_1, α_2 – це коефіцієнти тепловіддачі від приміщення до скла і від скла до зовнішнього середовища.

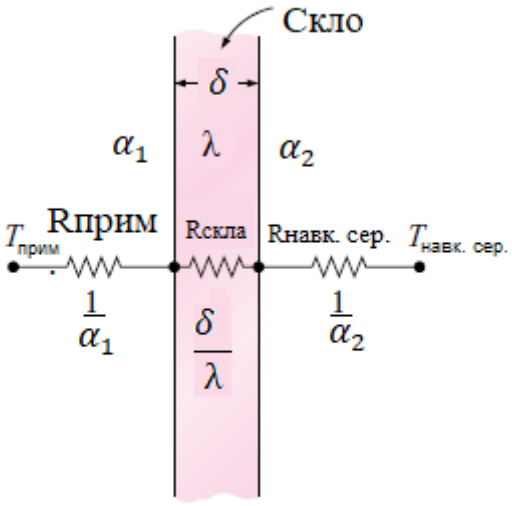


Рисунок 2.3. Мережа теплового опору для передачі тепла через суцільне скло.

Використовуючи загальні значення 3мм для товщини та 0,92 Вт/м2 · ºС для теплопровідності скла і зимові проектні значення 8,29 Вт/м2 · ºС та 34,0 Вт/м2 · ºС для коефіцієнтів тепловіддачі внутрішньої та зовнішньої поверхні, тепловий опір скла визначено як

$$R_{\text{заг.}} = \frac{1}{8{,}29\ \text{Вт/м2} \cdot ^\circ\text{C}} + \frac{0{,}003\ \text{м}}{0{,}92\ \text{Вт/м2} \cdot ^\circ\text{C}} + \frac{1}{34\ \text{Вт/м2} \cdot ^\circ\text{C}} = 0{,}121 + 0{,}003 + 0{,}029 = 0{,}153\ \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}.$$ [33]

Треба зауважити, що відношення опору скла до загального опору дорівнює

$$\frac{R_{\text{скла}}}{R_{\text{заг.}}} = \frac{0{,}003\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}}{0{,}153\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}} = 2{,}0\ \%$$

Тобто сам шар скла вносить близько 2 % у загальний тепловий опір вікна, що є незначним. Ситуація не була б іншою, якби замість скла ми використовували акрил, теплопровідність якого 0,19 Вт/м · ºС. Тому ми не

можемо ефективно зменшити тепловіддачу через вікно, просто збільшивши товщину скла. Але ми можемо зменшити його, утримуючи нерухоме повітря між двома шарами скла. В результаті виходить вікно з однокамерним склопакетом, яке стало нормою у будівництві вікон. [34]

Теплопровідність повітря при кімнатній температурі становить $\lambda_{\text{повітря}}$ = 0,025 Вт/м · ºС, що на третину більше, ніж у скла. Тому тепловий опір нерухомого повітря товщиною 1 см еквівалентний тепловому опору шару скла товщиною 30 см. Не звертаючи уваги на термостійкість скляних шарів, тепловий опір та U коефіцієнта двокамерного вікна можна виразити за допомогою формули (2.5) (Рис. 2.4.). Де $\alpha_{\text{простору}} = \alpha_{\text{роб.}}$, простір + $\alpha_{\text{конв.}}$, простір – це комбінований коефіцієнт тепловіддачі випромінювання та конвекції простору, захопленого між двома шарами скла [34].

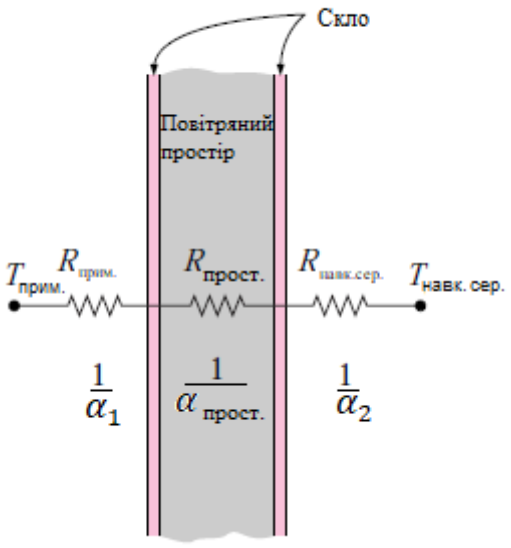


Рисунок 2.4. Мережа теплового опору для передачі тепла через центральну частину двокамерного вікна (опори скла не враховуються).

Приблизно половина тепла передається через повітряний простір склопакета за рахунок випромінювання, а інша половина за допомогою

провідності (або конвекції, якщо є рух повітря). Отже, є два способи мінімізувати $\alpha_{\text{простору}}$ і, отже, швидкість передачі тепла через склопакет:

1. Звести до мінімуму передачу тепла сонячним випромінюванням через повітряний простір. Це можна зробити, зменшивши випромінювальну здатність скляних поверхонь, покривши їх матеріалом з низькою випромінювальною здатністю (або коротко "низькоелектричним"). Ефективна випромінювальна здатність двох паралельних пластин випромінювання ε_1 та ε_2 визначається формулою:

$$\varepsilon_{\text{ефектив.}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1}+\frac{1}{\varepsilon_2}-1} \quad (2.6)$$

Випромінювальна здатність звичайної скляної поверхні становить 0,84, отже, ефективна випромінювальна здатність двох паралельних скляних поверхонь, звернених одна до одної, становить 0,72, але коли скляні поверхні покриті плівкою, що має випромінювальну здатність 0,1, ефективна випромінювальна здатність зменшується до 0,05, що становить одну чотирнадцяту з 0,72, тоді для тих самих температур поверхні радіаційний теплообмін також знизиться в 14 разів [34]. Навіть якщо лише одна з поверхонь покрита, загальна випромінювальна здатність зменшується до 0,1, що є випромінювальною здатністю покриття. Тому не дивно, що близько чверті всіх вікон, що продаються для житлових будинків, мають низькоемісійне покриття.

Коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_{\text{простору.}}$ для повітряного простору, що затримується між двома вертикальними паралельними шарами скла, наведено у таблиці 2.2. для повітряних приміщень товщиною 13 мм та 6 мм для різних ефективних випромінювань та температурних перепадів [35].

Таблиця 2.2.

Коефіцієнт теплопередачі $\alpha_{\text{простору}}$ для повітряного простору, укладеного між двома вертикальними паралельними шарами скла для повітряних просторів товщиною 13 і 6 мм

(А) Товщина повітряного простору = 13 мм. (Б) Товщина повітряного простору = 6 мм.

$T_{сер.}$	ΔT	α простору, Вт/м2 · °С, $\varepsilon_{ефектив.}$				$T_{сер.}$	ΔT	α простору, Вт/м2 · °С, $\varepsilon_{ефектив.}$			
°С	°С	0.72	0.4	0.2	0.1	°С	°С	0.72	0.4	0.2	0.1
0	5	5.3	3.8	2.9	2.4	0	5	7.2	5.7	4.8	4.3
0	15	5.3	3.8	2.9	2.4	0	50	7.2	5.7	4.8	4.3
0	30	5.5	4.0	3.1	2.6	10	5	7.7	6.0	5.0	4.5
10	5	5.7	4.1	3.0	2.5	10	50	7.7	6.1	5.0	4.5
10	15	5.7	4.1	3.1	2.5	30	5	8.8	6.8	5.5	4.9
10	30	6.0	4.3	3.3	2.7	30	50	8.8	6.8	5.5	4.9
30	5	5.7	4.6	3.4	2.7	50	5	10.0	7.5	6.0	5.2
30	15	5.7	4.7	3.4	2.8	50	50	10.0	7.5	6.0	5.2
30	30	6.0	4.9	3.6	3.0						

1. Можна показати, що покриття тільки однієї з двох паралельних поверхонь, звернених один до одного, матеріалом з випромінювальною здатністю e знижує випромінювальну ефективну теплову здатність майже до ε. Тому зазвичай економічніше покривати тільки одну з облицювальних поверхонь. Покриття однієї з внутрішніх поверхонь однокамерного вікна матеріалом, що має коефіцієнт випромінювання 0,1, знижує швидкість теплопередачі через центральну частину вікна наполовину (Рис. 2.5.).

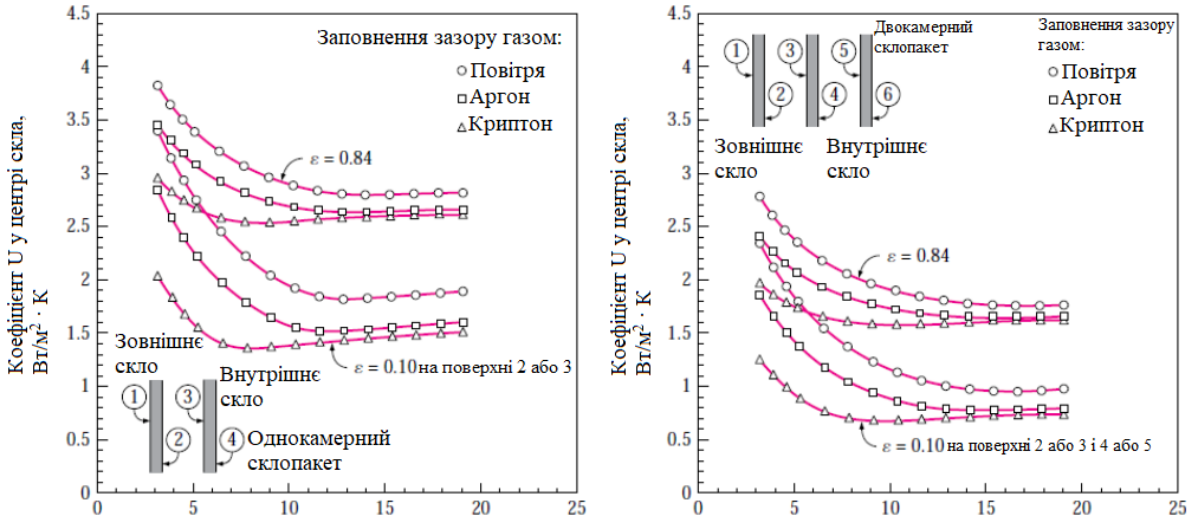


Рисунок 2.5. Зміна коефіцієнта U для центральної частини однокамерних та двокамерних вікон з рівномірною відстанню між склом

2. Звести до мінімуму теплопередачу через повітряний простір. Це можна зробити, збільшивши відстань d між двома шибками. Однак це не можна робити нескінченно, оскільки збільшення відстані понад критичної позначки ініціює конвекційні потоки в замкнутому повітряному просторі, що збільшує коефіцієнт теплопередачі і, таким чином, зводить нанівець мету. Крім того, збільшення відстані збільшує товщину необхідного обрамлення і вартість вікна.

Експериментальні дослідження показали, що коли відстань d менше приблизно 13 мм, конвекція відсутня, а передача тепла через повітря відбувається за рахунок теплопровідності [34]. Але при подальшому збільшенні відстані в повітряному просторі з'являються конвекційні потоки, і збільшення коефіцієнта теплопередачі зводить нанівець будь-які переваги, одержувані за рахунок більш товстого шару повітря. В результаті коефіцієнт теплопередачі залишається майже постійним (Рис. 2.5.). Отже, немає сенсу використовувати повітряний простір товщі 13 мм в двокамерному вікні, якщо тільки тонка поліефірна плівка не використовується для поділу вікон повітряним простором на дві половини для придушення конвекційних потоків. Плівка забезпечує

додаткову ізоляцію, не збільшуючи вагу або вартість вікна з однокамерним склопакетом. Тепловий опір вікна можна ще більше збільшити, використовуючи вікна з двакамерним або трикамерним склопакетом, якщо це економічно вигідно. Використання вікна з двокамерним склопакетом замість однокамерного знижує швидкість теплопередачі через центральну частину вікна приблизно на одну третину.

Інший спосіб зменшити теплопередачу через однокамерний склопакет – використовувати менш провідну рідину, таку як аргон або криптон, для заповнення проміжок між склом замість повітря. Зазор в цьому випадку потрібно добре загерметизувати, щоб газ не просочувався назовні.

U коефіцієнт вікна по краю скла:

Скло у вікнах з однокамерним і трикамерним склопакетами тримається окремо один від одного на однаковій відстані за допомогою розпірок з металів або ізоляторів, таких як алюміній, скловолокно, дерево та герметик. Безперервні проставки розташовані по скляному периметру, щоб забезпечити герметичність країв, а також рівномірний інтервал. Однак проставки також служать небажаними «тепловими містками» між склом, яке знаходяться при різних температурах, і це коротке замикання може значно збільшити тепловіддачу через вікно. Теплообмін на краю вікна є двовимірним, а лабораторні вимірювання показують, що крайові ефекти обмежені смугою шириною 6,5 см по всьому периметру скла.

Коефіцієнт U для крайової області вікна (Рис. 2.6.) щодо коефіцієнта U для центральної області вікна. Крива буде прямою діагональною лінією, якби два значення U були рівні між собою. Треба зауважити, що це майже так для ізоляційних розпірок, таких як дерево та скловолокно. Але коефіцієнт U для крайової області може вдвічі перевищувати коефіцієнт центральної для проставок, таких як алюмінієві. Значення для сталевих проставок потрапляють між двома кривими для металевих та ізоляційних розпірок. Крайовий ефект не застосовується до вікон з одним склом.

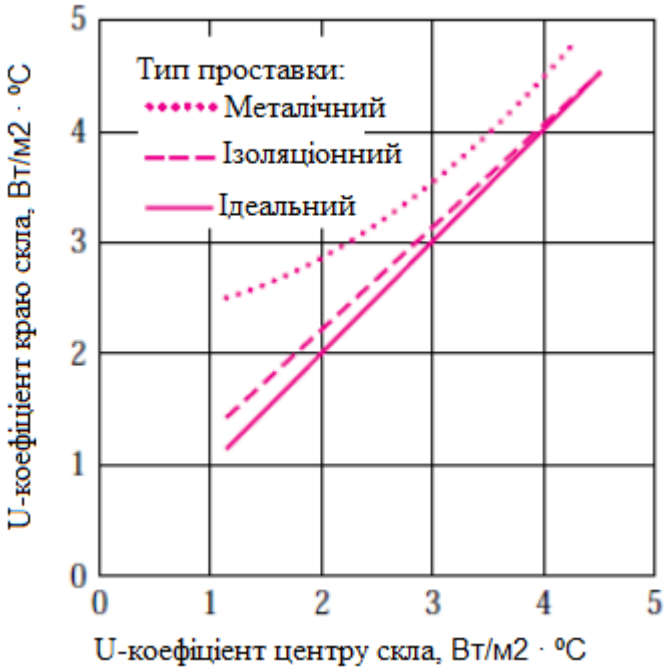


Рисунок 2.6. U коефіцієнт кромки скла по відношенню U коефіцієнту центру скла для вікон з різними проставками.

U коефіцієнт рами:

Обрамлення вікна складається з усього вікна, крім скління. Передачу тепла через каркас важко визначити через різну конфігурацію вікна, різні розміри, різні конструкції та різне поєднання матеріалів, що використовуються у конструкції рами. Типи скління, такі як одинарне скло, однокамерний та двокамерний склопакет, впливають на товщину каркаса і, отже, передачу тепла через раму. Більшість рамок виготовляються з дерева, алюмінію, ПВХ або скловолокна. Однак використання комбінації цих матеріалів (таких як дерево, облицьоване алюмінієм, та алюмінієвий ПВХ) також є поширеним явищем для поліпшення зовнішнього вигляду та міцності.

Алюміній є популярним матеріалом для виготовлення каркасів, оскільки він недорогий, міцний та простий у виробництві, а також не гниє та не вбирає

воду, як дерево. Однак, з точки зору теплообміну, це найменш бажаний каркасний матеріал через його високу теплопровідність. Не дивно, що коефіцієнт U у суцільних алюмінієвих рамах є найвищим, а отже, вікно з алюмінієвою рамою втратить набагато більше тепла, ніж аналогічне вікно з дерев'яною або ПВХ рамою. Передачу тепла через алюмінієві каркасні елементи можна зменшити, використовуючи пластикові вставки між компонентами, які слугуватимуть тепловими бар'єрами. Товщина цих вставок сильно впливає на теплообмін через раму. Для алюмінієвих каркасів без пластикових смуг основний опір теплопередачі обумовлений коефіцієнтом теплообміну внутрішньої поверхні. U коефіцієнти для різних каркасів перераховані в таблиці 2.3, як функція розпірних матеріалів і товщини скління, коефіцієнт U металевого каркаса, а отже, і швидкість передачі тепла через металеву віконну раму більш ніж у три рази перевищує коефіцієнт дерев'яної або ПВХ віконної рами [36].

Таблиця 2.3.

U коефіцієнти рами для фіксованих вертикальних вікон

Матеріал рами	U коефіцієнт, Вт/м2 · ºС
Алюміній:	
Одинарне скління	10,1
Однокамерний склопакет	10,1
Двокамерний склопакет	10,1
Дерево або полівінілхлорид (ПВХ)	
Одинарне скління	2,9
Однокамерний склопакет	2,8
Двокамерний склопакет	2,7

Коефіцієнти теплопередачі поверхні всередині та зовні:

На передачу тепла через вікно також впливають коефіцієнти конвекції та випромінювання тепла між скляними поверхнями та навколишнім середовищем. Вплив конвекції та випромінювання на внутрішню та зовнішню поверхні склопакета зазвичай об'єднують у комбіновані коефіцієнти тепловіддачі конвекції та випромінювання, відповідно. За умови тихого повітря можна визначити комбінований коефіцієнт тепловіддачі на внутрішній поверхні вертикального вікна

$$\alpha_1 = \alpha_{\text{конв.}} + \alpha_{\text{.рад.випр.}} = 1{,}77(T_{\text{скла}} - T_{\text{приміщ.}})^{0{,}25} + \frac{\varepsilon_{\text{скла}}(T_{\text{скла}}^4 - T_{\text{приміщ.}}^4)}{T_{\text{скла}} - T_{\text{приміщ.}}} \text{ (Вт/м2 } \cdot \text{ ºC)} \quad (2.7)$$

де $T_{\text{скла}}$ – це температура скла в K, $T_{\text{приміщ.}}$ – температура повітря в приміщенні в K, $\varepsilon_{\text{скла}}$ – це випромінювальна здатність внутрішньої поверхні скла, що піддається впливу кімнати (прийнята за 0,84 для скла без покриття) та з покриттям σ = 5,67 x 10^{-8} Вт/м2 $\cdot$ K^4 – константа Стефана-Больцмана. Тут температура внутрішніх поверхонь, що виходять на вікно, вважається рівною температурі повітря в приміщенні. Це припущення є розумним, коли вікно виходить переважно на внутрішні стіни, але стає сумнівним, коли вікно піддається впливу нагрітих або охолоджуваних поверхонь або інших вікон. Зазвичай для розрахунку пікового навантаження використовується значення $\alpha_{\text{приміщ.}}$

$$\alpha_{\text{приміщ.}} = 8{,}29\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cdot \text{ °C} = 1{,}46\frac{\text{CHU}}{\text{ч}} \cdot \text{фут}^3 \text{ (зима та літо)}$$

де CHU – британська теплова одиниця.

що відповідає зимовим проектним умовам $T_{\text{приміщ.}}$ = 22ºC і $T_{\text{скла}}$ = -7ºC для скла без покриття з $\varepsilon_{\text{скла}}$ = 0,84. Але таке ж значення $\alpha_{\text{приміщ.}}$ також може бути використано для літніх умов проектування, оскільки воно відповідає літнім умовам $T_{\text{приіщ.}}$ = 24ºC та $T_{\text{скла}}$ = 32ºC. Значення $\alpha_{\text{ приміщ.}}$ для різних температур та випромінювання скла наведені в Таблиці 2.4. Загальновживані значення

$\alpha_{\text{навкол.сер.}}$ для розрахунків пікового навантаження такі ж, як і для зовнішніх поверхонь стін (34,0 Вт/м^2 · ºС взимку та 22,7 Вт/м^2 · ºС влітку) [34].

Таблиця 2.4.

Комбінований коефіцієнт теплопередачі випромінювання $\alpha_{\text{прим}}$ на внутрішній поверхні вертикального скла в умовах нерухомого повітря (Вт/м2 · ºС)

$T_{\text{приміщ}}$, ºС	$T_{\text{навк.сер.}}$, ºС	Випромінювальна здатність скла, $\varepsilon_{\text{скла}}$		
		0,05	0,20	0,84
20	17	2,6	3,5	7,1
20	15	2,9	3,8	7,3
20	10	3,4	3,2	7,7
20	5	3,7	4,5	7,9
20	0	4,0	4,8	8,1
20	-5	4,2	5,0	8,2
20	-10	4,4	5,1	8,3

Загальний U коефіцієнт вікна

Загальні U коефіцієнти для різних видів вікон та мансардних вікон оцінюються за допомогою комп'ютерного моделювання та лабораторних випробувань для умов зимового проектування; репрезентативні значення наведені в таблиці 2.5. Дані випробувань можуть надати більш точну інформацію для конкретних продуктів. Однак значення, наведені в таблиці, можуть бути використані для отримання задовільних результатів за різних умов за відсутності конкретних даних про продукт. Коефіцієнт U продукту фенестрації, який значно відрізняється від тих, що наведені в таблиці, можна визначити (1) визначенням частин площі, які становлять рамку, центр скла та край скла (припускаючи, що 65 – полоса шириною в мм по периметру кожного скління), (2) визначення коефіцієнтів U для кожної секції (U коефіцієнти

центру скла та краю скла можна взяти з перших двох стовпців таблиці 2.5. і U коефіцієнт рами можна взяти з таблиці 2.4. або інших джерел), і (3) множення дробів площі та U коефіцієнтів для кожної секції та їх додавання (або з рівняння 34 для $U_{вікна}$) [37].

Таблиця 2.5.

Загальний коефіцієнт U (коефіцієнт теплопередачі) для різних вікон та мансардних вікон у Вт/м2 · ºС

	Скляна секція (тільки скління)			Алюмінієва рама (без терморозриву)			Дерев'яна або ПВХ рама					
Тип	Центр скла		Край скла	Фік-сов.	Подв. двері	Манс. вікно	Фіксова-ний		Подвійні двері		Мансардне вікно	
Ширина рами → (Не застосовується)				32мм	53мм	19мм	41мм	41мм	88мм	88мм	23мм	23мм
Тип проставки →	–	Мет.	Ізол.	Усі	Усі	Усі	Мет.	Ізол.	Мет.	Ізол.	Мет.	Ізол.
Тип скління Одинарне скління												
3 мм скло	6,30	6,30	–	6,63	7,16	9,88	5.93	–	5,57	–	7,57	–
6,4 мм акрил	5,28	5,28	–	5,69	6,27	8,86	5,02	–	4,77	–	6,57	–
3 мм акрил	5,79	5,79	–	6,16	6,71	9,94	5,48	–	5,17	–	7,63	–
Однокамерний склопакет (без покриття)												
6,4 мм повітряного простору	3,24	3,71	3,34	3,90	4,55	6,70	3,26	3.16	3,20	3,09	4,37	4,22
12,7 мм повітряного простору	2,78	3,40	2,91	3,51	4,18	6,65	2,88	2,76	2,86	2,74	4,32	4,17
6,4 мм аргонового простору	2,95	3,52	3,07	3,66	4,32	6,47	3,03	2,91	2,98	2,87	4,14	3,97
12,7 мм аргонового простору	2,61	3,28	2,76	3,36	4,04	6.47	2,74	2,61	2,73	2,60	4,14	3,97
Однокамерний склопакет [ε = 0,1, покриття на одній з поверхонь в повітряному просторі (поверхня 2 або 3, рахуючи ззовні всередину)]												
6,4 мм повітряного простору	2,44	3,16	2,60	3,21	3,89	6,04	2,59	2,46	2,60	2,47	3,73	3,53
12,7 мм повітряного простору	1,82	2,71	2,06	2,67	3,37	6,04	2,06	1,92	2,13	1,99	3,73	3,53
6,4 мм аргонового простору	1,99	2,83	2,21	2,82	3,52	5,62	2,21	2,07	2,26	2,12	3,32	3,09
12,7 мм аргонового простору	1.53	2,49	1,83	2,42	3,14	5,71	1,82	1,67	1,91	1,78	3.41	3,19

Продовження табл. 2.5.

Двокамерний склопакет (без покриття)												
6,4 мм повітряного простору	2,16	2,96	2,35	2,97	3,66	5,81	2.34	2,18	2,36	2,21	3,48	3,24
12,7 мм повітряного простору	1,76	2,67	2,02	2,62	3,33	5,67	2,01	1,84	2,07	1,91	3,34	3,09
6,4 мм аргонового простору	1,93	2,79	2,16	2,77	3,47	5,57	2,15	1,99	2,19	2,04	3,25	3,00
12,7 мм аргонового простору	1,65	2,58	1,92	2,52	3,23	5,53	1,91	1,74	1,98	1,82	3,20	2,95
Двокамерний склопакет [ε = 0,1, покриття на одній з поверхонь в повітряному просторі (поверхня 3 або 5, рахуючи ззовні всередину)]												
6,4 мм повітряного простору	1,53	2,49	1,83	2,42	3,14	5,24	1,81	1,64	1,89	1,73	2,92	2,66
12,7 мм повітряного простору	0,97	2,05	1,38	1,92	2,66	5,10	1,33	1,15	1,46	1,30	2,78	2,52
6,4 мм аргонового простору	1,19	2,23	1,56	2,12	2,85	4,90	1,52	1,35	1,64	1,47	2,59	2,33
12,7 мм аргонового простору	0,80	1,92	1,25	1,77	2,51	4,86	1,18	1,01	1,33	1,17	2,55	2,28

Засклені стінові системи можна розглядати як нерухомі вікна. Також дані для вікон з двома дверима можуть бути використані для односкляних дверей. За даними таблиці можна зробити кілька спостережень:

1. U коефіцієнти мансарди значно більші, ніж коефіцієнти вертикальних вікон. Це пояснюється тим, що площа мансардних вікон, включаючи бордюр, може бути на 13–240 відсотків більшою за площу чорнового відкривання. Ухил мансардного вікна також має певний вплив.

2. U-коефіцієнт склопакетів можна значно зменшити, заповнивши порожнини газом аргону замість сухого повітря. Продуктивність агрегатів, наповнених CO2, аналогічна характеристикам, наповненим аргоном. U

коефіцієнт можна ще більше зменшити, заповнивши порожнини скління газом криптон.

3. Покриття скляних поверхонь плівками з низьким рівнем випромінювання (з низькою емісією) значно зменшує U коефіцієнт. Для склопакетів достатньо покрити одну з двох поверхонь, звернених один до одного.

4. Чим товщий повітряний простір у склопакетах, тим менший коефіцієнт U, для товщини повітряного простору до 13 мм. Для певного склопакету вікно з товстими шарами повітря матиме менший U коефіцієнт. Для зазначеної загальної товщини скління, чим більша кількість склінь, тим менший коефіцієнт U. Отже, віконце з двокамерним склопакетом з повітряними просторами 6,4 мм (два таких повітряних просторів) матиме нижче значення U, ніж двокамерне вікно з повітряним простором 12,7 мм.

5. Дерев'яні або ПВХ віконні рами мають значно нижчу U величину, ніж вікна з металевими рамами. Тому дерев’яні або ПВХ каркасні вікна затребувані в енергоефективних конструкціях.

3. ОПИС МОДЕЛІ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Розрахунок теплопередачі через багатошарову пласку стінку

Для з’ясування теплопередачі через досліджувальні склопакети у розрахунках потрібно користуватись методом теплопровідності через багатошарову пласку стінку яка складається з товщин шарів $\delta_1, \delta_2, \delta_3 \dots, \delta_i$ і має коефіцієнти теплопровідності $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots, \lambda_i$ (рис. 3.1), де шари дуже щільно прилягають один до одного. Під багатошаровою пласкою стінкою мається на увазі досліджувальний об’єкт у вигляді склопакета.

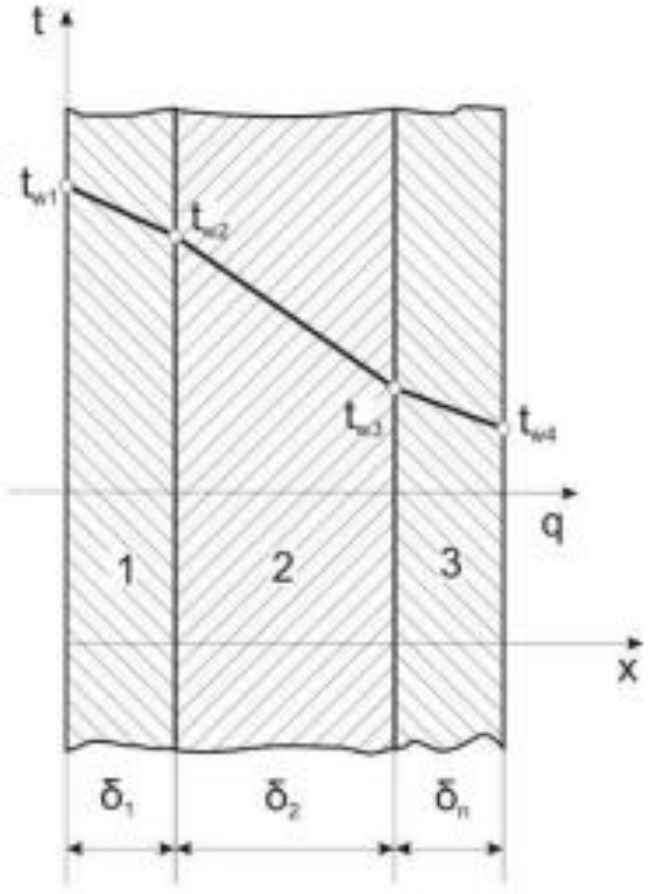


Рисунок 3.1. Теплопередача через багатошарову пласку стінку

Для стінки, що складається з n шарів, формула розрахунку теплопередачі через плоску стінку, що випливає з закону Ньютона-Ріхмана має вигляд [38]:

$$q = \frac{T_{f,1} - T_{f,2}}{\frac{1}{a_1} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + 1/a_2}, \quad (3.9)$$

де n – число шаів багатошарової стінки;

T_{f1} та T_{f2} – це температури горячого та холодного флюідів, °С (К);

a_1, a_2 – це коефіцієнти тепловіддачі від горячого флюіда до стінки і від стінки до холодного флюіда, Вт/(м^2 · К);

δ_i – це товщина і-го слоя стінки, м;

λ – коефіцієнт теплопровідності і-го слоя стінки, Вт/(м · К).

Відповідно до формули 3.9 для чистоти дослідження теплопередачі у склопакетах можна розрахувати теплопередачу для одинарного скління товщиною 0,004 м та теплопровідністю 1 Вт/(м · К) при a_1 = 8,29 Вт/(м^2 · К) та a_2 = 22,7 Вт/(м^2 · К), $T_{f1} = 32$ °С, $T_{f2} = 24$ °С в літній період, та a_1 = 8,29 Вт/(м^2 · К) та a_2 = 34 Вт/(м^2 · К), $T_{f1} = 22$ °С, $T_{f2} = -32$ °С в зимовий період буде мати результати:

$$q_{\text{літо}} = 47{,}6 \text{ Вт/м}^{2\text{o}}\text{С},$$

$$q_{\text{зима}} = 154{,}56 \text{ Вт/м}^{2\text{o}}\text{С},$$

де температура кімнати визначина щодо міжнародного стандарту [39], а коефіцієнти тепловіддачі відповідно до загальних проектних значень [35] що має негативні значення для дослідних температур.

Також для розрахунку теплопередачі через склопакет потрібно знати всі коефіцієнти теплопровідності певного матеріалу для певного типу склопакета (табл. 3.1) [40]. За стандарт для усіх типів склопакетів зі стандартним склінням береться скло товщиною у 3 мм, для склопакетів з електричним нагрівником, фотохромним покриттям та газами береться загартоване скло товщиною у 4 мм. Стандартна відстань між двома шибками у склопакеті береться за довжину величиною 6,4 мм. Для склопакету з використанням вакууму також потрібно

використовувати загартоване скло для більшої міцності, але відстань між шибками вже буде складати 1мм. В даній роботі перевага в дослідженні теплопередачі надається даним видам склопакетів:

1. Однокамерним склопакетам:
- з аргоном;
- з криптоном;
- з повітрям;
2. Двокамерним склопакетам:
- з аргоном;
- з криптоном;
- з повітрям;

Таблиця 3.1.

Коефіцієнти теплопровідності потрібних для дослідження матеріалів

Вид матеріалу	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м · К)
Скло	1,00
Загартоване скло	0,93
Аргон	0,015
Криптон	0,0854
Повітря	0,0251
Вакуум	0,00
Хром	107

Схематичне зображення двох шибок паралельних один одній для проведення дослідження наведено на рис.3.2.

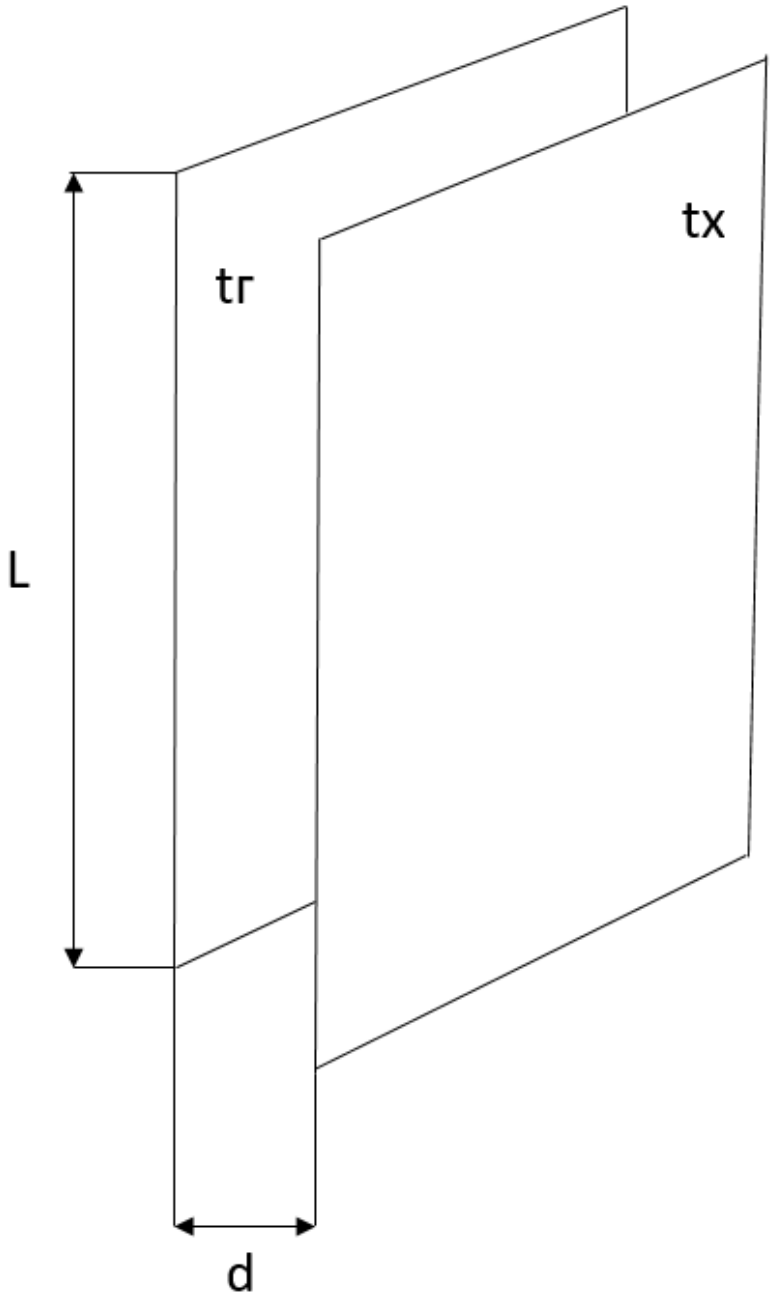


Рисунок 3.2. Дві паралельні між собою шибки з різними температурами

Коефіцієнт теплопередачі однокамерного склопакета розраховується наступним чином з формули 3.9:

$$К = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{вн}} + \frac{\delta_{скла}}{\lambda_{скла}} + \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_{скла}}{\lambda_{скла}} + \frac{1}{\alpha_{навк.сер.}}}$$

де $\alpha_{вн}$ – це коефіцієнт тепловіддачі від внутрішнього повітря до скла, Вт/м^2 ^{o}С;

$\delta_{скла}$ – це товщина скла, м

$\lambda_{скла}$ – це коефіцієнт теплопровідності скла, Вт/м^2 ^{o}С;

α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні скла з температурою $t_г$ до повітря у камерії;

α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від повітря в камері до скла з температурою $t_х$;

$\alpha_{навк.сер.}$ – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні скла ($t_х$) до навколишнього повітря;

$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_{внут.}$ – коефіцієнт тепловіддачі в камері.

Коефіцієнт теплопередачі двокамерного склопакета розраховується аналогічно до однокамерного склопакета за схемою (рис. 3.3) наступним чином:

$$К = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{вн}} + \frac{\delta_{скла1}}{\lambda_{скла1}} + 2\frac{1}{\alpha_{к1}} + \frac{\delta_{скла2}}{\lambda_{скла2}} + 2\frac{1}{\alpha_{к2}} + \frac{\delta_{скла3}}{\lambda_{скла3}}\frac{1}{\alpha_{навк.сер.}}}$$

де $\alpha_{к1}$– це коефіцієнт тепловіддачі в першому камері;

$\alpha_{к2}$ – це коефіцієнт тепловіддачі в другому камері;

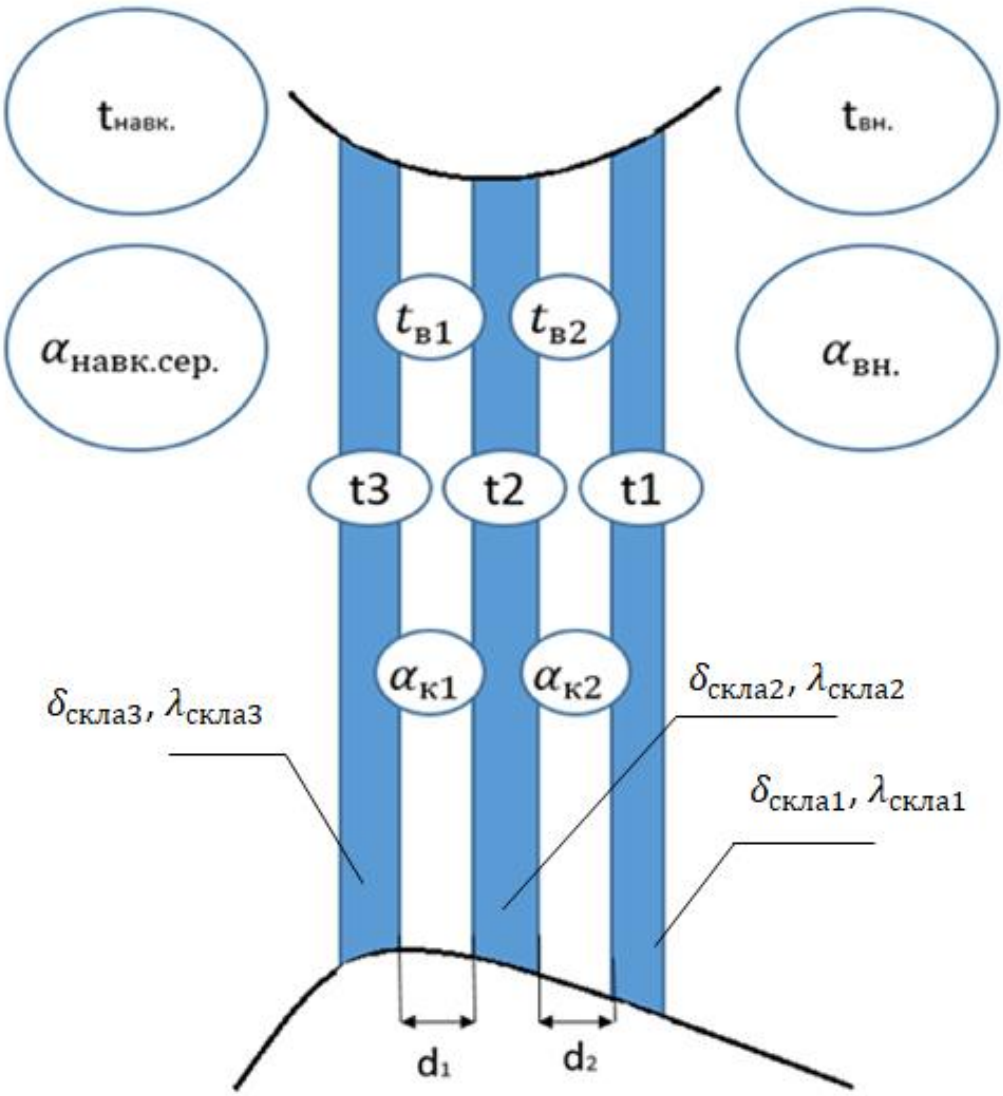


Рисунок 3.3. Схема двокамерного склопакета склопакета

Також для розрахунку теплопередачі двокамерного пакету треба прийняти, що $t_{в1} = 0{,}5\ (t_1 + t_2)$, $t_{в2} = 0{,}5\ (t_2 + t_3)$.

Для розрахунку коефіцієнту тепловіддачі потрібно знайти критерій Нусельта [41]:

$$Nu = 0{,}18(G_r \cdot P_r)^{0.25}(L/d)^{-0.11}{P_r}^{-0.25}$$

де $Nu = \frac{\alpha \cdot X}{\lambda}$;

α – це коефіцієнт тепловіддачі;

λ – коефіцієнт теплопроводності повітря (0,025 Вт/(м · К))

X – це характерний лінійний розмір.

Якщо L/d > 3, то X = d;

$P_г$ – критерій Прандтля [41];

Далі знаходимо:

$$G_r = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta t \cdot x^3}{\nu^2},$$

де $\beta = 1/T_в = 1/t_в+273,5$ – температурний коефіцієнт об'ємного розподілу повітря;

$t_в$ – температура повітря в камері $(0,5 (t_г + t_х))$;

$g = 9,82$ м/с^2;

$\Delta t = t_г - t_х$;

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря, знаходиться по формулі (по температурі повітря табл. 3.2) [42]:

$$\nu = \eta/\rho,$$

де ρ – щільність газу;

η – коефіцієнт динамічної в'язкості.

Таблиця 3.2.

Кінематична в’язкість повітря у залежності від температури

t, °C	μ·10⁶, Па·с	ν·10⁶, м²/с
-50	14,6	9,23
-45	14,9	9,64
-40	15,2	10,04
-35	15,5	10,42
-30	15,7	10,8
-25	16	11,21
-20	16,2	11,61
-15	16,5	12,02
-10	16,7	12,43
-5	17	12,86
0	17,2	13,28
10	17,6	14,16
15	17,9	14,61
20	18,1	15,06
30	18,6	16
40	19,1	16,96
50	19,6	17,95
60	20,1	18,97

Маючи дані формули знаходимо коефіцієнт тепловіддачі обраних конструкцій склопакетів відповідно до формули 3.9, де за сталі розміри було взято ширину склопакету в 0,6 м, висоту в 1,124 м, товщина скла в 0,004 м, а ширина камері з різним наповнювачем в 0,007 м (табл. 3.3):

1. L/d > 3, то X = d м.
2. $t_{\text{В}} = 0{,}5\ (t_1 - t_2)$ °C.
3. $\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{x}$.
4. $\alpha_{\text{навк.сер.}}$взимку = 34,0 Вт/м² °C, 22,7 Вт/м² °C влітку, $\alpha_{\text{внутр.}} = 8{,}29$.
5. Значення теплопередачі через склопакет розраховується наступним чином:

$$q = K \cdot \left(t_{\text{внут.}} - t_{\text{навк.сер.}}\right) \text{Вт/м}^2\,^{\text{o}}\text{C}.$$

Таблиця 3.3.

Розрахунок теплопередачі через склопакети

		Наповнювач	$\alpha_{\text{вн}}$,Вт/м2 оС	$\delta_{\text{скла}}$, м	$\lambda_{\text{скла}}$, Вт/(м · К)	$\alpha_{\text{внут.1}}$,Вт/м2 оС	$\alpha_{\text{внут.2}}$, Вт/м2 оС	$\alpha_{\text{навк.сер}}$ Вт/м2 оС	$t_{\text{внут.}}$, оС	$t_{\text{навк.сер}}$, оС	q, Вт/м^2 $^{\text{o}}$C
Літній сезон	Одн. кам. с.	Повітря	8,29	0,004	1	1,59	-	22,7	+24	+32	5,6
		Аргон	8,29	0,004	0,93	1,11	-	22,7	+24	+32	4,06
		Повітря + фотохром. Покриття	8,29	0,004	1	1,58	-	22,7	+24	+32	5,584
		Аргон + фотохром. покриття	8,29	0,004	0,93	1,11	-	22,7	+24	+32	4
	Дв. кам. с.	Повітря	8,29	0,004	1	1,34	1,345	22,7	+24	+32	2,53485
		Аргон	8,29	0,004	0,93	1,109	1,112	22,7	+24	+32	2,12
		Повітря + фотохром. Покриття	8,29	0,004	1	1,34	1,342	22,7	+24	+32	2,53
		Аргон + фотохром. покриття	8,29	0,004	0,93	1,11	1,111	22,7	+24	+32	2,1184

Продовження табл. 3.3.

		Наповнювач	$\alpha_{вн}$,Вт/м2 оС	$\delta_{скла}$, м	$\lambda_{скла}$, Вт/(м · К)	$\alpha_{внут.1}$,Вт/м2 оС	$\alpha_{внут.2}$, Вт/м2 оС	$\alpha_{навк.сер}$ Вт/м2 оС	$t_{внут.}$, оС	$t_{навк.сер}$, оС	q, Вт/м^2 ^{o}С
Зимній сезон	Одн. кам. с.	Повітря	8,29	0,004	1	2,993	-	34	+22	-32	63,48
		Аргон	8,29	0,004	0,93	0.2019	-	34	+22	-32	5,676
		Повітря + фотохром. Покриття	8,29	0,004	1	2.989	-	34	+22	-32	61.15
		Аргон + фотохром. покриття	8,29	0,004	0,93	0.2013	-	34	+22	-32	5,45
	Дв. кам. с.	Повітря	8,29	0,004	1	0,982	1,1137	34	+22	-32	13,5756
		Аргон	8,29	0,004	0,93	0.158	0.162	34	+22	-32	1.248
		Повітря + фотохром. Покриття	8,29	0,004	1	0.978	1.110	34	+22	-32	13.342
		Аргон + фотохром. покриття	8,29	0,004	0,93	0.158	0.160	34	+22	-32	1.235

Значення теплопередачі через різні типи склопакетів, площею на більшому діапазоні температурних значень для різних сезонних періодів, із значення температури в приміщенні 22°С наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4.

Значення теплопередачі у залежності від різних температур

	Вид наповення	$t_з$, °С	q, Вт/м^2°С	$t_з$, °С	q, Вт/м^2°С	$t_з$, °С	q, Вт/м^2°С	$t_з$, °С	q, Вт/м^2°С	$t_з$, °С	q, Вт/м^2°С
Наповнення однокамерного склопакету	Повітря	+20	1,03	+10	9,828	0	21,296	-10	34,656	-20	47,754
	Повітря + фотохром. покриття	+20	0,95	+10	9,2	0	20,621	-10	33,147	-20	45,214
	Аргон	+20	0,792	+10	6,732	0	14,168	-10	22,592	-20	31,878
	Аргон + фотохром. покриття	+20	0,788	+10	6,355	0	13,752	-10	21,412	-20	30,201
Наповнення двокамерного склопакету	Повітря	+20	0,58	+10	5,64	0	11,0	-10	18,88	-20	26,166
	Повітря + фотохром. покриття	+20	0,54	+10	5,2	0	10,168	-10	17,013	-20	24,439
	Аргон	+20	0,398	+10	3,528	0	7,524	-10	12,032	-20	16,926
	Аргон + фотохром. покриття	+20	0,391	+10	3,315	0	7,125	-10	11,054	-20	15,452

Для більш доглядного розуміння залежності значення теплопередачі від температурних значень було зображено графіки (рис. 3.3-3.4), на яких наглядно видно, що чим більш низькі є значення температури, тим буде більше значення теплопередачі. Також з даної гістаграми можна зробити висновок, що найліпше значення показують однокамерні та двокамерні склопакети з аргоном та енергоефективним покриттям у вигляді фотохромної плівки. Але у відношенні до заповнення склопакета аргоном без спеціального покриття та з ним значення тепловтрат не має значної зміни.

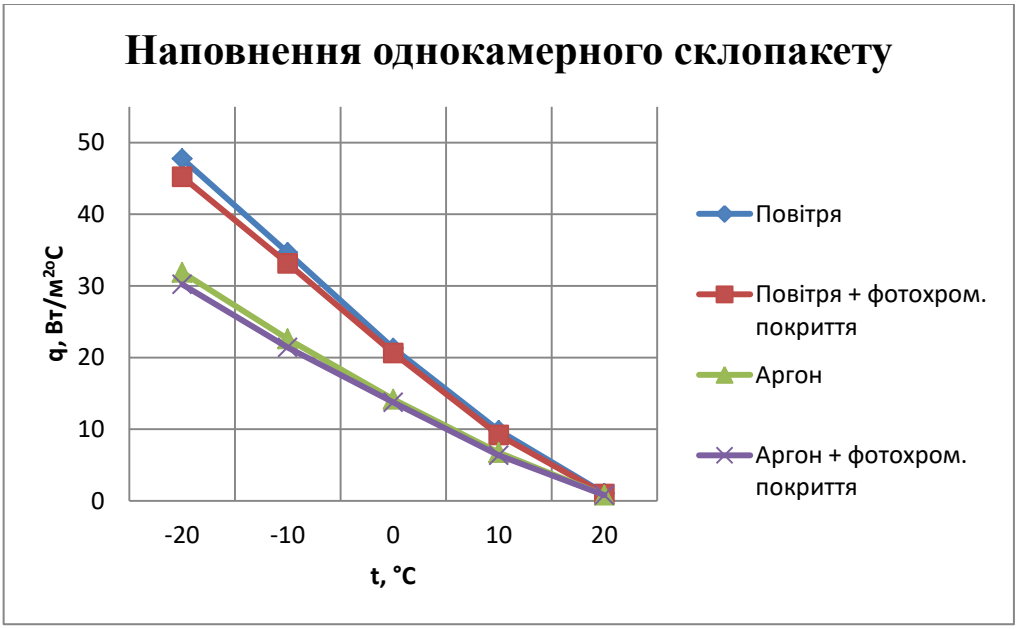


Рисунок 3.3. Графік динаміки значення теплопередачі та теплового надходження однокамерного склопакету у залежності від температури

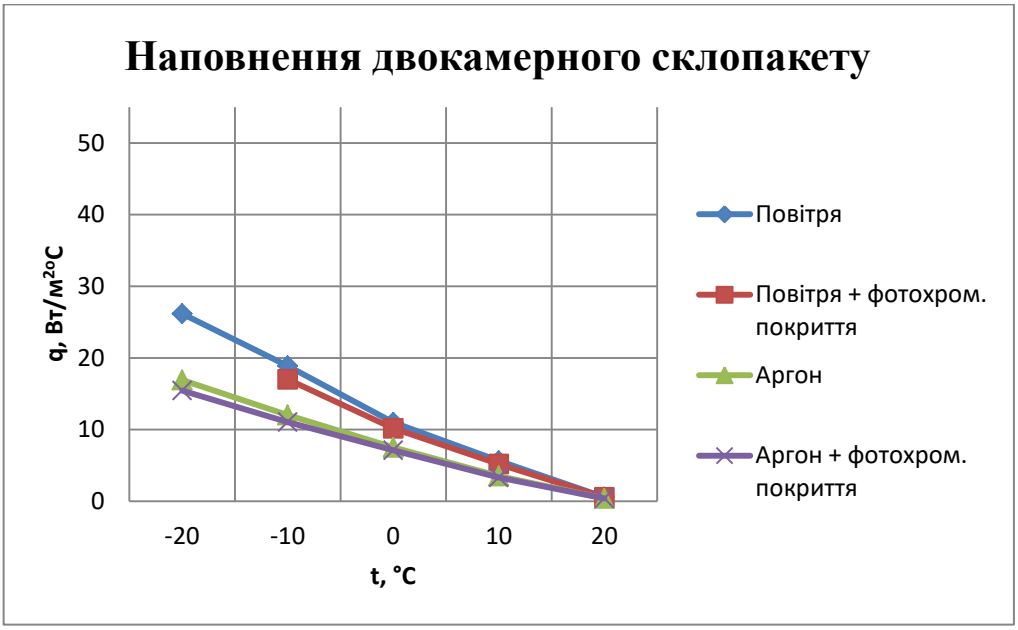


Рисунок 3.4. Графік динаміки значення теплопередачі та теплонадходження двокамерного склопакету у залежності від температури

Для доцільності твердження щодо ефективності певних типів склопакетів над іншими треба також проаналізувати їх фінансово-економічні значення у вигляді вартості за одиницю виробу (табл. 3.5) [43]:

Таблиця 3.5.

Фінансові значення вікон з досліджувальними конструкціями склопакету

Тип конструкції склопакету	Наповнювач	Вартість даної конструкції, тис.грн.
Однокамерний склопакет	Повітря	1,15
	Аргон	2,0
	Повітря + фотохром. Покриття	1,65
	Аргон + фотохром. покриття	2,55
	Криптон	3,60
	Вакуум	5,00
Двокамерний склопакет	Повітря	1,5
	Аргон	3,0
	Повітря + фотохром. Покриття	1,95
	Аргон + фотохром. покриття	3,55
	Криптон	4,70
	Вакуум	8,00

Для розрахунку втрат теплоти через склопакет у приміщені використовують закінчену формулу [44]:

$$Q = S \times ((tв - tн) / R) \quad (3.10)$$

де S – площа об’єкта, $м^2$;

$t_в$ - температура внутрішня, ° С;

$t_з$ – температура зовнішня, °С;

R – термічний опір матеріалу, ($м^2$ × °С)/Вт.

Для розрахунку загального термічного опору склопакета додатково застосовуються поправні коефіцієнти:

$$R_{заг} = R_м + R_в + R_з \quad (3.11)$$

де $R_м$ - термічний опір матеріалу, Вт / (м2 × ° С);

$R_в$ – термічний опір внутрішньої поверхні стіни, Вт/(м2 × °С);

$R_з$ – термічний опір зовнішньої поверхні стіни, Вт/(м2 × °С).

У свою чергу показники термічного опору рівні:

$$R_м = L / \lambda;\ R_в = 1 / \alpha_в;\ R_з = 1 / \alpha_н$$

де L – товщина матеріалу, м;

λ – теплопровідність матеріалу, Вт/(м × °С)

$\alpha_в$ – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні огороджувальної конструкції, Вт/(м2 × °С);

$\alpha_з$ – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні огороджувальної конструкції, Вт/(м2 × °С).

Усі параметри підбираються згідно зі ДБН ІІ-3-79* «Будівельна теплотехніка» [45].

Тепловтрати для багатошарових стін розраховуються аналогічним чином, за винятком того, що значення сумарного термічного опір складається для кожного шару:

$$R_{заг} = R_в + R_1 + R_2 + .. + R_з$$

Іншим способом проводиться розрахунок теплових втрат на інфільтрацію, формулу можна знайти в ДБН 2.04.05-91* «Опалення, вентиляція та кондиціювання» [46]:

$$Q_i = 0.28 \times G_i \times c \times (t_в - t_н) \times k \quad (3.12)$$

де G_i – витрата повітря, м3/год;

c – питома теплоємність повітря, 1.006 кДж/(кг × °C)

$t_в$ – температура внутрішня, °C;

$t_н$ – температура зовнішня, °C;

k – коефіцієнт теплопередачі.

Витрата повітря, що видаляється G_i, не компенсований припливним повітрям визначається наступним чином:

$$G_i = 3 \times S \quad (3.13)$$

де З – норма повітрообміну для житлових квартир, м3/год;

S – площа конструкції, $м^2$ [47].

Таблиця з результатами розрахунку тепловтрат відповідно до формул 3.10 – 3.13 для однокамерного та двокамерного склопакета (табл. 3.6) наведена нижче для максимальних низьких і високих температур за відповідний сезонний період.

Таблиця 3.6.

Результати розрахунків тепловтрати через склопакети

Наповнення однокамерного склопакету	$t_з$, °C	$t_в$, °C	$S_{кон.}$, м^2	$Q_{теплоприток}$, Вт	$t_в$, °C	$t_з$, °C	$S_{кон.}$, м^2	$Q_{тепловтрати}$, Вт
Повітря	32	22	0,6744	17,15	22	-32	0,6744	95,84
Повітря + фотохром. покриття	32	22	0,6744	14,05	22	-32	0,6744	75,87
Аргон	32	22	0,6744	12,72	22	-32	0,6744	68,71
Аргон + фотохром. покриття	32	22	0,6744	11,23	22	-32	0,6744	66,65
Наповнення двокамерного склопакету	$t_в$, °C	$t_з$, °C	$S_{кон.}$, м^2	Q, Вт	$t_в$, °C	$t_з$, °C	$S_{кон.}$, м^2	Q, Вт
Повітря	32	22	0,6744	13,22	22	-32	0,6744	71,41
Повітря + фотохром. покриття	32	22	0,6744	11,63	22	-32	0,6744	62,79
Аргон	32	22	0,6744	10,38	22	-32	0,6744	56,03
Аргон + фотохром. покриття	32	22	0,6744	9,82	22	-32	0,6744	54,12

Значення тепловтрат через різні типи склопакетів, площею 0,6744 м^2 на більшому діапазоні температурних значень для різних сезонних періодів, із значення температури в приміщенні 22°C наведено в табл. 3.7.

Таблиця 3.7.

Значення тепловтрат в залежності від різних температур

	Вид наповення	$t_з$, °C	Q, Вт	$t_з$, °C	Q, Вт	$t_з$, °C	Q, Вт	$t_з$, °C	Q, Вт	$t_з$, °C	Q, Вт
Наповнення однокамерного склопакету	Повітря	+20	3,55	+10	21,3	0	39,04	-10	56,79	-20	74,54
	Повітря + фотохром. покриття		2,8		16,86		30,91		44,96		59,01
	Аргон		2,54		15,27		27,99		40,72		53,44
	Аргон + фотохром. покриття		2,49		14,86		27,02		38,96		52,03

Наповнення двокамерного склопакету	Повітря		2,64		15,87		29,09		42,33		55,54
	Повітря + фотохром. покриття		2,33		13,95		25,58		37,21		48,84
	Аргон		2,08		12,45		22,83		33,2		43,58
	Аргон + фотохром. покриття		1,98		11,22		21,90		32,15		42,17

Для більш доглядного розуміння залежності значення тепловтрат від температурних значень було зображено графіки (рис. 3.5-3.6), на якій наглядно видно, що чим більш низькі є значення температури, тим буде більше значення тепловтрат. Також з даної гістаграми можна констатувати, що найкраще значення показують однокамерні та двокамерні склопакети з аргоном та енергоефективним покриттям у вигляді фотохромної плівки. Але у відношенні до заповнення склопакета аргоном без спеціального покриття та з ним значення тепловтрат не має значної зміни.

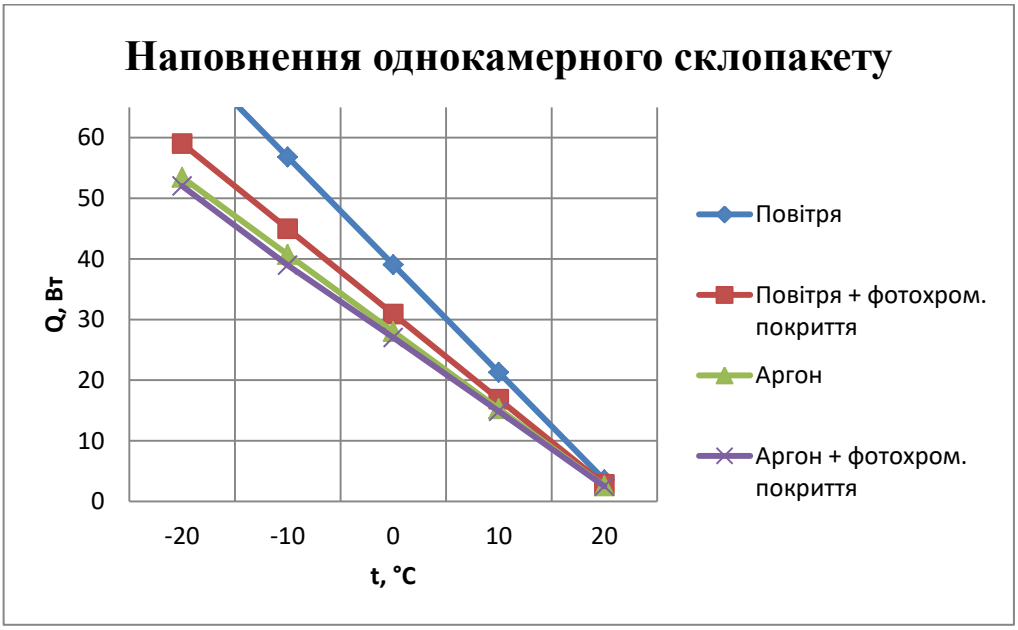


Рисунок 3.5. Графік залежності тепловтрат та теплонадходження однокамерного склопакета від температури

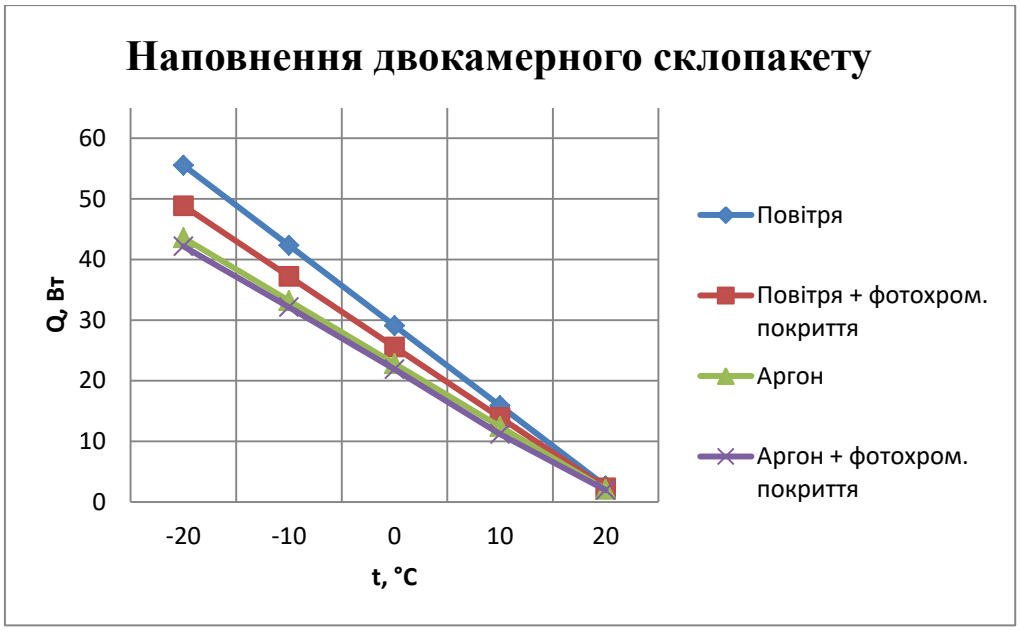


Рисунок 3.6. Графік залежності тепловтрат та теплонадходження двокамерного склопакета від температури

3.2. Моделювання процесу теплопередачі

Енергоефективність склопакета полягає в можливості утримувати тепло у внутрішньому середовищі, по типу будівлі, кімнати чи приміщення, тобто в інтенсивності процесу теплопередачі крізь склопакет, а саме в перенесенні теплоти крізь огороджувальну конструкцію від середовища з більш високою температурою до середовища з більш низькою температурою. Існує два типа застосування склопакетів з точки зору енергоефективності. Перший варіант це застосування склопакетів у кімнатах оренжерейного типу, а саме там де теплопровідність склопакету повинна бути оптимальна, щоб гранично допустима кількість теплоти досягала до рослин, а також другий вид застосування склопакетів у побутових будівлях та приміщеннях з метою зниження теплових втрат за допомогою склопакета, тобто вид застосування, коли теплопровідність склопакетів повинна мати мінімальне значення. У даній кваліфікаційній роботі проводиться більш детально дослідження другого варіанту при якому потрібно зменшити, або в ідеальному варіанті, зовсім уникнути теплових втрат. Іншими словами маємо визначити тепловий опір склопакета, і виявити яка конструкція склопакета буде відповідати найкращим значенням.

У даній роботі процес теплопередачі через конструкцію склопакету представляє собою складний процес теплопередачі, що має у своєму складі такі елементарні процеси, як:

- кондукція (теплопровідність), що є способом передачі теплоти за рахунок взаємодії мікрочастинок тіла (атомів, молекул, іонів в електролітах та електронів у металах) у змінному полі температур [48];
- конвекція, яка представляє з себе спосіб передачі теплоти за рахунок переміщення макрооб'ємів середовища з області з однією температурою в область з іншою температурою [48];

− теплове випромінювання (радіаційний теплообмін) – спосіб перенесення теплоти в просторі, що здійснюється внаслідок розповсюдження електромагнітних хвиль [48].

Завершальний метод пов'язаний з можливістю певного матеріалу протидіяти проникненню електромагнітних хвиль. Для значної чисельності матеріалів, які мають використання для виробництва сучасних конструкцій склопакетів, розбіжність в числових значаннях не істотна, тому будемо розглядати її однаковою для всіх типів конструкцій склопакетів, а також не будемо її враховувати при порівнянні.

Потрібно розглянути конструкцію склопакету, яка була змодельована в SolidWorks (рис. 3.7), як багатошарову непроникну стінку, котра складається з двох або трьох пластів скла (звичайного або загартованого) та одного або двох шарів газу (повітря, аргон та криптон) виключно або суміщаючи. Крізь багатошарову стінку здійснюється теплопередача конвективного типу, яка відбувається у парі з кондукцією.

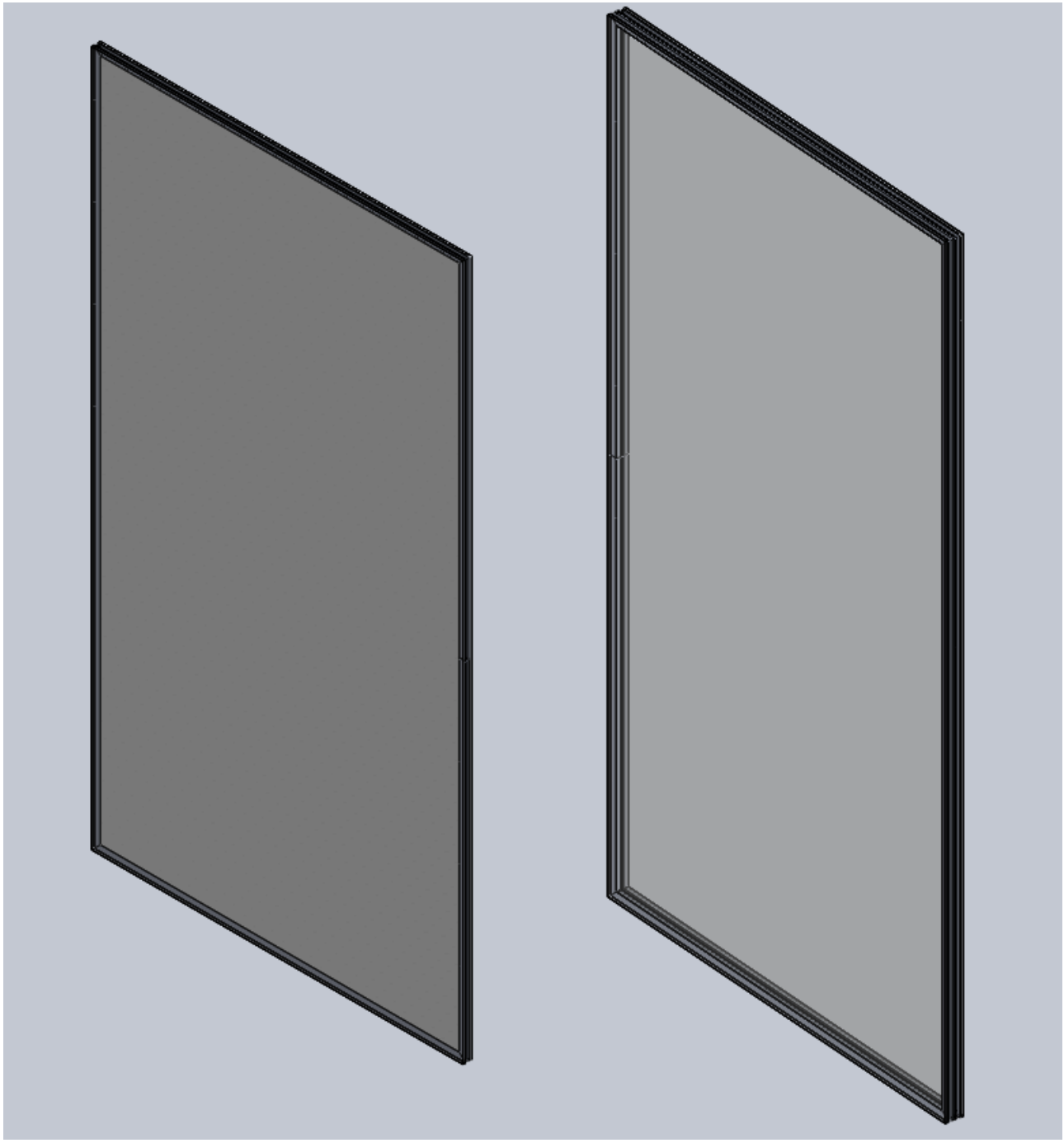


Рисунок 3.7. Моделі однокамерного та двокамерного склопакетів

Сонячна інсоляція, або середній місячний рівень сонячної радіації (сонячна постійна) в місті Харкові Україна у липні дорівнює 5,56 (кВч/m²/день) [49]. Числове значення зовнішньої температури приймемо рівним середньомісячній температурі в Харківській області у січні місяці а самє -3.6 °C

[50], внутрішня температура дорівнюватиме 22 °C що відповідає прийнятим санітарним нормам для житлових приміщень [51].

З моделей, розроблених в програмі SolidWorks можна спостерігати динаміки зміни теплопередачі через склопакети різних конструкцій, на яких можна побачити, що найкращі результати з теплопередачі та тепловтрат мають однокамерні та двокамерні конструкції заповнені аргоном.

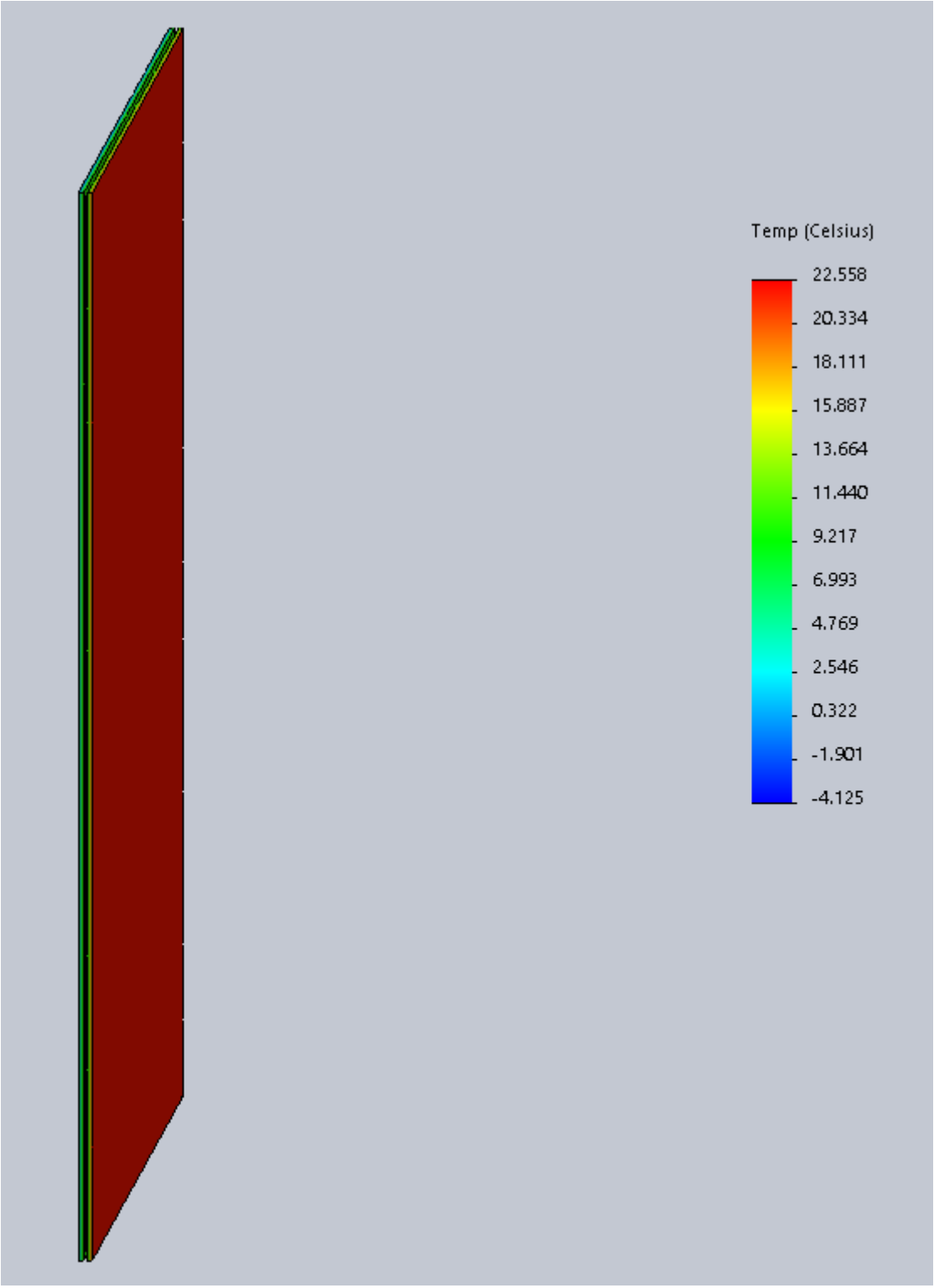


Рисунок 3.8. Однокамерний склопакет заповнений аргоном

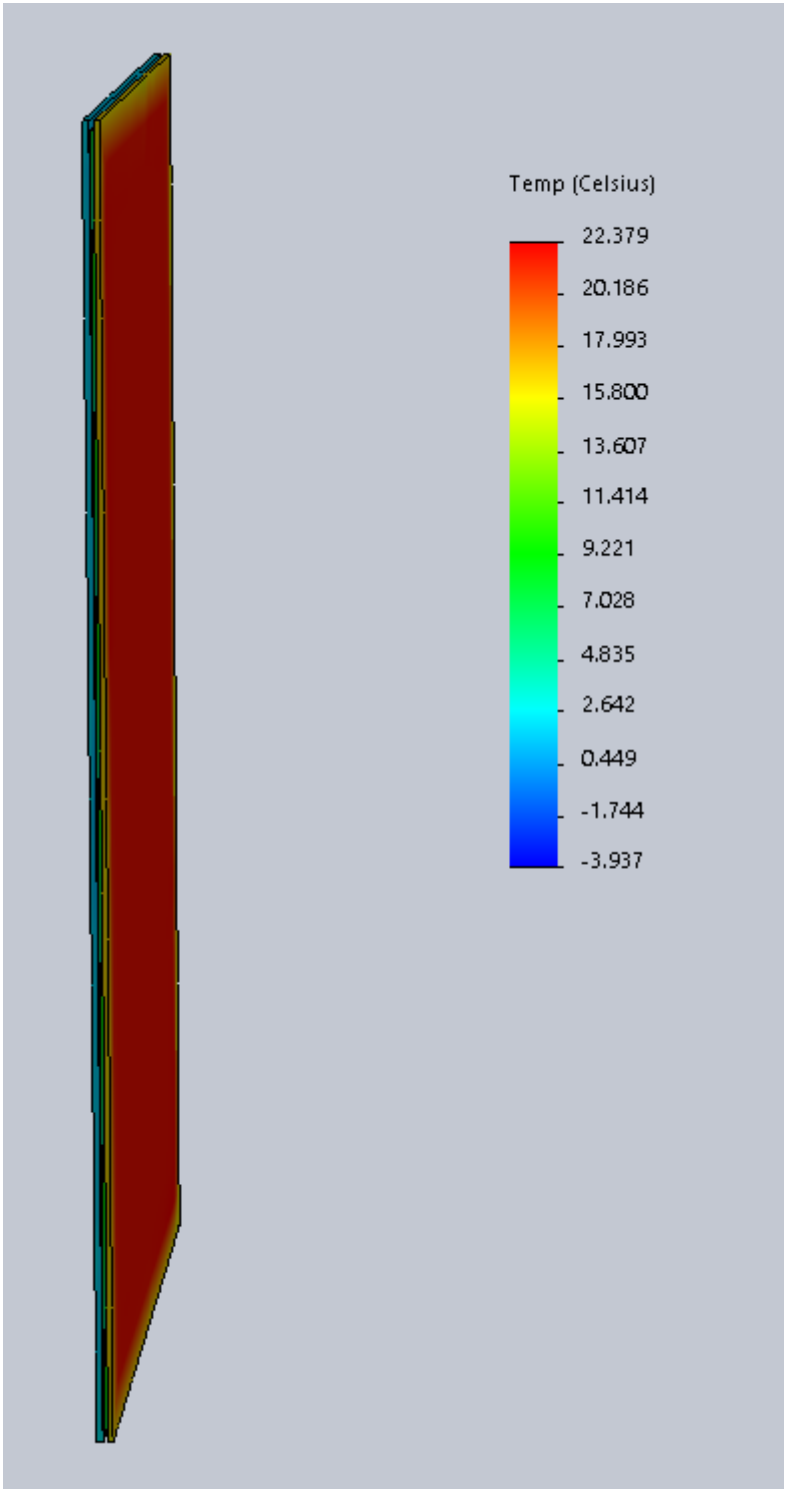


Рисунок 3.9. Однокамерний склопакет заповнений повітрям

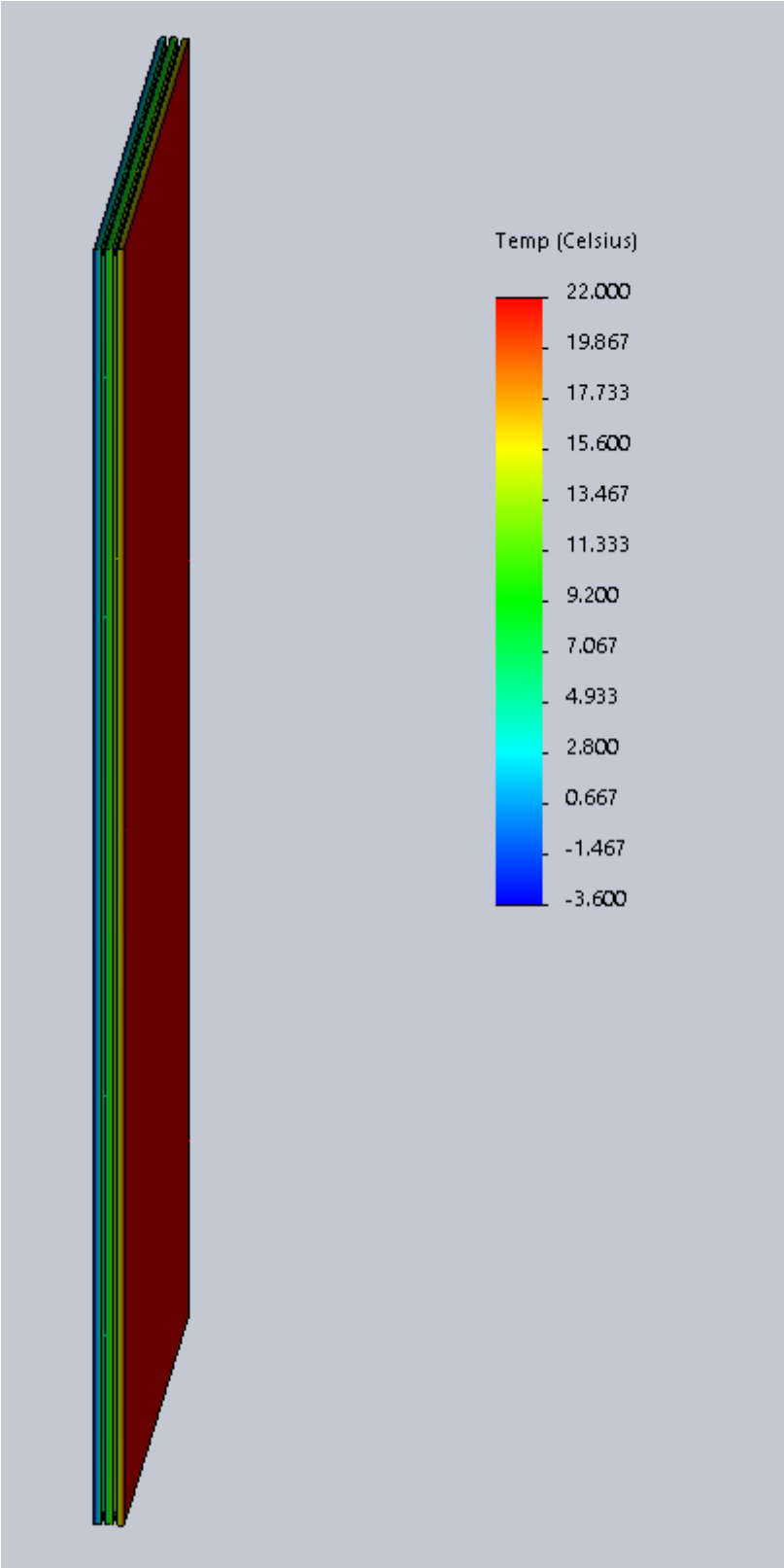


Рисунок 3.10. Двухкамерний склопакет заповнений повітрям

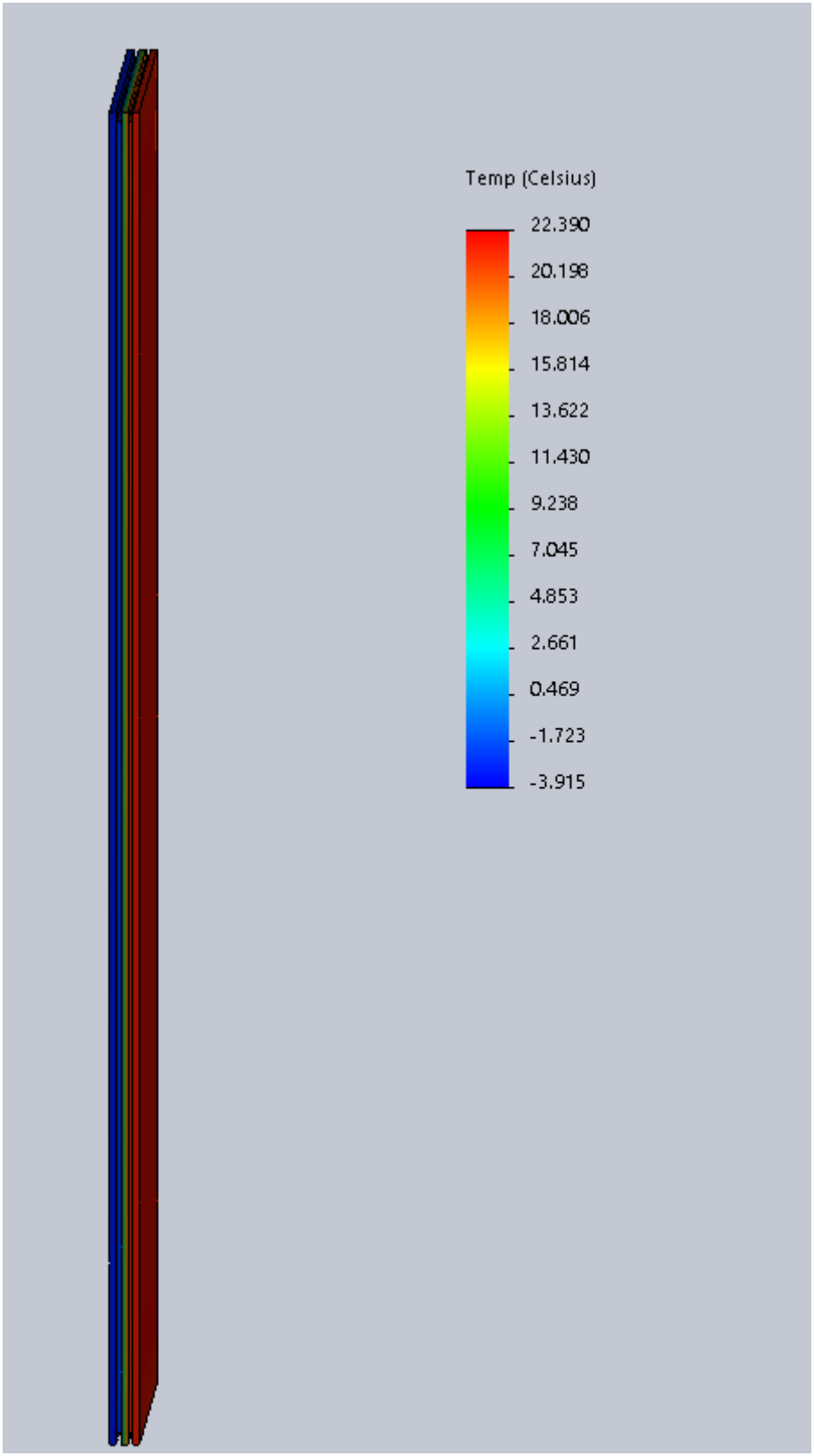


Рисунок 3.11. Двухкамерний склопакет заповнений аргоном

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було визначено та порівняно різні конструкції склопакетів. У роботі розглядались наступні типи склопакетів: однокамерний склопакет, двокамерний склопакет, трикамерний склопакет, та чотирикамерний. Було зазначено також, що дані конструкції для удосконалення показників енергоефективності, можуть застосовуватись разом з такими наповнювачами, як: повітря, криптон, аргон, гідрогель та вакуум. Також для зменшення значення теплопередачі можна використовуати різні енергоефективні напилення та плівки: електрохромне, фотохромне, термохромне, зважені частинки, мікро-жалюзі, полімерно-дисперсійні рідкі кристали та електрообігрівні склопакети. Було виконано порівняння усіх наведених в роботі типів конструкції, визначено їх плюси і мінуси. З аналізування переваг та недоліків різних конструкцій можна констатувати, що чим більша кулькість камер у склопакеті, тим краще у нього буде енергоефективність.

В дуже холодних географічних місцях, де ізоляція і енергоефективність просто не можуть бути порушені, вікна з трикамерним склопакетом – це те що потрібно. У той час як двокамерні склопакети також відмінно працюють в таких умовах.

Коли мова йде про теплоізоляції будь якої будівлі, вибір правильної віконної системи стає дуже важливим. А оскільки технології розвиваються не по днях, а по годинах, дуже важливо зважити всі за і проти кожного варіанту і вибрати той, який добре відповідає потрібним характеристикам.

У склопакетах можна використовувати широкий спектр різних типів скла, таких як низькоемесійне і ламіноване, для подальшого підвищення енергоефективності та зниження рівня шуму. Низькоемесійне скло ще більше знизить кількість тепла, що виділяється, в той час як більш товсте ламіноване скло руйнує звукові хвилі, покращуючи акустичні характеристики.

Було надано визначення енегроефективності, яка означає використання меншої кількості енергії для виконання тієї ж роботи, а також скорочення рахунків за електроенергію та зменшення забруднення, втрат тепла як передачі тепла від приміщення будівлі у навколишнє середовище через різні конструкції будівлі, у нашому випадку склопакет, показник втрат тепла часто виражається в кіловатах.

У роботі розглядалися були розглянуті різні типи конструкцій склопакетів, з яких були обрані найкращі, за показниками енергоефективність, ціна, варіанти, саме такі: однокамерний і двокамерний склопакети з наповненням повітрям та аргоном і фотохромним напиленням. Проведено розрахунки коефіцієнтів теплопередачі однокамерного та двокамерного склопакетів з різним наповненням, теплового потоку Q, щільності теплового потоку q та опіру теплопередачі R для обраних конструкцій. Було визначено тепловтрати та теплове надходження для обраного інтервалу температур. Були побудовані графіки залежності вказаних параметрів від температури зовнішнього середовища. Змодельовано процес теплопередачі в однокамерних і двокамерних склопакетах з наповненням повітрям та аргоном. Результати моделювання співпадають з результатами розрахунків. За результатами проведених досліджень можна зробити висновок, що найкращі за параметрами енергоефективність/ціна одно- та двокамерні склопакети заповнені аргоном та з фотохромною плівкою.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. ДСТУ (Державний Стандарт України): ДСТУ 2420-94. Енергоощадність. Терміни та визначення // Державний комітет України з енергозбереження. - Київ: Державний комітет України з енергозбереження, 1995. - 1 с.

2. Стандарт Пасивного будинку [Електронний ресурс] // Українська ініціативна група пасивного будинку – Режим доступу до ресурсу: https://passivehouse-igua.com/passive-house/passive-house-standard/.

3. What is a Passive House? [Електронний ресурс] // Passipedia. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: https://passipedia.org/basics/what_is_a_passive_house.

4. Енергоефективність в муніципальному секторі. Навчальний посібник для посадових осіб місцевого самоврядування / [А. Максимов, І. Вахович, Т. Гутніченко та ін.]. – Асоціація міст України: ТОВ «ПІДПРИЄМСТВО «ВІ ЕН ЕЙ», 2015. – 184 с.

5. Heat loss: Double glazed vs single glazed [Електронний ресурс] // ARCO Double Glazing – Режим доступу до ресурсу: https://arcodoubleglazing.com.au/blog/heat-loss-double-glazed-vs-single-glazed.

6. Однокамерний і двокамерний склопакет: різниця, плюси і мінуси кожного виду [Електронний ресурс] // Журнал корисних порад на кожен день. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: http://xn--80aimveh.pp.ua/dim/10048-odnokamerniy-dvokamerniy-sklopaket-rznicya-plyusi-mnusi-kozhnogo-vidu.html.

7. Сенць О. Однокамерний склопакет що це таке [Електронний ресурс] / Олег Сенць // ALEN — ВІКНА ТА ДВЕРІ. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: https://alen.org.ua/odnokamernij-sklopaket-shho-ce-take/.

8. Bhatia A. Heat Loss Calculations and Principles / Akshay Bhatia. – Woodcliff Lake: Continuing Education and Development, Inc.. – 51 с.

9. SAVING ENERGY AND MONEY WITH TRIPLE GLAZING [Електронний ресурс] // At Deceuninck – Режим доступу до ресурсу: https://www.deceuninck.de/en-gb/triple-glazing/.

10. Triple Glazed Windows: Do They Make Sense? [Електронний ресурс] // Homebuilding & Renovating. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: https://www.homebuilding.co.uk/advice/triple-glazed-windows-do-they-make-sense.

11. Волчинський К. Енергетичне маркування – що має знати споживач? [Електронний ресурс] / К. Волчинський // AW-Therm журнал. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: https://aw-therm.com.ua/energetichne-markuvannya-virobiv-ta-ekodizajn/.

12. Закон України про енергозбереження: Закон України від 01.07.1994 № 74/94-ВР // відомості Верховної Ради України. Київ: Верховна Рада, 1994.

13. Quadruple glazing [Електронний ресурс] // Wikipedia. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/Quadruple_glazing.

14. Windows: Heat loss & Heat gain [Електронний ресурс] // greenspec – Режим доступу до ресурсу: https://www.greenspec.co.uk/building-design/windows/.

15. Что такое стекло LOW-E и делает ли оно пластиковые окна энергоэффектиными? [Електронний ресурс] // Горница. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: https://zavod-gornica.ru/statii/chto-takoe-steklo-low-e-i-delaet-li-ono-plastikovye-okna-energoeffektivnymi/.

16. Бакиев Р. Стекло с изменяемой прозрачностью : особенности, преимущества, применение [Електронний ресурс] / Руслан Бакиев // Фабрика Окон. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: https://www.fabrikaokon.ru/styokla-s-izmenyaemoj-prozrachnostyu.html.

17. SMART GLASS Стекло с изменяющимися свойствами [Електронний ресурс] // Прогресс Технологий. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: https://proteh.org/articles/22122019-smart-glass/.

18. Электрохромное умное смарт-стекло, его особенности и применение [Електронний ресурс] // Окна на года – Режим доступу до ресурсу: https://oknanagoda.com/steklo/osteklenie-steklo/steklopaketi/ehlektrokhromnoe-smart-steklo.html.

19. Ивченко Н. Стеклопакеты нового поколения [Електронний ресурс] / Наталья Ивченко // Fasadinfo. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: https://fasadinfo.ua/articles/glass/steklopaketyi_novogo_pokoleniya_170210.

20. SPD Smart Windows. Технологія затемнення без штор і жалюзі. [Електронний ресурс] // STRAJ Салон вікон та дверей. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: https://straj.te.ua/a377663-spd-smart-windows.html.

21. Окна с электрообогревом [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://rehau-maco.com.ua/okna/okna-s-elektroobogrevom/.

22. Однокамерный стеклопакет с аргоном против двухкамерного с воздухом [Електронний ресурс] // Компания "Сервис окон". – 2017. – Режим доступу до ресурсу: http://servise-okon.com.ua/odnokamernyj-steklopaket-s-argonom/.

23. Аргон [Електронний ресурс] // ВІкіпедія. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Аргон.

24. Теплопроводность аргона и воздуха [Електронний ресурс] // ВСЕ ОБ ЭЛЕКТРОНИКЕ. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: https://schemy.ru/info/teploprovodnost-argona-i-vozduha/.

25. Агеев А. «Умный» жидкостный стеклопакет охладит дом днем и обогреет ночью [Електронний ресурс] / Александр Агеев // Техкульт. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: https://www.techcult.ru/technology/8983-umnyj-zhidkostnyj-steklopaket-ohladit-dom-dnem-i-obogreet-nochyu.

26. Енергоефективність [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://meregi.com/wp-content/uploads/2019/11/Енергоефективність-конвертирован.pdf.

27. Тепловтрати та методи їх зменшення [Електронний ресурс] // ТзОВ “Електросистеми “Мегаліт” – Режим доступу до ресурсу: https://megalit.lviv.ua/teplovtraty/.

28. Чепурний М. М. Теплопередача [Електронний ресурс] / М. М. Чепурний, Н. В. Резидент // Теплоомасообмін в прикладах і задачах – Режим доступу до ресурсу: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fbteg/chepurnij_teplomasoob/7.htm.

29. Thermal conduction [Електронний ресурс] // Wikipedia – Режим доступу до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_conduction.

30. Закон Фур'є [Електронний ресурс] // Вікіпедія – Режим доступу до ресурсу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Закон_Фур%27є.

31. Кінетична теорія [Електронний ресурс] // Вікіпедія – Режим доступу до ресурсу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%96%D0%BD%D0%B5%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B0_%D1%82%D0%B5%D0%BE%D1%80%D1%96%D1%8F.

32. Теплопровідність [Електронний ресурс] // Вікіпедія – Режим доступу до ресурсу: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C.

33. Association of American Universities [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://education.stateuniversity.com/pages/1775/Association-American-Universities.html.

34. Расчет теплопотерь через окна [Електронний ресурс] – 2020. – Режим доступу до ресурсу: https://rielt.su/okna/raschet-teplopoter-cherez-okna.html.

35. Robinson H. E. Building Materials and Structures Report 151 / H. E. Robinson, L. A. Cosgrove, F. J. Powell // Thermal Resistance of Airspaces and

Fibrous Insulations Bounded by Reflective Surfaces / H. E. Robinson, L. A. Cosgrove, F. J. Powell. – Washington: U. S. Government Printing Office, 1957.

36. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE Handbook - Fundamentals / American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. – USA: Chap. 27, Table 2, 2017. – (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE)).

37. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE Handbook - Fundamentals / American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. – USA: Chap. 27, Table 5, 2017. – (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE)).

38. Гільчук А. В. ТЕОРІЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ / А. В. Гільчук, А. А. Халатов. – Київ, 2017. – 56 с. – (НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ КНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені Ігоря Сікорського»).

39. ГОСТ 30494-2011 [Електронний ресурс] // МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ. – 2013. – Режим доступу до ресурсу:

40. Коэффициенты теплопроводности газов и паров [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: 40. http://chemanalytica.com/book/novyy_spravochnik_khimika_i_tekhnologa/12_obshchie_svedeniya/6100.

41. КОНВЕКТИВНЫЙ ПЕРЕНОС ТЕПЛОТЫ [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.isuct.ru/dept/chemkiber/piaht/metodwork/newmet/1.htm.

42. Физические свойства воздуха: плотность, вязкость, удельная теплоемкость [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://thermalinfo.ru/svojstva-gazov/gazovye-smesi/fizicheskie-svojstva-vozduha-plotnost-vyazkost-teploemkost-entropiya.

43. Prom.ua — крупнейший маркетплейс Украины, где продаются более 100 млн товаров от тысяч предпринимателей со всей страны.Prom.ua — крупнейший маркетплейс Украины, где продаются более 100 млн товаров от тысяч предпринимателей со всей страны. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://prom.ua/.

44. Пособие 13.91 к СНиП 2.04.05-91. Противопожарные требования к системам отопления, вентиляции и кондиционирования [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=25392.

45. Смольяков Р. Т. СНиП СТРОИТЕЛЬНЫЕ 11 -3-79** НОРМЫ И ПРАВИЛА / Р. Т. Смольяков, В. А. Глухарев, Ф. В. Ушков. – Москва: ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ ТИПОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ, 1986. – 32 с. – (Государственный комитет СССР по делам строительства).

46. СНиП 2.04.05-91* СТРОИТЕЛЬНЫЕ НОРМЫ И ПРАВИЛА [Електронний ресурс]. – 1992. – Режим доступу до ресурсу: https://docs.cntd.ru/document/9056428.

47. СНиП 2.08.01-89 Житлові будинки. Доповнення [Електронний ресурс]. – 1994. – Режим доступу до ресурсу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=4116.

48. Огренич Е. В. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В РЕА / Е. В. Огренич, І. Є. Поспеєва. – Запоріжжя: Запорізький національний технічний університет, 2019. – 76 с. – (МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ).

49. Средний месячный уровень солнечной радиации в городах Украины [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.atmosfera.ua/ru/stati-geliosistemy/solar-insulation-ukraine/.

50. Погода в Харькове в июле [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://weatherarchive.ru/Pogoda/Kharkov/July.

51. Будинки і споруди ПІДПРИЄМСТВА ТОРГІВЛІ ДБН В.2.2-23:2009 / [В. Куцевич, О. Гайдученя, Б. Губов та ін.]. – Київ: ВАТ "КиївЗНДІЕП", 2009. – 50 с. – (ДП "Укрархбудінформ").