

Національна академія наук України  
Інститут технічної теплофізики НАН України

Національна академія наук України  
Інститут технічної теплофізики НАН України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Кужель Лілія Миколаївна**

УДК 536.24 : 536.33 : 697.133

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

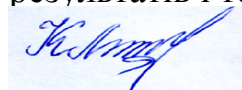
### **Закономірності теплопередачі через віконні конструкції**

Спеціальність 05.14.06. - Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

144 - Теплоенергетика

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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



Л.М. Кужель

Науковий керівник: Басок Борис Іванович, доктор технічних наук, член-кореспондент НАН України, професор

Київ – 2017

## АНОТАЦІЯ

*Кужель Л.М.* Закономірності теплопередачі через віконні конструкції. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика» – Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2017.

Дисертаційна робота присвячена теоретичним та експериментальним дослідженням процесів аеродинаміки і теплопередачі через віконні конструкції.

Протягом чотирьох років в умовах реального клімату м. Києва було проведено серію експериментальних досліджень теплопередачі різних склопакетів та віконних профілів. Для цього створено експериментальний вимірювальний комплекс для дослідження теплоізоляційних властивостей світлопрозорих огорожувальних конструкцій (СОК) будівлі. Отримано великий масив експериментальних даних по температурних полях, полях теплового потоку та по опору теплопередачі 8 віконних склопакетів різного типу і по 3 типах віконних профілів при їх довготривалій експлуатації в умовах реального клімату. Напрацьовано базу розрахункових та експериментальних даних по опору теплопередачі склопакетів та віконних профілів тих світлопрозорих конструкцій (СК), дані для яких наразі відсутні в ДБН України. Вперше експериментально виявлено теплофізичний ефект, що полягає в оберненні напрямку теплового потоку на зовнішній поверхні склопакету і віконного профілю, що пов'язано з нестационарністю процесу теплопередачі та з впливом денного розсіяного сонячного випромінювання.

Проаналізувавши всі отримані результати, визначено оптимальний тип склопакету та відстань між стеклами, які можна рекомендувати для встановлення у віконний проріз та для застосування у будинках пасивного типу. Це склопакети з низькоемісійним або його ще називають з і-покриттям. При виробництві скла з низькоемісійним м'яким покриттям як первинний матеріал використовують

високоякісне листове скло. Таке покриття нанесено шляхом вакуумного напилення, що містить вільні електрони, при цьому його товщина складає 0,08 – 0,12 мікрон і покриття практично не видно для людського ока. Це покриття з напівпровідникових оксидів металів, зазвичай це срібло або оксид титану. За рахунок явищ інтерференції і електропровідності скло з таким покриттям відображає електромагнітні хвилі в інфрачервоному (тепловому) діапазоні, що дозволяє істотно скоротити тепловтрати. У холодний період низькоемісійне скло відбиває, наприклад, всередину приміщення теплоту від опалювальних приладів, а в літній час навпаки - енергозберігаюче покриття відбиває теплову енергію в довгохвильовому діапазоні назовні, створюючи тим самим відчуття комфорту. Проведені дослідження показали, що за рахунок нанесеного покриття на поверхню скла зменшується радіаційна складова теплового потоку, що сприяє збільшенню значення термічного опору, а відповідно і зменшенню тепловтрат через світлопрозорі конструкції. В першу чергу було проведено дослідження теплопередачі через однокамерний склопакет з і-покриттям, формула - 6M<sub>1</sub>-12-6i, з відстанню між склом 12 мм і товщиною скла 6 мм. З'ясовано, що значення опору теплопередачі для нього становить  $R_{o,експ} = 0,52 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ . В діючих ДБН України приведена карта-схема температурних зон України, вона розділена на 2 зони. Для 1-ї зони коефіцієнт опору теплопередачі повинен бути не менше  $0,75 \text{ м}^2\cdot\text{К/Вт}$ , для 2-ї температурної зони - не менше ніж  $0,6 \text{ м}^2\cdot\text{К/Вт}$ . Для склопакету 6M<sub>1</sub>-12-6i в ДБН значення R не приведено, але є значення для схожих варіантів 4M<sub>1</sub>-12-4i –  $R=0,56 \text{ м}^2\cdot\text{К/Вт}$ ; 4M<sub>1</sub>-16-4i –  $R=0,59 \text{ м}^2\cdot\text{К/Вт}$ . Порівнявши із задекларованим значенням в ДБН -  $R=0,47 \text{ м}^2\text{К/Вт}$  для двокамерного склопакету, можна зробити висновок, що навіть однокамерний склопакет з одним низькоемісійним покриттям має кращі теплотехнічні характеристики ніж двокамерний без покриття.

Наступним етапом були дослідження двокамерних склопакетів з низькоемісійним покриттям. З відстанню між склом 10 мм і товщиною скла – 4 мм - 4M<sub>1</sub>-10-4M<sub>1</sub>-4i, для цього склопакету  $R_{o,експ.} = 0,61 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ , в діючому ДБН вказано значення -  $R=0,64 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ . А також для склопакету з відстанню між склом

20 мм. Його формула - 4M<sub>1</sub>-20-4M<sub>1</sub>-20-4i. Із збільшенням ширини дистанційної рамки і відстані між склом, теплоізоляційні характеристики підвищуються, а також покращується шумоізоляція. В діючому стандарті ДБН для такого типу склопакету значення опору теплопередачі не приведено, а наведено значення опору для склопакета, формула якого 4M<sub>1</sub>-16-4M<sub>1</sub>-16-4i. Відстань між склом у цьому склопакеті становить 16 мм, а величина опору теплопередачі  $R=0,72 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ . Для досліджуваного склопакета з формулою 4M<sub>1</sub>-20-4M<sub>1</sub>-20-4i експериментально знайдена величина опору становить  $R_{o, \text{експ.}}=0,96 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ , що на 20% перевищує нині діючі нормативи для світлопрозорих конструкцій. Отже, шляхом збільшення ширини камер склопакета, що заповнені повітрям з низькою теплопровідністю, досягається таке високе значення опору теплопередачі. Наразі найбільш ефективним по співвідношенню якості (енергоефективність) – ціна є склопакет типу 4i-8-4M<sub>1</sub>-8-4i або 4i-10-4M<sub>1</sub>-10-4i. Саме такі склопакети запропоновані для: проекту термомодернізації корпусів № 1 та № 2 ІТТФ НАН України (вул. Булаховського, 2); реалізовані в експериментальному будинку пасивного типу на території ІТТФ НАН України; в житловому комплексі «ІТТФ» в м. Києві по вул. Булаховського, 2.

Запропоновано інженерну методику розрахунку річних тепловтрат через одно-, дво- та трикамерні склопакети в одновимірній теплофізичній моделі в стаціонарній і в нестаціонарній постановці. Дана методика дозволяє врахувати вплив радіаційної складової сонячного випромінювання на теплопередачу через віконний склопакет. За допомогою цієї методики можна прорахувати склопакет для будь-якого клімату України. Адже вона включає в себе всі кліматичні фактори, такі як – альbedo земної поверхні, час сходу і заходу сонця, швидкість вітру, добову густину енергії, коефіцієнт тепловіддачі, температурний коефіцієнт об'ємного розширення, коефіцієнти теплопровідності і кінематичної в'язкості, коефіцієнт температуропровідності і променевої тепловіддачі, а також всі експериментальні дані, які були отримані протягом вимірювання в кожній точці вимірювання (густина теплового потоку, температура). Також був складений баланс енергетичних потоків і проведений порівняльний енергетичний аналіз для

одно-, дво та трикамерних склопакетів. Встановлено: тепловтрати менші, але всього на 3 - 5%, ніж в двокамерного склопакету. Розрахункові дані свідчать - із збільшенням числа камер склопакета теплова ефективність подальших камер знижується, тобто оптимальним варіантом є встановлення двокамерного склопакету. А застосування три- та більше камерності в склопакетах не оправдано ні фінансово, ні енергетично, тому слід шукати способи підвищення теплового опору склопакетів, адже радіаційна теплопровідність в 2 - 4 рази більше молекулярної.

Для детального встановлення характеристик теплопередачі через двокамерний склопакет, а також вивчення питання про його особливості, що впливають на збільшення опору теплопередачі, проводилися чисельні дослідження даного процесу в двовимірній теплофізичній моделі, де вперше було враховано вплив ефекту низькоемісійного і-покриття (одного та двох) на двокамерний склопакет. Проведені чисельні дослідження показали, що центральне скло в двокамерному склопакеті сприяє зменшенню конвективного теплопереносу через газове середовище за рахунок зниження швидкості вільноконвективних течій в камерах. Завдяки нанесенню низькоемісійних покриттів на поверхні склопакету зменшується радіаційна складова теплопереносу. Внаслідок цього збільшується значення опору теплопередачі. Встановлено, що конвективний теплоперенос зменшується за рахунок збільшення кількості камер в склопакеті, а теплопровідність – за рахунок заповнення камер аргоном або криптоном. Отримані розрахункові результати щодо теплопереносу через двокамерний склопакет повністю відповідають власним експериментальним даним. Вперше оцінено розподіл теплопровідно-конвективних та радіаційних вкладів теплового потоку на зовнішній та внутрішній поверхнях склопакету. Наразі найбільш ефективним по співвідношенню якості (енергоефективність) – ціна є склопакет типу 4i-8-4M<sub>1</sub>-8-4i або 4i-10-4M<sub>1</sub>-10-4i.

Було проведено комп'ютерне CFD моделювання радіаційно-конвективного теплообміну двокамерного склопакету, встановленого в будівлі адміністративного корпусу №1 ІТТФ НАН України по вул. Булаховського, 2 в тривимірній

постановці задачі. В результаті встановлені зони, де відбуваються найбільші тепловтрати, а також досягається температура «точки роси», що призводить до утворення конденсату.

Отримані розрахункові результати щодо теплопереносу через двокамерний склопакет в межах випадкової похибки співпадають з даними, що експериментально отримані із застосуванням розробленого переносного блоку теплової реєстрації.

Також були проведені експериментальні дослідження теплотехнічних характеристик віконних профілів. В результаті обробки отриманих даних, визначені значення опору теплопередачі віконних профілів, так як в діючих стандартах України такі значення не приведені. Встановлено оптимальний варіант віконного профілю, який рекомендовано для встановлення у віконний проріз для зменшення тепловтрат. Також запропоновані міри щодо зменшення тепловтрат через ВК в будівлях адміністративного типу (вік яких становить більше 40 років), в яких не проведена термомодернізація, або проведена тільки частково.

На основі інженерної методики розрахунку тепловтрат через склопакети, було створено теплову модель для вентилязованого двокамерного склопакету і вирішено її для нестационарних умов. Вперше в теплофізичній моделі теплопередачі через двокамерний вентиляований склопакет враховано вплив ефекту інсоляції. Розрахунками підтверджено, що для двокамерного вентилязованого склопакету при 1,5 кратному повітрообміні в приміщенні, продування повітря яке видаляється через внутрішню камеру двокамерного склопакета, призводить до зниження річних тепловтрат через подібну конструкцію в 2 рази.

Вперше запропонована тривимірна нестационарна теплофізична модель аеродинаміки повітря та теплообміну в системі доквілля – двокамерний склопакет – приміщення будівлі.

Розроблені рекомендації стосовно ефективного застосування енергоефективних віконних конструкцій. В результаті запропонованих

інноваційних заходів можна досягти значення опору теплопередачі через віконні конструкції до  $1 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$ .

Практичне значення результатів дисертаційної роботи підтверджується включенням отриманих результатів в звіти по бюджетним науковим темам відділу теплофізичних основ енергоощадних технологій ІТТФ НАН України та підтвержені актом впровадження в ТОВ «ЕНЕРГО ТЕПЛО ІНЖИНІРИНГ» шляхом застосування методики розрахунку тепловтрат через ВК.

*Ключові слова:* однокамерний, двокамерний склопакет, вентильований склопакет, віконний профіль, теплофізичне моделювання, комп'ютерне моделювання, тепловтрати, віконний проріз, опір теплопередачі.

#### **Список публікацій здобувача.**

Статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних:

1. Басок Б.И., Накорчевский А.И., Гончарук С.М., Кужель Л.Н. Экспериментальные исследования теплопередачи через оконные стеклопакеты с учетом действия внешних факторов. *Инженерно-физический журнал*. 2017. Т.90. №1. С. 94-101. (*SCOPUS, INSPEC, ADS, CAS, Google Scholar, EBSCO, CSA, Academic OneFile, Academic Search, CSA Environmental Sciences, Earthquake Engineering Abstracts, EI-Cjmpendex, Gale, INIS Atomindex, OCLC, SCImago, Summon by ProQuest*).
2. Basok B., Davydenko B., Zhelykh V., Goncharuk S., Kugel L. Influence of low-emissivity coating on heat transfer through the double-glazing windows. *Building physics in theory and practice. Scientific Journal*. 2016. Vol. VIII. No. 4. P. 5-8. (*ISSN 1734-4891*).
3. Б.И. Басок, Б.В. Давыденко, С.А. Исаев, С.М. Гончарук, Л.Н. Кужель. Численное моделирование теплопереноса через двухкамерный стеклопакет. *Инженерно-физический журнал*. 2016. Т.89. №5. С. 1288-1295. (*SCOPUS, INSPEC, ADS, CAS, Google Scholar, EBSCO, CSA, Academic OneFile, Academic Search, CSA*

*Environmental Sciences, Earthquake Engineering Abstracts, EI-Cjmpendex, Gale, INIS Atomindex, OCLC, SCImago, Summon by ProQuest).*

4. О.М. Лисенко, Л.М. Кужель, І.К. Божко. Управління теплопостачанням будівлі на основі використання індивідуального теплового пункту оригінальної конструкції. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2015. Т. 1, N 8(73). С. 61-67. – Режим доступу: DOI : 10.15587/1729-4061.2015.37917 (*Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus*).

Статті у наукових фахових виданнях:

5. Басок Б. І., Давиденко Б. В., Кужель Л. М., Гончарук С. М., Беляєва Т. Г. Експериментальні дослідження теплопередачі через енергоефективні склопакети з низькоемісійним м'яким покриттям. *Пром. Теплотехніка*. 2017. Т. 39. №1. С. 41-48.

6. Басок Б.І., Давиденко Б.В., Кужель Л.М., Новіков В.Г., Калініна М.Ф. Чисельні дослідження впливу радіаційного та конвективного теплопереносу на теплоізоляційну спроможність двокамерних склопакетів. *Пром. Теплотехніка*. 2017. Т.39. №3. С. 60-65.

7. Гончарук С.М., Калініна М.Ф., Божко І.К., Кужель Л.М., Лисенко О.М. Створення експериментального енергоефективного будинку пасивного типу «нуль енергії». *Пром. Теплотехніка*. 2014. Т. 36, №3. С. 88-95.

8. А.Н. Недбайло, М.Ф. Калинина, И.К. Божко, М.П. Новицкая, С.М. Гончарук, Л.Н. Кужель, О.Н. Лысенко. Математическая модель нестационарного процесса теплопереноса в многослойной ограждающей конструкции. *Керамика: наука и жизнь*. 2014. № 2 (23). С. 14-29.

9. Давиденко Б.В., Гончарук С.М., Новицька М.П., Кужель Л.М., Красота Д.О. Експериментальні дослідження теплопереносу через сучасні віконні конструкції в реальних умовах експлуатації. *Енергоефективність у будівництві та архітектурі*. 2015. №7, С. 65-71.

10. Басок Б.І., Давиденко Б.В., Гончарук С.М., Кужель Л.М. Експериментальні дослідження теплопереносу через сучасні віконні конструкції в



реальних умовах їх експлуатації. *Оконные технологии*. 2015. №60(2), С. 24-26.  
URL: <http://wt.com.ua/biblioteka/arkhiv-nomerov/488-60-2-2015.html>

11. Б.І. Басок, А.І. Накорчевський, Л.М. Кужель, С.М. Гончарук, М.П. Новіцька. Експериментальні дослідження теплопередачі через склопакети з врахуванням зовнішніх кліматичних факторів. Методика опрацювання даних. *Енергоефективність в будівництві та архітектурі*. 2016. Вип. 8. С. 15-20.

Додатково відображає наукові результати дисертації патент України на винахід:

Спосіб забезпечення повітряно-теплової завіси теплотою ґрунту: пат. № 88791 Україна: № u 201314599; заявл. 25.03.2014, Бюл. № 6. 4 с.

#### **Апробація матеріалів дисертації:**

1. Л.М. Кужель. Енергоефективні світлопрозорі конструкції. *II Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених. Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК: тези доповідей.* ( м. Київ, 16 - 17 жовтня 2014). Київ. 2014. С. 38-40.

2. Басок Б.І., Накорчевський А.І., Гончарук С.М., Кужель Л.М., Нежута В.П. Експериментальні дослідження теплопередачі через склопакети з врахуванням зовнішніх кліматичних факторів. *IX Міжнародна конференція “Проблеми промислової теплотехніки”*: тези доповідей. (м. Київ, 20 – 23 жовтня 2015). Київ. 2015. С. 105.

3. Басок Б.І., Новіцька М.П., Кужель Л.М. Теплофізичне моделювання експериментального енергоефективного будинку, обладнаного тепловою завісою фасадних стін. *IX Міжнародна конференція “Проблеми промислової теплотехніки”*: тези доповідей. (м. Київ, 20 – 23 жовтня 2015). Київ. 2015. С. 107.

4. Basok B., Nakorchevskiy A., Kuzhel L., Goncharuk S., Novitska M. Experimental study heat transfer trough glass with including external climatic factors. Method of data processing. *Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві: «ЕНЕРГОІНТЕГРАЦІЯ-2016»*: матеріали робочої програми та

тези доповідей шостої міжнародної науково-практичної конференції. (м. Київ 13 - 15 квітня 2016). Київ. 2016. С. 20-21.

5 Б.И. Басок, Б.В. Давыденко, С.М. Гончарук, О.Н. Лысенко, Л.Н. Кужель. Экспериментальные и теоретические исследования теплопереноса через двухкамерный стеклопакет оконной конструкции. *XV Минский международный форум по тепло- и массообмену: тезисы докладов и сообщений*. (г. Минск 23 - 26 мая 2016). Минск, ИТМ им. А.В. Лыкова НАН Беларуси. 2016. Том 3. С. 269-273.

6. Б.И. Басок, А.И. Накорчевский, Л.Н. Кужель, С.М. Гончарук, О.Н. Лысенко. Экспериментальные исследования теплопередачи через стеклопакеты с учетом климатических факторов. *XV Минский международный форум по тепло- и массообмену: тезисы докладов и сообщений* (г. Минск 23 - 26 мая 2016). Минск, ИТМ им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2016. Том 3. С. 280-283.

7 Л.М. Кужель. Підвищення енергоефективності будівель шляхом зменшення тепловтрат через світлопрозорі віконні конструкції. *Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція. Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – Rems'2016: збірник матеріалів конфер.* (м. Київ 30 травня - 01 червня 2016). Київ, НТУУ «КПІ». 2016. С. 40.

8. Басок Б. І., Давиденко Б. В., Кужель Л. М. Енергоефективні віконні конструкції – запорука підвищення енергоефективності будівель. *XVII міжнародна науково-практичної конференції “Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті”*: матеріали конф. (м.Київ 29 – 30 вересня 2016). Київ. НТУУ «КПІ». 2016. С. 349-352.

9 Басок Б.І., Гончарук С.М., Кужель Л.М. Покращення енергетичної ефективності будівель шляхом застосування сучасних енергоефективних віконних конструкцій. *XVI Всеукраїнська науково-технічна конференція “Актуальні проблеми енергетики та екології”*: матеріали науково-практичної конференції ОНАХТ, (м.Одеса, 5 - 8 жовтня 2016). Одеса. 2016. С. 148-149.

10. Басок Б.І., Давиденко Б.В., Кужель Л.М., Новіков В.Г. Експериментальні та чисельні дослідження радіаційно-конвективного теплопереносу через віконні конструкції. *Міжнародна науково-практична та*

навчально-методична конференція *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – Rems'2017*: збірник матеріалів конфер. (м. Київ 25 – 27 квітня 2017). Київ, НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського. 2017. С. 16.

11. Басок Б., Давиденко Б, Кужель Л., Новіков В. Вплив радіаційного та конвективного теплопереносу на теплоізоляційну спроможність двокамерних склопакетів. *Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві: «ЕНЕРГОІНТЕГРАЦІЯ-2017»*: матеріали робочої програми та тези доповідей сьомої міжнародної науково-практичної конференції. (м. Київ 26 - 28 квітня 2017). Київ. 2017. С. 37-38.

#### ANNOTATION

*Kuzhel L.M.* Regularities of heat transfer through window constructions. - Should be treated as a manuscript.

Dissertation for candidate of technical sciences scientific degree, specialty 05.14.06 - Technical thermal physics and Industrial Heat power Engineering. - Institute Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2017.

The dissertation is devoted to theoretical and experimental research processes of aerodynamics and heat transfer through window constructions.

During the three heating seasons, a series of experimental studies of heat transfer a various double-glazed windows was conducted. Experimental measuring complex for the study of the thermal insulation properties translucent fencing constructions (TFC) a building under its real exploitation was created. A large array of experimental data on temperature fields, fields of heat flow and heat transfer resistance for 20 different types of double-glazed windows and 3 types of window profiles during their long-term exploitation in the real climate conditions was obtained. The database of calculated and

experimental data the heat transfer resistance of double-glazed windows and window profiles the translucent fencing constructions (TFC), the data for which is currently absent in the (SBS) of Ukraine. The thermophysical effect, which consists the inversion of the direction the heat flux on the outer surface of double-glazed windows and window profiles, which depends on the nonstationary of the heat transfer process and the influence of daytime diffused solar radiation, was investigated for the first time.

After analyzing all the results, the optimal type of double glazing and the distance between the glasses that can be recommended for installation in the window sill and for use in passive type buildings, are determined. These are low-emissivity fiberglass or as it is also called with i-coated. In the production of glass with a low-emission soft coating, as the primary material is used high quality sheet glasses. This coating applied by vacuum spraying, containing free electrons, with a thickness of 0,08 – 0,12 microns and this coating is practically not visible fo the human eye. This is a coating of semiconducting metal oxides of semiconducting metal oxides, as usually use silver or titanium oxide. Due to the phenomena of interference and electrical conductivity, glass with this coating reflects electromagnetic waves in the infrared (thermal) range, which help significantly reduce heat losses. In the cold period, low-emission glass reflects, for example, the warmth of the room from the heating devices inside the room, and in the summer, the energy-saving coating reflects the thermal energy in the long-wavelength range outside, creating a sense of comfort. Studies have shown that due to the low-emission coatings applied to the glass surface, the radiation component of the heat flow decreases, which leads to the increase of thermal resistance and to reduction of heat losses through translucent constructions. Initially, a heat transfer study through a single-chamber glass with i-coating was conducted, the formula - 6M<sub>1</sub>-12-i6, with a distance between the glasses 12 mm and the thickness of the glass 6 mm. It was found out that the value of the heat transfer resistance for it is  $R_{o,exp.} = 0,52 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ . The existing (SBS) of Ukraine shows the climate map of Ukraine, divided into 2 temperatures zones. For the 1- st temperature zone, the coefficient of heat resistance must be at least  $0,75 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ , for the 2-nd temperature zone - not less than  $0,6 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ . For 6M<sub>1</sub>-12-6i double-glazed windows, the value of R in (SBS) of Ukraine is not given, but there are

values for similar variants  $4M_1-12-4i$  -  $R = 0,56 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ;  $4M_1-16-4i$  -  $R = 0,59 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ . Comparing with the declared value in (SBS) of Ukraine -  $R = 0,47 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$  for double-glazed windows, we can make conclusions that, a single-chamber glass pane with one low-emission coating has better thermal characteristics than a two-chamber without coating.

The next stage was the research of two-chamber double-glazed windows with a low-emission coating. The distance between the glasses 10 mm and the thickness of the glass - 4 mm -  $4M_1-10-4M_1-4i$ , for this double-glazed window  $R_{o,exp.} = 0,61 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ , the existing value of the (SBS) of Ukraine is  $R = 0,64 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ . And for double-glazed window with a distance of 20 mm between the glasses. Its formula -  $4M_1-20-4M_1-20-4i$ . When increase the width of frame distance, and the distance between the glasses, the thermal insulation characteristics are increased, and the noise insulation is improved. In the current (SBS) of Ukraine for this type of double-glazed window, the value of the heat transfer resistance are not indicated, but the value of the resistance for the double-glazed window, the formula -  $4M_1-16-4M_1-16-4i$ , are indicated. The distance between the glasses in this double-glazed window is 16 mm, and the value of the heat transfer resistance  $R = 0,72 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ . The investigated double-glazed unit -  $4M_1-20-4M_1-20-4i$ , the experimentally value of the resistance is  $R_{o,exp} = 0,96 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ , - 20% higher than the currently standards for translucent constructions (TFC). So, by increasing the width of the chambers of double-glazed windows, filled with air with low thermal conductivity, a high value of the heat transfer resistance is achieved. Currently, the most effective, in terms of quality (energy efficiency) - the price is –  $4i-8-4M_1-8-4i$  or  $4i-10-4M_1-10-4i$ . These are the following double-glazed windows offered for: the project of thermo-modernization of buildings № 1 and № 2 ITT of the National Academy of Sciences of Ukraine (Bulakhovsky St., 2); Realized in experimental passive type building on the territory of ITT of NAS of Ukraine; In the residential complex "ITT" in Kiev on Bulakhovsky St., 2.

An engineering technique of heat loss calculation through one, two- and three-chamber double-glazed windows in one-dimensional thermophysical model in a stationary formulation is proposed. This technique allows take into account the

influence of the radiation component of solar radiation on the heat transfer through double-glazed windows.

Then this technique was applied to non-stationary formulation. And this technique helps to calculate the double-glazed windows for any climate in Ukraine. After all, it includes all climatic factors such as - albedo of the earth's surface, sunrise and sunset times, wind speed, daily energy density, heat transfer coefficient, temperature coefficient of volume expansion, coefficients of thermal conductivity and kinematic viscosity, coefficient of thermal conductivity and radiant heat transfer, and all experimental data obtained during the measurement at each point of measurement (density of the heat flow, temperature). A balance and analysis of energy flows for single-, double-, and three-chamber double-glazed windows was conducted. Determined that: heat loss is less, but only for 3 - 5%, than in double-glazed windows. Estimated data show - increase in the number of double-glazed windows, the thermal efficiency of the subsequent chambers is reduced, that is, the optimal to install a two-chamber double-glazed window. Applying three or more chamber for double-glazed windows is not justified financially and energetically, therefore, it is necessary to look for a different ways to increase the thermal resistance of the double-glazed windows, because the radiation thermal conductivity is 2 - 4 times more than molecular.

For detailed installation specifications heat transfer through the double-glass and consideration of its peculiarities affecting the increase in resistance to heat, conducted numerous studies of the process in the two-dimensional thermal physical model which first took into account the impact of the effect of low-emission and coverage (one and two) for network security double-glazed windows Numerical studies have shown that the central glass in the double-glass reduces convective heat transfer through the gas environment by reducing the speed of free convective currents in cells. Due to the application of low-emission coatings on the surface of the glass pane, the radiation component of the heat transfer is reduced. As a result, the value of the heat transfer resistance increases. Found that convective heat transfer is reduced by increasing the number of cameras in the pane, and thermal conductivity - by filling the chamber with argon or krypton. The obtained results for heat transfer through the double-glass fully

comply with its own experimental data. First estimated distribution of convection, conduction and radiation heat flux deposits on the inner and outer surfaces of the pane. Currently, the most effective in terms of quality (energy efficiency) - the price is a type of 4i-8-4M<sub>1</sub>-8-4i or 4i-10-4M<sub>1</sub>-10-4i double pane.

A computer CFD simulation of radiation-convective heat exchange of a two-chamber double-glazed window installed on the front panel corresponding to the building of the administrative building №1 of the ITT NAS of Ukraine on the Bulakhovsky St., 2 in the three-dimensional formulation of the problem. As a result, the zones where the greatest heat losses occur, as well as the temperature of the "dew point", leads to the formation of condensate on °C.

The calculated results for the heat transfer through a two-chamber glass pane within the limits of random error coincide with the experimental data obtained with the use of the developed portable thermal registration unit.

Also experimental researches of thermal characteristics of window profiles were conducted. As a result of the processing of the obtained data, the values of the resistance of the heat transfer of the window profiles are determined, as in the current standards of Ukraine such values are not given. The optimal variant of the window profile is recommended, which is recommended for installation in a window cut to reduce heat losses. Also, measures are proposed to reduce heat loss through °C in buildings of an administrative type (whose age is more than 40 years old), in which no thermo-modernization has been carried out, or only partially carried out.

Based on the engineering methodology for calculating the heat loss through the double-glazed windows, a thermal model for the ventilated double-chamber double-glazed window was created and solved for non-stationary conditions. For the first time in the thermophysical model of heat transfer through the two-chamber ventilated double-glazed window the influence of the insolation effect is taken into account. The calculations confirmed that for two-chamber ventilated double-glazed windows, at 1,5 times the air exchange in the room, the blowing of air that is removed through the inner chamber of a two-chamber glass pane, leads to a decrease in annual heat loss through a similar design in 2 times.

For the first time a three-dimensional non-stationary thermophysical model of aerodynamics of air and heat transfer in the environmental system - double-glazed double-glazed unit - building of the building was proposed.

Recommendations on the effective use of energy efficient window constructions have been developed. As a result of the proposed innovation measures can achieve resistance values of heat transfer through window construction  $1 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ .

The practical significance of the results of the thesis confirmed the inclusion of the results obtained in the records department bases thermal energy saving technologies Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine and confirmed act for the implementation of "HEAT ENERGY ENGINEERING" by applying the method of calculation of heat loss through VC.

Keywords: single-chamber, double-glazed windows, ventilated double-glazed windows, energy-saving double-glazed windows, window profile, thermophysical modeling, computer modeling, heat loss, window opening, heat transfer resistance.

### **Spysok publikatsii zdo buvacha.**

Statti u vydanniakh, shcho vkhodiat do mizhnarodnykh naukometrychnykh baz danykh:

1. Basok B.Y., Nakorchevskiy A.Y., Goncharuk S.M., Kuzhel L.N. Eksperimentalnye issledovaniya teploperedachy cherez okonnye steklopaketi s uchetom deistviya vneshnykh faktorov. *Ynzhenerno-fyzycheskyi zhurnal*. 2017. T.90. №1. S. 94-101. (SCOPUS, INSPEC, ADS, CAS, Google Scholar, EBSCO, CSA, Academic OneFile, Academic Search, CSA Environmental Sciences, Earthquake Engineering Abstracts, EI-Cjmpendex, Gale, INIS Atomindex, OCLC, SCImago, Summon by ProQuest).
2. Basok B., Davydenko B., Zhelykh V., Goncharuk S., Kuzhel L. Influence of low-emissivity coating on heat transfer through the double-glazing windows.



*Building physics in theory and practice. Scientific Journal.* 2016. Vol. VIII. No. 4. P. 5-8. (ISSN 1734-4891).

3. B.Y. Basok, B.V. Davydenko, S.A. Isaev, S.M. Goncharuk, L.N. Kuzhel. Chyslennoe modelyrovanye teploperenosa cherez dvukhkamernyi steklopaket. *Ynzhenerno-fyzycheskyi zhurnal.* 2016. T.89. №5. S. 1288-1295. (SCOPUS, INSPEC, ADS, CAS, Google Scholar, EBSCO, CSA, Academic OneFile, Academic Search, CSA Environmental Sciences, Earthquake Engineering Abstracts, EI-Cjmpendex, Gale, INIS Atomindex, OCLC, SCImago, Summon by ProQuest).

4. O.M. Lysenko, L.M. Kuzhel, I.K. Bozhko. Upravlinnia teplopostachanniam budivli na osnovi vykorystannia individualnoho teplovoho punktu oryhinalnoi konstruktsii. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii.* 2015. T. 1, N 8(73). S. 61-67. – Rezhym dostupu: DOI : 10.15587/1729-4061.2015.37917 (Ulrichs Periodicals Directory, Index Copernicus).

Statti u naukovykh fakhovykh vydanniakh:

5. Basok B. I., Davydenko B. V., Kuzhel L. M., Goncharuk S. M., Bieliaieva T. G. Eksperymentalni doslidzhennia teploperedachi cherez enerhoefektyvni sklopakety z nyzkoemisiinym miahkym pokryttiam. *Prom. Teplotekhnika.* 2017. T. 39. №1. S. 41-48.

6. Basok B.I., Davydenko B.V., Kuzhel L.M., Novikov V.G., Kalinina M.F. Chyselni doslidzhennia vplyvu radiatsiinoho ta konvektyvnoho teploperenosu na teploizoliatsiinu spromozhnist dvokamernykh sklopaketiv. *Prom. Teplotekhnika.* 2017. T.39. №3. S. 60-65.

7. Goncharuk S.M., Kalinina M.F., Bozhko I.K., Kuzhel L.M., Lysenko O.M. Stvorennia eksperymentalnoho enerhoefektyvnoho budynku pasyvnoho typu «nul enerhii». *Prom. Teplotekhnika.* 2014. T. 36, №3. S. 88-95.

8. A.N. Nedbailo, M.F. Kalynyna, Y.K. Bozhko, M.P. Novytskaia, S.M. Goncharuk, L.N. Kuzhel, O.N. Lysenko. Matematycheskaia model nestatsyonarnoho protsessa teploperenosa v mnohosloinoi ohrazhdaiushchei konstruktsyy. *Keramyka: nauka y zhyzn.* 2014. № 2 (23). S. 14-29.

9. Davydenko B.V., Goncharuk S.M., Novitska M.P., Kuzhel L.M., Krasota D.O. Eksperymentalni doslidzhennia teploperenosu cherez suchasni vikonni konstruktsii v realnykh umovakh ekspluatatsii. *Enerhoefektyvnist u budivnytstvi ta arkhitekturi*. 2015. №7, S. 65-71.

10. Basok B.I., Davydenko B.V., Goncharuk S.M., Kuzhel L.M. Eksperymentalni doslidzhennia teploperenosu cherez suchasni vikonni konstruktsii v realnykh umovakh yikh ekspluatatsii. *Okonnye tekhnolohyy*. 2015. №60(2), S. 24-26. URL: <http://wt.com.ua/biblioteka/arkhiv-nomerov/488-60-2-2015.html>

11. B.I. Basok, A.I. Nakorchevskyi, L.M. Kuzhel, S.M. Goncharuk, M.P. Novitska. Eksperymentalni doslidzhennia teploperedachi cherez sklopakety z vrakhuvanniam zovnishnikh klimatychnykh faktoriv. *Metodyka opratsiuvannia danykh. Enerhoefektyvnist v budivnytstvi ta arkhitekturi*. 2016. Vyp. 8. S. 15-20.

Dodatkovy vidobrazhaie naukovi rezultaty dysertatsii patent Ukrainy na vynakhid:

Sposib zabezpechennia povitriano-teplovei zavisy teplotoiu gruntu: pat. № 88791 Ukraina: № u 201314599; zaiavl. 25.03.2014, Biul. № 6. 4 s.

### **Aprobatsiia materialiv dysertatsii:**

1. L.M. Kuzhel. Enerhoefektyvni svitloprozori konstruktsii. II Mizhnarodna naukovopraktychna konferentsiia molodykh vchenykh. Vidnovliuvalna enerhetyka, novitni avtomatyzovani elektrotekhnolohii v biotekhnichnykh systemakh APK: tezy dopovidei. (m. Kyiv, 16 - 17 zhovtnia 2014). Kyiv. 2014. S. 38-40.

2. Basok B.I., Nakorchevskyi A.I., Goncharuk S.M., Kuzhel L.M., Nezhuta V.P. Eksperymentalni doslidzhennia teploperedachi cherez sklopakety z vrakhuvanniam zovnishnikh klimatychnykh faktoriv. IX Mizhnarodna konferentsiia "Problemy promyslovoi teplotekhniki": tezy dopovidei. (m. Kyiv, 20 – 23 zhovtnia 2015). Kyiv. 2015. S. 105.

3. Basok B.I., Novitska M.P., Kuzhel L.M. Teplofizychni modeliuvannia eksperymentalnoho enerhoefektyvnoho budynku, obladnanoho teplovoiu zavisoiu

fasadnykh stin. IX Mizhnarodna konferentsiia “Problemy promyslovoi teplotekhniki”: tezy dopovidei. (m. Kyiv, 20 – 23 zhovtnia 2015). Kyiv. 2015. S. 107.

4. Basok B., Nakorchevskiy A., Kuzhel L., Goncharuk S., Novitska M. Experimental study heat transfer trough glass with including external climatic factors. Method of data processing. Intehrovani enerhoefektyvni tekhnolohii v arkhitekturi ta budivnytstvi: «ENERHOINTEHRAITSIA-2016»: materialy robochoi prohramy ta tezy dopovidei shostoi mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. (m. Kyiv 13 - 15 kvitnia 2016). Kyiv. 2016. S. 20-21.

5 B.Y. Basok, B.V. Davydenko, S.M. Goncharuk, O.N. Lysenko, L.N. Kuzhel. Eksperymentalnye y teoretycheskye issledovanya teploperenosa cherez dvukhkamernyi steklopaket okonnoi konstruksii. XV Mynskiy mezhdunarodnyi forum po teplo- y massoobmenu: tezysy dokladov y soobshchenyi. (h. Mynsk 23 - 26 maia 2016). Mynsk, YTM ym. A.V. Lykova NAN Belarusy. 2016. Tom 3. S. 269-273.

6. B.Y. Basok, A.Y. Nakorchevskiy, L.N. Kuzhel, S.M. Goncharuk, O.N. Lysenko. Eksperymentalnye issledovanya teploperedachy cherez steklopakety s uchetom klymatycheskykh faktorov. XV Mynskiy mezhdunarodnyi forum po teplo- y massoobmenu: tezysy dokladov y soobshchenyi (h. Mynsk 23 - 26 maia 2016). Mynsk, YTM ym. A.V. Lykova NAN Belarusy, 2016. Tom 3. S. 280-283.

7 L.M. Kuzhel. Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti budivel shliakhom zmeshennia teplovtrat cherez svitloprozori vikonni konstruksii. Mizhnarodna naukovo-tekhnichna ta navchalno-metodychna konferentsiia. Enerhetychnyi menedzhment: stan ta perspektyvy rozvytku – Pems2016: zbirnyk materialiv konfer. (m. Kyiv 30 travnia - 01 chervnia 2016). Kyiv, NTUU «KPI». 2016. S. 40.

8. Basok B. I., Davydenko B. V., Kuzhel L. M. Enerhoefektyvni vikonni konstruksii – zaporuka pidvyshchennia enerhoefektyvnosti budivel. XVII mizhnarodna naukovo-praktychnoi konferentsii “Vidnovliuvana enerhetyka ta enerhoefektyvnist u XXI stolitti”: materialy konf. (Kyiv 29 – 30 veresnia 2016). Kyiv. NTUU «KPI». 2016. S. 349-352.

9 Basok B.I., Goncharuk S.M., Kuzhel L.M. Pokrashchennia enerhetychnoi efektyvnosti budivel shliakhom zastosuvannia suchasnykh enerhoefektyvnykh

vikonnykh konstruktsii. XVI Vseukrainska naukovo-tekhnichna konferentsiia “Aktualni problemy enerhetyky ta ekolohii”: materialy naukovo-praktychnoi konferentsii ONAKHT, (Odesa, 5 - 8 zhovtnia 2016). Odesa. 2016. S. 148-149.

10. Basok B.I., Davydenko B.V., Kuzhel L.M., Novikov V.G. Eksperymentalni ta chyselni doslidzhennia radiatsiino-konvektyvnoho teploperenosu cherez vikonni konstruktsii. Mizhnarodna naukovo-praktychna ta navchalno-metodychna konferentsiia Enerhetychni menedzhment: stan ta perspektyvy rozvytku – Pems2017: zbirnyk materialiv konfer. (m. Kyiv 25 – 27 kvitnia 2017). Kyiv, NTUU «KPI» im. Ihoria Sikorskoho. 2017. S. 16.

11. Basok B., Davydenko B, Kuzhel L., Novikov V. Vplyv radiatsiinoho ta konvektyvnoho teploperenosu na teploizoliatsiinu spromozhnist dvokamernykh sklopaketiv. Intehrovani enerhoefektyvni tekhnolohii v arkhitekturi ta budivnytstvi: «ENERHOINTEHRAITSIA-2017»: materialy robochoi prohramy ta tezy dopovidei somoi mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. (m. Kyiv 26 - 28 kvitnia 2017). Kyiv. 2017. S. 37-38.

## ЗМІСТ

|  |     |
|--|-----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ   | 23  |
| ВСТУП  | 27  |
| РОЗДІЛ 1. СТАН ТЕОРЕТИЧНИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ЧЕРЕЗ ВІКОННІ КОНСТРУКЦІЇ.   |     |
| Основні поняття та терміни.  | 33  |
| 1.1 Однокамерні та двокамерні склопакети   | 37  |
| 1.2 Профілі віконні  | 45  |
| 1.3 Теоретичні дослідження теплопередачі через віконні конструкції   | 52  |
| 1.4 Мета та постановка задач дослідження   | 54  |
| Висновки до розділу 1  | 55  |
| РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ЧЕРЕЗ ВІКОННІ КОНСТРУКЦІЇ   | 57  |
| 2.1. Експериментальні дослідження для віконних склопакетів   | 60  |
| 2.2. Дослідження однокамерного склопакету 6M <sub>1</sub> -12-6i   | 64  |
| 2.3. Дослідження теплопередачі двокамерного склопакету 4M <sub>1</sub> -10-4M <sub>1</sub> -10-4i в зимовий та в літній періоди року                           | 71  |
| 2.4. Дослідження двокамерного склопакету 4M <sub>1</sub> -20-4M <sub>1</sub> -20-4i  | 74  |
| 2.5. Дослідження двокамерного склопакету з двома низькоемісійними покриттями, встановленого в експериментальному енергоефективному будинку пасивного типу      | 77  |
| Висновки до розділу 2  | 82  |
| РОЗДІЛ 3. ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ЧЕРЕЗ ВІКОННІ КОНСТРУКЦІЇ  | 83  |
| 3.1. Інженерна методика розрахунку річних тепловтрат через одно- та багатокамерні склопакети (одновимірною теплофізичною моделлю, баланс енергетичних потоків) | 83  |
| 3.2. Числове моделювання теплопередачі через одно- та двокамерні склопакети. Двовимірною задачею   | 103 |
| 3.3. Теплофізичне моделювання теплопередачі через двокамерні склопакети  |     |

|  |     |
|--|-----|
| з низькоемісійними покриттями  | 110 |
| 3.3.1. Верифікація теплофізичної моделі по експериментальних даних   | 113 |
| 3.4. Комп'ютерне CFD моделювання радіаційно-конвективного теплообміну двокамерного склопакету в тривимірній постановці                         | 119 |
| Висновки до розділу 3  | 123 |
| РОЗДІЛ 4. ПРОФІЛІ ВІКОННИ  | 126 |
| 4.1. Експериментальні дослідження теплопередачі через трикамерний профіль  | 126 |
| 4.2. Експериментальні дослідження теплопередачі через п'ятикамерний профіль  | 129 |
| 4.3. Експериментальні дослідження теплопередачі через шестикамерний профіль  | 131 |
| Висновки до 4 розділу та рекомендації щодо вибору та встановлення віконних профілів рам  | 134 |
| РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНОК ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ЧЕРЕЗ ФАСАДНІ СТІНИ З ВІКОННИМ СКЛОПАКЕТОМ  | 136 |
| 5.1. Методика системного врахування безперервної дії всієї сукупності кліматичних параметрів. Алгоритм опрацювання експериментальних даних     | 136 |
| 5.2. Верифікація теплофізичної моделі по експериментальних даних для двокамерного склопакету на північній стороні будівлі                      | 146 |
| 5.3. Теплофізична модель розрахунку тепловтрат через двокамерний вентильований склопакет   | 151 |
| Висновки до розділу 5  | 164 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ РОБОТИ   | 166 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ   | 168 |
| ДОДАТКИ  | 178 |
| Додаток А. Основні технічні характеристики деяких вимірювальних приладів та датчиків, що використовувалися при експериментальних дослідженнях. | 179 |
| Додаток Б. Акт про впровадження матеріалів дисертаційної роботи.   | 183 |
| Додаток В. Перелік публікацій здобувача.   | 185 |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ, СКОРОЧЕНЬ

### Позначення:

$A$  – альbedo;

$a$  – коефіцієнт температуропровідності,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$B$  – товщина камери склопакету,  $\text{м}$ ;

$L$  – ширина камери склопакету,  $\text{м}$ ;

$H$  – висота склопакету,  $\text{м}$ ;

$C$  – емпіричний коефіцієнт;

$C_p$  – питома теплоємність при постійному тиску,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;

$C_{\text{в}}^{\text{п}}$  и  $C_{\text{зов}}^{\text{п}}$  – приведені коефіцієнти випромінювання для внутрішньої і зовнішньої поверхонь огороження,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К}^4)$ ;

$C_{i,i+1}^+$  – коефіцієнт променевої тепловіддачі між  $i$  та  $i+1$  поверхнями,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;

$c_0$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла.  $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$ ;

$c$  – питома теплоємність,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;

$\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведений коефіцієнт чорноти поверхонь скла;

$dx; dy, dz,$  – кроки різницевої сітки по координатам  $x, y$  та  $z$  відповідно,  $\text{м}$ ;

$F$  – площа,  $\text{м}^2$ ;

$e$  – питома енергія,  $\text{Дж}/\text{м}^2$ ;

$G$  – витрата,  $\text{кг}/\text{с}$ ;

$g$  –  $9,81 \text{ м}/\text{с}^2$ ;

$i, j, k$  – одиничні вектори;

$k$  – кінетична енергія турбулентності,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ ;

$n$  – експериментально визначений показник ступеня;

$H$  – висота камери,  $\text{м}$ ;

$h$  – висота,  $\text{м}$ ;

$Q$  – тепловий потік,  $\text{Вт}$ ;

$q$  – густина теплового потоку,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$q_{\text{в.к}}, q_{\text{в.р}}, q_{\text{зов.к}}, q_{\text{зов.р}}$  – густини конвективного і радіаційного теплових потоків на внутрішній і зовнішній поверхнях огороження,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

- $q_s$  – густини сонячного випромінювання на зовнішній поверхні огороження, Вт/м<sup>2</sup>;
- $p$  – тиск, Па;
- $R$  – опір теплопередачі, м·К/Вт;
- $R_{п.з.}$  – опір теплопередачі відповідно до паспорту на виріб м<sup>2</sup> К/Вт
- $R_{о,експ}$  – опір теплопередачі експериментально визначений м<sup>2</sup> К/Вт;
- $T$  – абсолютна температура, °К;
- $T_{вн}, T_{зов}$  – температури в приміщенні і зовнішнього повітря, °С;
- $t$  – температура, °С;
- $t$  – час, с;
- $t_{сх}$  і  $t_{зх}$  – години заходу і сходу Сонця, с;
- $U$  – модуль вектора швидкості вітру, м/с;
- $U$  – густина сонячної радіації, Дж/(м<sup>2</sup>·сут);
- $U_s$  і  $U_d$  – добові густини сонячної і розсіяною енергії радіації, Дж/м<sup>2</sup>;
- $u, v, w$  – проекції векторів швидкості на осі  $OX, OY$  та  $OZ$  декартової системи координат, м/с;
- $X, Y, Z$  – лінійні розміри, м;
- $x, y, z$  – координати, м;
- $\alpha$  – коефіцієнт конвективної тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);
- $\beta$  – кут нахилу огороження, рад;
- $\beta$  чи  $\gamma$  – температурний коефіцієнт об'ємного розширення, К<sup>-1</sup>;
- $\delta_{скл}$  – товщина скла, м;
- $\varphi$  – коефіцієнт взаємного опромінення;
- $\varepsilon$  – швидкість дисипації кінетичної енергії турбулентності, м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>;
- $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);
- $\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості, Па·с;
- $\nu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м<sup>2</sup>/с;
- $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;
- $\sigma$  – емпіричний коефіцієнт;
- $\tau$  – інтервал часу, с;



**Критерії:**

Gr – число Грасгофа;

Nu – число Нуссельта;

Ra – число Релея;

**Індекси:**

$d$  – дифузія;

$s$  – сонце;

$x, y, z$  – при  $x, y, z$ ;

$\delta$  – товщина;

$\delta$  – при  $x = \delta$ ;

$\beta$  – при куті нахилу  $\beta$ ;

0 – при  $x = 0$ ;

$\leftrightarrow$  – горизонталь;

$\updownarrow$  – вертикаль;

\* – річне значення;

eff – ефективний;

min – мінімальний;

max – максимальний

t – турбулентний;

$\infty$  – незбурений потік;

0 – параметри анемометра метеостанції;

в – внутрішній;

пов – повітря;

сх – схід;

зх – захід;

к – конвекція

цег – цегла;

пр – променевий;

зов – зовнішній;

п – приведений;

пн– північ;

ск – склопакет;

ср – середнє;

сум – сумарний;

ст, скл – скло

ч – чорний;

пд - південь

вих – вихід;

вн – внутрішній;

експ – експериментальний;

втр – втрат;

вх – вхід;

експ – експериментальний;

інф – інфільтрація;

конв – конвективний;

ст – стіна;

теор – теоретичний;

### **Скорочення:**

ВК – віконна конструкція;

СОК – світлопрозора огороджувальна конструкція;

СК – склопакет;

БТР – блок теплової реєстрації;

ОК – огороджувальна конструкція;

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Проблеми ефективного використання енергоресурсів і енергозаощадження в сучасних умовах є головним завданням забезпечення енергетичної безпеки, а тому відносяться до найважливіших стратегічних задач України. Спроби вирішення проблеми підвищення енергетичної ефективності в країні робилися продовж досить значного періоду часу. Було розроблено велику кількість нормативно-правових актів різного рівня (більше 250), запропоновано безліч заходів, у тому числі й з врахуванням досвіду європейських країн. Україна долучилася до Договору про Енергетичне Співтовариство та інших європейських ініціатив, де скорочення питомого споживання енергетичних ресурсів є одним із найважливіших напрямів енергетичної політики [1]. Із прийняттям урядом України «Національного плану дій з енергоефективності на період до 2020 року» [2], Закону України «Про енергоефективність будівель» та нової енергетичної стратегії до 2035 року, наша країна отримала можливість запроваджувати європейські практики планування та прогнозування розвитку енергетики, реалізації політики підвищення енергоефективності. У відповідності до [2], житлові та громадські будівлі залишаються головним пріоритетом державної політики в сфері енергоефективності. Адже саме ця сфера є однією з найбільш енергоємних в країні і водночас має найбільший потенціал підвищення енергоефективності. Основним резервом економії енергоресурсів в житлово-комунальному господарстві є зниження споживання теплової енергії в будівельній галузі. При теплозабезпеченні об'єктів житлово-комунального комплексу до 40% марних витрат теплоти припадає на використання її в будівлях. Технічний стан більшості існуючих будівель та енергетичних систем не дозволяє забезпечувати необхідний рівень енергетичних характеристик будівель. Витрати теплоти на опалення приміщень в Україні можуть бути суттєво скорочені через влаштування теплоізоляції огорожувальних конструкцій (вікна, стіни, дах) будівель. Одним з варіантів вирішення проблеми енергозбереження є підвищення

енергоефективності будівель та споруд, а саме: застосування комплексу заходів для покращення теплоізоляційних властивостей огорожувальних конструкцій будівель, а також проведення модернізації існуючих інженерних систем, що забезпечують необхідний тепловий комфорт. Питомі теплозахисні характеристики віконних конструкцій (ВК) в декілька разів нижчі, ніж фасадних стін, що призводить до підвищених тепловтрат через вікна в зимовий період року і додаткових витрат на кондиціонування в літній період. У холодний період року через низьку температуру внутрішнього скління істотно знижується комфортність приміщень. Крім того, світлопрозорі огорожувальні конструкції (СОК) є малоінерційними в тепловому відношенні, а тому у них досить швидко змінюються теплові параметри внутрішніх поверхонь при зміні зовнішніх погодних умов. Тому актуальною є задача проведення комплексних досліджень теплопередачі через склопакети та віконні профілі, особливо в реальних кліматичних умовах їх довготривалої експлуатації.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота відповідає науковому напрямку Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України та виконувалась за державними тематиками: «Теплофізичні основи підвищення енергоефективності будівель» (2012-2016 рр., 0112U000296); «Аеродинамічна та тепла взаємодія будівлі з зовнішнім середовищем» (2011-2012, 0111U000350); «Енергомодельовання будівлі з врахуванням її конструктивних особливостей, системи енергозабезпечення, зовнішнього середовища та клімату» (2015-2019, 0115U003364); «Розробка і оптимізація низькотемпературних систем теплозабезпечення на основі відновлюваних джерел енергії» (2015-2019, 0115U003363); «Аеродинаміка та теплообмін в світлопрозорих конструкціях при їх взаємодії з тепловим випромінюванням» (2017-2021, 0117U000832), «Створення експериментального енергоефективного будинку пасивного типу» (2011, 0111U008782); «Створення комбінованої системи енергоресурсозабезпечення типу «нуль енергії» для експериментального пасивного будинку» (2013, 0113U008041).

**Мета та завдання дослідження.** Мета роботи – теоретичні та експериментальні дослідження аеродинаміки і теплопередачі через віконні конструкції (склопакети та профілі) в реальних кліматичних умовах їх експлуатації та на основі встановлених закономірностей розробка і реалізація рекомендацій практичних заходів щодо зменшення тепловтрат будівлі через світлопрозорі елементи фасадів.

Для досягнення цієї мети були поставлені та вирішені наступні задачі:

- створити експериментальний вимірювальний комплекс для дослідження теплоізоляційних властивостей світлопрозорих огорожувальних конструкцій (СОК) будівлі при їх реальній експлуатації;

- провести експериментальні дослідження полів температури та густини теплового потоку на поверхнях склопакетів та на віконних профілях;

- розробити теплофізичні моделі (в одно-, дво- та в тривимірній нестационарній постановці) аеродинаміки і теплопередачі та проведення їх експериментальної верифікації (валідації);

- дослідити вплив зовнішніх кліматичних факторів на тепловтрати через ВК та на повітряно-температурний внутрішній стан будівлі;

- розробити інженерну методику розрахунку річних тепловтрат через склопакети;

- розробити рекомендації щодо проведення термомодернізації адміністративних будівель в частині світлопрозорих конструкцій (СК) та формування рекомендацій для створення СК будівель високої енергоефективності;

- провести моніторинг теплового стану ВК термомодернізованої будівлі за умов реального клімату їх тривалої експлуатації;

- створити банк експериментальних даних по опору теплопередачі склопакетів та віконних профілів різних СК, особливо для тих, дані для яких наразі відсутні в ДБН України.

**Об'єкт дослідження** – склопакети різного типу і профілі віконних рам, які встановлені в триповерховій будівлі каркасно-панельного типу та в будинку

пасивного типу “нуль енергії”.

**Предмет дослідження** – процеси теплопередачі та аеродинаміки в віконних конструкціях та в віконних профілях.

**Методи дослідження** - аналітичні; експериментальні (лабораторні та промислові в умовах реального клімату); числове теплофізичне моделювання; комп’ютерне моделювання (власними пакетами та CFD-пакетами).

**Наукова новизна отриманих результатів.**

- вперше експериментально виявлено теплофізичний ефект, що спостерігається в полудень в зимовий період і полягає в оберненні напрямку теплового потоку на зовнішній поверхні склопакету і віконного профілю, що пов’язано з нестационарністю процесу теплопередачі та з впливом денного розсіяного сонячного випромінювання;

- вперше в двовимірній теплофізичній моделі теплопередачі через двокамерний склопакет враховано вплив ефекту низькоемісійного і-покриття (одного та двох);

- вперше оцінено розподіл теплопровідно-конвективних та радіаційних вкладів теплового потоку на зовнішній та внутрішній поверхнях склопакету;

- вперше досліджено вплив інсоляції на теплопередачу через склопакети;

- вперше в теплофізичній моделі теплопередачі через двокамерний вентиляований склопакет враховано вплив ефекту інсоляції;

- вперше запропонована тривимірна теплофізична модель аеродинаміки повітря та теплообміну в системі довкілля – двокамерний склопакет – приміщення будівлі;

- вперше експериментально досліджені профілі віконні в реальних умовах експлуатації;

– отримано великий масив експериментальних даних по температурних полях, полях теплового потоку та по опору теплопередачі 8 віконних склопакетів і 3 типів віконних профілів рам при їх довготривалій експлуатації в умовах реального клімату.

**Практичне значення отриманих результатів.** Запропоновані варіанти розрахунку тепловтрат дозволяють значно вдосконалити існуючі методики у будівельній теплотехніці. Запропоновано заходи із зменшення теплоспоживання досліджуваної адміністративної будівлі в частині встановлення енергоефективних вікон. Заходи увійшли до проекту термомодернізації корпусів № 1, 2 по вул. Булаховського, 2 ІТТФ НАН України. Проведено ряд експериментальних та теоретичних досліджень і встановлено найбільш оптимальний тип склопакетів для заміни старих вікон, а також для будинків пасивного типу. Також встановлені теплоізоляційні характеристики для віконних профілів. Проведено комп'ютерне моделювання в тривимірній постановці типового склопакету ВК, що встановлений в адміністративній будівлі № 1 ІТТФ НАН України, вул. Булаховського, 2. Практичне значення результатів дисертаційної роботи підтверджується включенням отриманих результатів в звіти відділу теплофізичних основ енергоощадних технологій ІТТФ НАН України та підтвержені актом впровадження на ТОВ «ЕНЕРГО ТЕПЛО ІНЖИНІРИНГ» шляхом застосування методики розрахунку тепловтрат через ВК.

**Особистий внесок добувача.** Здобувачем було проведено експериментальні дослідження теплопередачі через ВК та обробка отриманих результатів. Було вдосконалено існуючу теплофізичну модель розрахунку теплопередачі через двокамерний склопакет зі звичайним склопакетом для розрахунку склопакету з низькоемісійними покриттями нанесеними на поверхню склопакету, а також було вирішено цю задачу в нестационарній постановці. Також було вдосконалено інженерну модель розрахунку тепловтрат через віконні склопакети. Здобувачем була запропонована тривимірна нестационарна теплофізична модель аеродинаміки повітря та теплообміну в системі довкілля – двокамерний склопакет – приміщення будівлі. На основі інженерної методики, було складено теплофізичну модель для вентиляованого двокамерного склопакету і вирішено для нестационарних умов.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи обговорювалися і отримали схвалення на: II міжнародній науково-практичній

конференції молодих вчених «Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біохімічних системах АПК» (м. Київ, 16–17 жовтня 2014 р.); IX Міжнародній конференції «Проблеми промислової теплотехніки» (м. Київ, 20–23 жовтня 2015 р.); XV Мінському міжнародному форумі по тепло- і масообміну (м. Мінськ, 23-26 травня 2016 р.); VI і VII міжнародних науково-практичних конференціях «Енергоінтеграція» (м. Київ, 2016–2017 рр.); III і IV міжнародній науково-технічній та навчально-методичній конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи - REMS» (м. Київ, 2016–2017 рр.); XVII міжнародній науково-практичній конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (м. Київ, 29–30 вересня 2016 р.); XVI всеукраїнській науково-технічній конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології» (м. Одеса, 5-8 жовтня 2016 р.); X міжнародній конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» (м. Київ, 23–26 травня 2017 р.).

**Структура дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Загальний обсяг роботи складає 190 сторінок, у тому числі 122 ілюстрації, 6 таблиць, список літератури, що включає в себе 85 найменувань, 3 додатки на 12 сторінках. Об'єм основного тексту дисертації – 140 сторінок.



## РОЗДІЛ 1.

# СТАН ТЕОРЕТИЧНИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ЧЕРЕЗ ВІКОННІ КОНСТРУКЦІЇ.

### 1. Основні поняття та терміни

У відповідності до Національного стандарту України [3], приведено основні визначення:

**Вікно** - елемент стінової або покрівельної конструкції, призначений для сполучення внутрішніх приміщень із навколишнім середовищем, природного освітлення приміщень, їх вентиляції, захисту від атмосферних, шумових впливів і який складається з віконного прорізу з косяками, віконного блока, системи ущільнення, монтажних швів, підвіконня, деталей зливу і облицювань.

**Віконний проріз** - проріз у стіні (покрівлі) для монтажу одного або декількох віконних блоків, конструкція якого передбачає також улаштування монтажного шва та встановлення косяків, зливів, підвіконня.

**Віконна рама** - світлопрозора конструкція зі складним переплетінням, яку застосовують, як правило, для застосування веранд; багатоярусна віконна конструкція, яка складається зі стояків, ригелів, перекладок тощо, у чарунки якої встановлюють склопакети, стулки, блоки віконні.

**Віконний блок** - світлопрозора частина конструкції, призначена для природного освітлення приміщень, їх вентиляції і захисту від атмосферних та шумових впливів. Блок віконний складається зі збірних одиниць: коробки і стулкових елементів, вбудованих систем провітрювання і може включати в себе ряд додаткових елементів: жалюзі, віконниці тощо.

Територію України розподілено на 2 температурні зони [3]. Для 1-ї зони коефіцієнт опору теплопередачі склопакетів повинен бути не менше  $0,75 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$ , для 2-ї температурної зони - не менше ніж  $0,6 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$ .



Рис.1.1. Карта-схема температурних зон України.

За основними експлуатаційними характеристиками блоки віконні підрозділяють [4]:

- за показником приведенного опору теплопередачі вікна підрозділяють на класи:

A1 –  $0,80 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$  і більше;

A2 – від  $0,75 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$  до  $0,79 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$ ;

B1 – «  $0,70 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$  »  $0,74 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$ ;

B2 – «  $0,65 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$  »  $0,69 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$ ;

B1 – «  $0,60 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$  »  $0,64 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$ ;

B2 – «  $0,55 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$  »  $0,59 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$ ;

Г1 – «  $0,50 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$  »  $0,54 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$ ;

Г2 – «  $0,45 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$  »  $0,49 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$ ;

Д1 – «  $0,40 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$  »  $0,44 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$ ;

Д2 – «  $0,35 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$  »  $0,39 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$ ;

Примітка. Блокам віконним з опором теплопередачі нижче  $0,35 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$  клас не присвоюють.

## КЛАСИФІКАЦІЯ

1. Блоки віконні класифікують за такими ознаками:

- за призначенням;

- за матеріалами рамочних елементів;

- за варіантами заповнення світлопрозорої частини;

- за варіантами конструктивного виконання;
- за архітектурним рисунком;
- за основними експлуатаційними характеристиками.

Перші дві ознаки відносять до ознак виду вікна.

**1.1** За призначенням блоки віконні підрозділяються для застосування:

- у житлових будинках;
- у громадських будинках;
- у виробничих будинках і спорудах.

**1.2** За матеріалами рамочних елементів блоки віконні підрозділяють на:

- дерев'яні – Д;
- полівінілхлоридні – П;
- з алюмінієвих сплавів – А;
- сталеві – Ст;
- комбіновані (деревоалюмінієві, деревополівінілхлоридні тощо) -ДА, ДП;
- склопластикові – Спл;
- пластикові- Пл.

**1.3** За варіантами заповнення світлопрозорої частини блоки віконні підрозділяють на:

- з листовим склом;
- зі склопакетами;
- з листовим склом і склопакетами.

**1.4** За варіантами конструктивного виконання блоки віконні підрозділяються:

- за типами конструкцій: одинарні, спарені, роздільні, роздільно-спарені;
- за кількістю рядів скління: одинарним, подвійним, потрійним та в чотири ряди;
- за кількістю стулок у одному ряду скління: одностулкові, двостулкові,

багатостулкові;

- за напрямком відчинення стулок: всередину приміщення, назовні, двостороннього, правого лівого, симетричного;

- за способом відчинення стулок: поворотні, підвісні, відкидні, поворотно-відкидні, середньо-поворотні, розсувні, підймальні, комбіновані, глухі (ті, що не відчиняються);

- у залежності від елементів, які склять: із заскленними стулковими елементами, із заскленними коробками, з суміщеним склінням;

- за конструкціями пристроїв для провітрювання і регулювання температурно-вологісного режиму приміщення: з кватирками, зі стулками з відкидним (поворотно-відкидним) регульованим відчиненням, із фрамугами з клапанними стулками, з вентиляційними та кліматичними клапанами, з системами самовентиляції;

- за конструктивним рішенням притулів стулок: з імпостним та безімпостним (штульповим) притулами;

- за кількістю і розташуванням контурів ущільнення у притулах: з одним ущільненням, із середнім та внутрішнім ущільненням, із зовнішнім та внутрішнім ущільненням, із зовнішнім, внутрішнім та середнім ущільненням;

- за видами кутових з'єднань: нерозбірні (клейові, зварні, спресовані тощо), збірно-розбірні (на механічних зв'язках);

1.5 За архітектурними рисунками блоки віконні підрозділяють на:

- прямокутні;
- фігурні (трикутні, багатокутні, аркові, круглі, овальні тощо);
- з декоративними переплетіннями;
- зі складним рисунком (наприклад, аркові зі слупиковим переплетінням).

У відповідності до [4]:

**Склопакет.** Об'ємні вироби, що складаються з двох або трьох паралельно розташованих листів скла, з'єднаних між собою за контуром за допомогою дистанційних рамок із металу або пластику та герметиків, утворюючи одну чи

більше ізольованих від зовнішнього повітря герметично замкнених камер, що заповнені висушеним повітрям або іншим газом.

**Скло енергозберігаюче.** Скло з нанесеними на його поверхню сумішами тонких шарів металів, які відбивають електромагнітні хвилі в інфрачервоному секторі спектру.

**Дистанційна рамка.** Елемент склопакета, який забезпечує розміри та форму прошарків між стеклами.

**Герметичність склопакета.** ДСТУБВ.2.7-107:2008 Властивість склопакета не пропускати газу, водяну пару та воду в прошарки між стеклами.

**Точка роси міжскляного прошарку.** Температура повітря або газу, що знаходиться в склопакеті, за якої водяна пара, що міститься в повітрі або газі, досягає стану насичення та конденсується на поверхні стекол у вигляді рідини.

**Скло сонцезахисне енергозберігаюче.** Скло забарвлене у масі для поглинання сонячного випромінювання.

**Ефективність вологопоглинача.** Здатність вологопоглинача, який знаходиться в конструкції дистанційної рамки, що визначає його властивість поглинати водяну пару з повітря або газу міжскляного прошарку.

**Довговічність склопакета.** Характеристика, що визначає здатність склопакетів зберігати експлуатаційні властивості впродовж заданого строку, що оцінюється за результатами лабораторних випробувань при імітації кліматичних експлуатаційних впливів.

**Умовний рік експлуатації склопакета.** Одиниця виміру довговічності склопакетів, що умовно оцінюється за результатами лабораторних циклічних кліматичних впливів на зміну їх експлуатаційних властивостей.

## 1.1 Однокамерні та двокамерні склопакети

Типові скляні вікна мали деякі недоліки. Наприклад, вони не захищали приміщення від шуму, легко могли розбитися та зовсім не мали теплоізолюючих властивостей. Склопакети ж, навпаки, є досить міцними та ударостійкими, а якщо

все ж таки вони випадково розбиваються, то їхні дрібні шматочки не здатні глибоко поранити.

Однокамерний склопакет. Склопакети, ціна яких є досить низькою, складаються з двох стекол та рамки. Такі склопакети є якісним економ варіантом. Зазвичай скло для такої конструкції використовується лише високоякісне, камера є герметичною. Якщо камеру склопакету заповнити теплоізолюючим матеріалом – наприклад, інертним газом, така конструкція дозволить зберегти до 5% коштів за опалення. У будь-якому разі, таке вікно служитиме набагато краще, ніж звичайне скло.

Двокамерний склопакет. Такий склопакет складається з трьох стекол та захисної герметичної рамки. Скло для склопакету буває різної товщини – і від цього теж залежить ціна та якість конструкції. Зрозуміло, що чим товще буде скло, тим надійніше приміщення буде захищене від стороннього проникнення, від вуличного галасу та негоди. Така конструкція збереже тепло і затишок оселі. Двокамерні склопакети стали полярними, адже теплозбереження є актуальною темою. Але якщо повітряну камеру склопакету заповнити аргоном або сухим повітрям, то буде тепло вдома та в офісі навіть у морозну погоду. Двокамерні склопакети мають лише один недолік. Розташовані в одній рамці три скла досить сильно резонують. Щоб цього уникнути, виробники почали розташовувати скло у склопакеті на різній відстані одне від одного. Таким чином, ефект резонансу було повністю ліквідовано.

У відповідності до [5], приведена класифікація склопакетів:

1. Склопакети в залежності від кількості камер поділяють на типи:  
СПО — однокамерні;  
СПД - двокамерні.

Типи і конструкцію склопакетів наведено на рис 1.2.

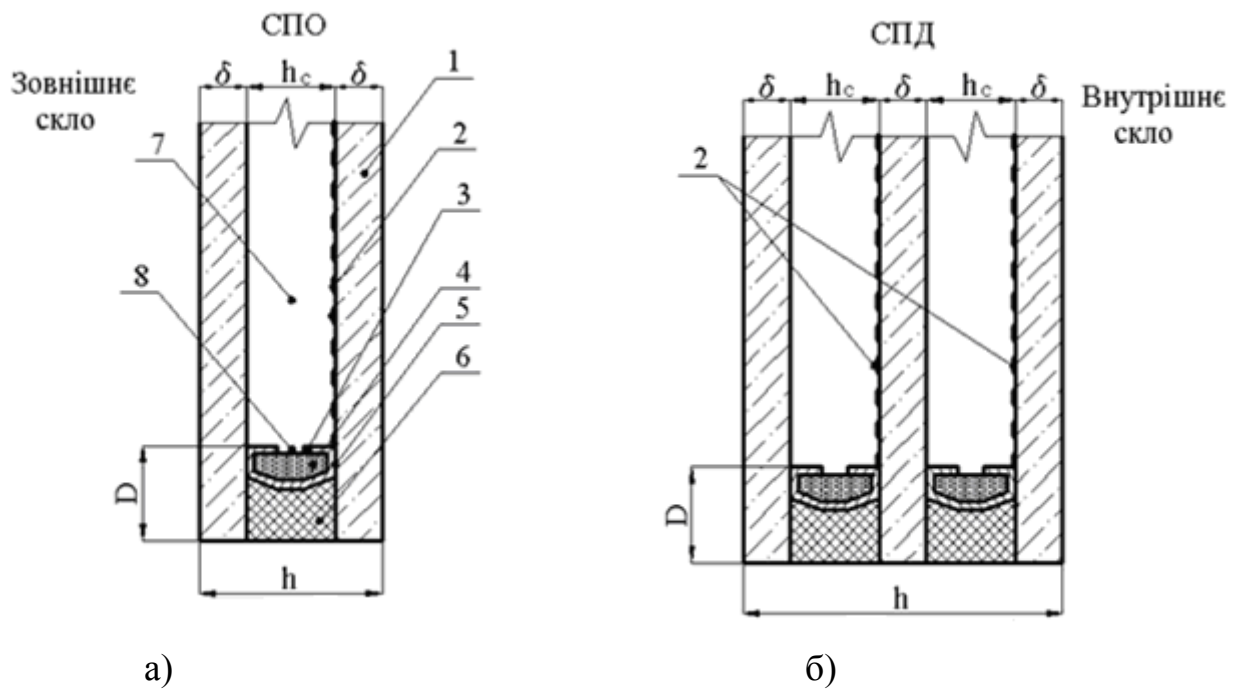


Рис. 1.2. Типи і конструкції склопакетів. а) однокамерний склопакет, б) двокамерний склопакет. 1 - скло; 2 - рекомендовані варіанти розташування низькоемісійного покриття у разі його застосування; 3-дистанційна рамка; 4 - вологопоглинач; 5 - нетверднучий герметик; 6 - тверднучий герметик; 7 - повітряний прошарок (міжскляна відстань); 8 - дегідратійні отвори;  $\delta$  - товщина склопакета;  $h_c$  - відстань між стеклами;  $D$  — глибина герметизуючого шару.

Камери склопакетів можуть бути заповнені: - висушеним повітрям; - інертним газом (аргон — Аг, криптон — Кг, ксенон — Хе, або їх сумішами). Допускається за узгодженням виробника зі споживачем виготовляти склопакети з чотирьох та більше плоских листів скла, а також встановлювати декоративні рамки всередині склопакетів.

2. Склопакети в залежності від призначення поділяються на види [5]:

- склопакети загальнобудівельного призначення – виготовляють з листового скла;
- склопакети будівельного призначення із спеціальними властивостями;
- стійкі при механічній дії, або ударостійкі (Уд) – з використанням багатошарових захисних стекол, стекол із захисними плівками чи загартованих і хімічно зміцнених стекол;
- енергозберігаючі (Е) – з використанням енергозберігаючих стекол;

- сонцезахисні (С) – з використанням сонцезахисних стекол;
- морозостійкі (М) – склопакети, які призначені для використання у кліматичних умовах з температурою зовнішнього повітря  $-60^{\circ}\text{C}$ ;
- шумозахисні (Ш) – склопакети, призначені для захисту приміщень від зовнішнього шуму підвищеного рівня.

Основні фізичні характеристики склопакетів повинні відповідати вимогам, наведеним у табл. 1.

Таблиця 1. Основні вимоги до фізичних характеристик склопакетів, відповідно до [5].

| Вид склопакета                   | Тип склопакета | Опір теплопередачі, $\text{m}^2\text{K}/\text{Вт}$ , не менше | Коефіцієнт направленої пропускання світла, %, не менше | Звукоізоляція <sup>^1</sup> ДБ, не менше | Точка роси, $^{\circ}\text{C}$ , не вище |
|----------------------------------|----------------|---|--|--|--|
| Загальнобудівельного призначення | Однокамерний   | 0,32  | 80   | 25                                       | Мінус 45                                 |
|                                  | Двокамерний    | 0,45  | 72   | 27                                       | Те саме                                  |
| Сонцезахисні                     | Однокамерний   | 0,32  |  | 25                                       | »  |
|                                  | Двокамерний    | 0,47  | –  | 27                                       | »  |
| Енергозберігаючі                 | Однокамерний   | 0,59  | 75   | 26                                       | »  |
|                                  | Двокамерний    | 0,72  | 65   | 28                                       | »  |
| Морозостійкі                     | Однокамерний   | 0,59  | 75   | 26                                       | Мінус 55                                 |
|                                  | Двокамерний    | 0,72  | 65   | 28                                       | Те саме                                  |
| Шумозахисні                      | Однокамерний   | 0,32  | 74   | 34                                       | Мінус 45                                 |
|                                  | Двокамерний    | 0,47  | 67   | 34                                       | Те саме                                  |

Примітка. Для характеристики сонцезахисних склопакетів застосовують коефіцієнт загального пропускання сонячної енергії, який встановлюють у проектній документації.

За формою стекол, з яких зібрані склопакети, вони можуть бути плоскими та криволінійними [6]. Криволінійні склопакети збираються із гнутих скло, тому їх називають гнутими склопакетами. Технологія виготовлення гнутих склопакетів принципово не відрізняється від технології збирання плоских склопакетів.

3. Види скла, які застосовують при виготовленні склопакетів, в залежності від призначення виробів, вказані у табл. 2.



Таблиця 2 – види скла, які застосовуються при виготовленні склопакетів.

| Найменування виду скла                    | Познака НД на скло, яке застосовують | Познака скла (марки)    |
|---|--------------------------------------|-------------------------|
| Листове                                   | ДСТУ Б В.2.7-122 (ГОСТ 111)          | M1, M2, M7              |
| Армоване                                  | ДСТУ Б В.2.7-148 ГОСТ 7481           | A                       |
| Багатошарове:<br>ударостійке;             | ДСТУ Б В.2.7-123 (ГОСТ 30826)        | P1A, P2A, P3A, P4A, P5A |
| тривке до пробивання;                     | ДСТУ Б В.2.7-123 (ГОСТ 30826)        | P6B, B7B, P8B           |
| безпечне                                  | ДСТУ Б В.2.7-123 (ГОСТ 30826)        | CM1, CM2, CM3, CM4      |
| Забарвлене у масі                         | НД                                   | T                       |
| Зміцнене: хімічно<br>зміцнене;            | НД                                   | X                       |
| загартоване                               | ДСТУ Б В.2.7-110 (ГОСТ 30698)        | Z                       |
| Сонцезахисне                              | НД                                   | C                       |
| Енергозберігаюче: з<br>твердим покриттям; | ДСТУ Б. В.2.7-115 (ГОСТ 30733)       | K                       |
| з м'яким покриттям                        | НД                                   | I                       |

4. Умовна позначка склопакета повинна складатись: із позначки типу, характеристики скла, що застосовується (вид скла та його товщина), відстані між стеклами, виду газонаповнення, висоти, ширини, товщини склопакета, виду склопакета та позначення даного стандарту [5]. Приклад умовної позначки однокамерного склопакета, який складається з двох листових стекол завтовшки 4 мм марки M-i згідно з ДСТУ Б В.2.7-122 (ГОСТ 111), з м'яким низькоемісійним покриттям на внутрішній поверхні скла, відстанню між стеклами 16 мм, заповненого аргоном, заввишки 1500 мм, завширшки 800 мм, завтовшки 24 мм, загальнобудівельного призначення: СПО 4 M1-16Ag-4i - 1500 x 800x 24 ДСТУ Б В.2.7-107-2008. Приклад умовної позначки двокамерного склопакета, який складається з трьох листових стекол завтовшки 4 мм-марки Mi згідно з ДСТУ Б В.2.7-122 (ГОСТ 111), з відстанню між стеклами 16 мм, заповненого повітрям, заввишки 1500 мм, завширшки 800 мм, завтовшки 36 мм, загальнобудівельного призначення. СПД 4 M1-16-4 M116-4 M1- 1500 x 800 x 36 ДСТУ Б В.2.7-107-2008. Приклад умовної позначки двокамерного склопакета, який складається з трьох листових стекол завтовшки 4 мм марки M-i згідно з ДСТУ Б В.2.7-122 (ГОСТ 111), з м'яким низькоемісійним покриттям на внутрішньому склі, відстань між стеклами 12 мм, заповнення; зовнішня камера - повітря, внутрішня камера —

аргон, заввишки 1500 мм, завширшки 800 мм, завтовшки 36 мм, морозостійкого, енергозберігаючого: СПД 4 М1- 12-4М1- 12АГ- 4І - 1500х800 х 36 - МЕ ДСТУ Б В.2.7-107-2008.

Оновними задачами сучасних склопакетів є те, що вони повинні забезпечувати пропускання максимальної кількості світла до приміщення, а також мінімізувати тепловтрати через склопакет. Застосування скла з різними функціональними призначеннями, дозволяє отримати сучасний склопакет з різними функціональними характеристиками (рис. 1.3).

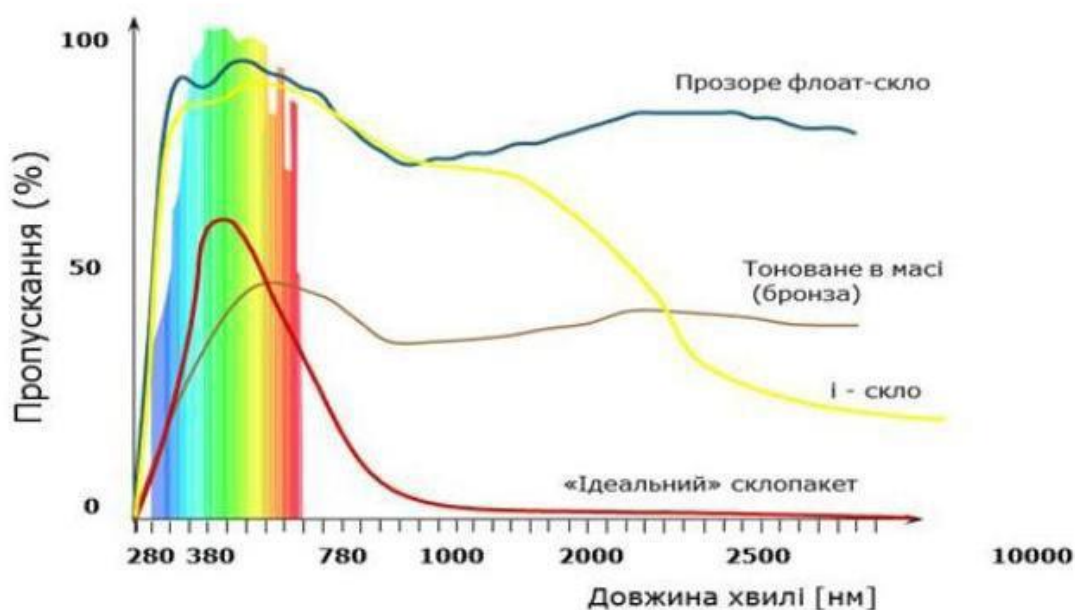


Рис. 1.3. Спектральна характеристика пропускання склопакета.

До сучасних енергозберігаючих склопакетів можна віднести:

- склопакети з м'яким низькоемісійним покриттям, його ще називають Low-E, або і-покриття (покриття з нанесеними на поверхню скла оксидів іонів срібла);
- склопакети з твердим к-покриттям (покриття з нанесеними на поверхню скла іонами олова);
- склопакети з енергозберігаючою плівкою, або її ще називають «теплове дзеркало»;
- вакуумний склопакет;

- мультифункціональний склопакет (з нанесеним і-покриттям та із заповненням міжскелького прошарку аргоном або криптоном);
- склопакети з аргоновим заповненням між склом;
- склопакети з електричним підігрівом (разом зі склопакетом встановлюється спеціальна скляна поверхня, яка містить рідкокристалічний прошарок, що підключається до електромережі);
- вентильовані склопакети.

Розрізняють дві технології виготовлення скла з покриттям: шляхом осадження окисів металу на поверхню скла після його виготовлення (так зване м'яке покриття) і нанесення покриття з окислів олова в процесі виготовлення скла (тверде покриття, к-скло) [6]. По першій технології виготовлення скла з покриттям здійснюється осадження металу на склі у вакуумній камері за допомогою високовольтної напруги. Друга технологія (Pyrolitic-coated), розроблена в 1981 р. у Бельгії й використовується в США останні 3-4 роки. Піролітичне покриття роблять у процесі виготовлення скла на одній і тій же машині шляхом набрикання окислу олова на розплавлене скло таким чином, що воно стає частиною скла, тому що його молекули міцно з'єднуються з молекулами скла. Таке покриття має більшу міцність [7]. Теплотехнічні характеристики покриттів, виконаних по першій технології, вищі, ніж по другій, але виготовлення склопакетів обходиться дорожче - через можливість їх руйнування від вологи необхідна герметизація по краях склопакета. Крім того, скло з м'яким покриттям повинне бути встановлене в склопакет протягом шести місяців після виготовлення, в іншому випадку воно руйнується. Велика перевага при виготовленні к-скла - висока міцність зчеплення покриття зі склом. Склопакет з такого скла з повітряним прошарком товщиною 12,5 мм пропускає 76% сонячної енергії, або 486 Вт/м<sup>2</sup>, а склопакет із склом з Low-E покриттям - 371 Вт/м<sup>2</sup>, тому такі вікна мають переваги з погляду пасивного використання сонячної енергії [7].

Склопакети, виконані по технології «теплове дзеркало» - на склопакет наноситься етиленпропіленова плівка товщиною 0,013 – 0,13 мм із покриттям, що відбиває довгохвильову радіацію (із зразковою структурою: діелектрик (=30

нм)/метал (=10-20 нм) / діелектрик (=30 нм)/метал і т.д.), розміщується в міжскляному проміжку склопакета [8]. Ці покриття, кількість яких коливається від 8 до 12 залежно від типу плівки і її функціонального призначення, наносяться на плівку методом вакуумного магнетронного напилювання, для надання необхідних спектрально-селективних властивостей. Шар металу (золото, срібло, оксид індію та ін.) забезпечує селективне пропускання електромагнітних хвиль у спектрі випромінювання, прозорі для випромінювання шари діелектричних покриттів захищають метали від окислювання. Внаслідок установаження натягу такої плівки в міжскляному проміжку зменшується не тільки конвекція, але й істотно відтинаються величезні (70%) втрати теплоти шляхом випромінювання, які скорочуються із зменшенням ступеня чорноти плівки (коефіцієнт довгохвильового відбиття такого теплового дзеркала коливається від 0,04 до 0,15), що у свою чергу збільшує опір теплопередачі конструкції скління на 30% - 60%. При виготовленні склопакета «теплове дзеркало» виникають проблеми, зв'язані з придбанням і налаштуванням спеціального дорогого устаткування (печі для термоусадки плівки, стіл для розмотування, насос-екструдер), контроль якості продукції, недовговічність органічної плівки, поки не сприяють масовому розвитку цієї технології у світі, що обмежується лише поодинокими виробниками.

Вакуумний склопакет - розробка дослідницького інституту по використанню сонячної енергії в США [9]. Впровадженню цих конструкцій заважають такі проблеми:

- 1 - руйнування вакуумного скла від вітрового навантаження, атмосферного тиску й різних температурних деформацій;
- 2 - випадання конденсату в місцях контакту скляних кульок зі склом.

Також відоме застосування ВК з електропідігрівом [10], або його ще називають енергетичне вікно. Такий склопакет є додатковим джерелом тепла, а в деяких випадках єдиним ефективним способом опалення приміщення різної площі. Особливо це актуально для мансардних вікон. Влітку енергетичне вікно працює в зворотньому напрямку, охолоджуючи обслуговуване приміщення.

## 1.2. Профілі віконні

Український ринок металопластикових віконних конструкцій є швидкозростаючим і перспективним за наступними причинами: в країні спостерігається будівельний бум і змінюється психологія потенційного споживача. Названі тенденції визначають, що попит на ринку металопластикових віконних систем є повноцінний. Розрізняють віконні системи для житлових і адміністративних будівель, підсобних приміщень, зимових садів тощо.

Профільною системою називається набір конструктивно пов'язаних між собою елементів, розроблених для певної сфери застосування [7]. Вона як мінімум складається із рами, імпоста, штапика, набору армуючих профілів, ущільнювачів, підкладок під склопакеті, фурнітури (рис. 1.4). Найбільш широко система профілів може бути представлена кутовими з'єднувачами, розширюючими профілями, накладками, підвіконним профілем тощо.

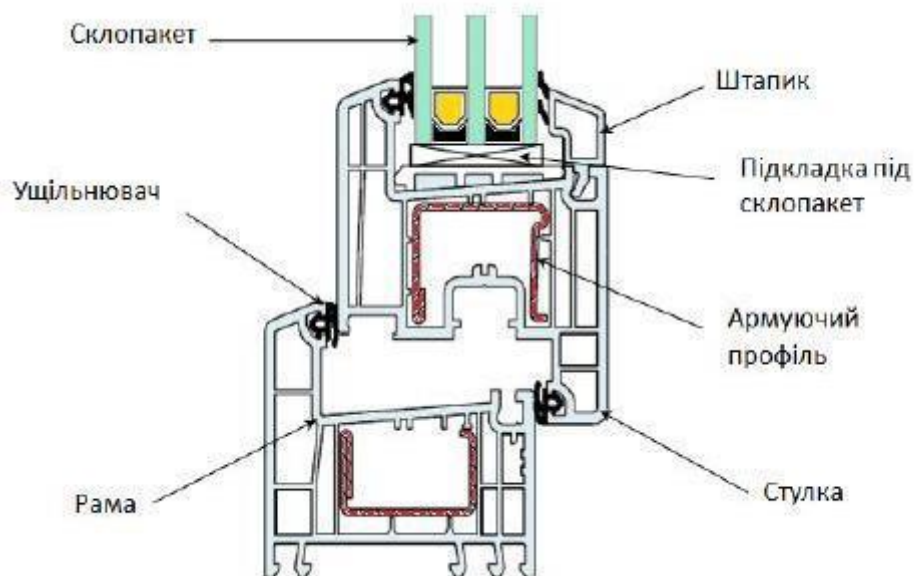


Рис. 1.4 Переріз віконного профілю.

Профілі з полівінілхлориду (ПВХ) є найбільш розповсюдженими. Це полімер, що утворюється полімеризацією вінілхлориду. ПВХ зазвичай випускають у вигляді білого аморфного порошку, густиною  $1400 \text{ кг/м}^3$ . За хімічним складом ПВХ складається з вуглецю, водню і хлору. Стійкий до впливу більшості реагентів. [11]. Їх теплостійкість зберігається при  $65 \text{ }^\circ\text{C}$ , а при  $160 \text{ }^\circ\text{C}$

ПВХ розпадається з виділенням хлористого водню. Полівінілхлоридні матеріали відрізняються високою міцністю і зносостійкістю, вогнестійкістю, та ін., крім віконних профілів з них також виготовляють інші профільні вироби (поручні, плінтуси, труби та ін.), теплоізоляційні пінопласти, рельєфні вакуумовані плити для оздоблення фасадів, стель, тощо. Вимоги до ПВХ, що використовується для виробництва наводяться в технічних умовах [12]. Серед недоліків: залежність від фізико-технічних властивостей від температури, схильність до деструкції під впливом ультрафіолету, великий коефіцієнт лінійного розширення.

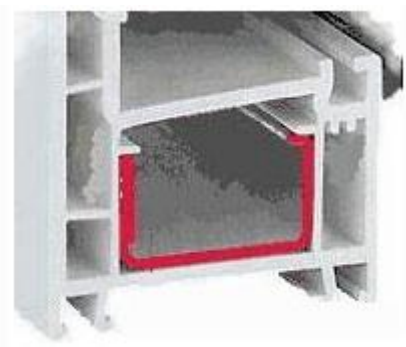
Для СОК роблять багатокамерними і тонкостінними [11]. Це підвищує опір теплопередачі та жорсткість. В одну з камер поміщають металічний вкладиш, що застосовується практично у всіх профілях з ПВХ як армування. Полівінілхлорид має дуже високий коефіцієнт лінійного розширення, який приблизно в 10 разів більший, ніж у скла, бетону, металу. Це приводить до того, що температурні деформації, а разом з тим і напруження у ПВХ-профілі, заскленні та конструкціях, що примикають до вікна, різко відрізняються за величиною. Це накладає свою специфіку щодо встановлення та монтажу металопластикових вікон у прорізах стіни.

Як було сказано вище, для додавання жорсткості, профіль додатково армується. Металевий каркас забезпечує необхідну міцність конструкції і надійність при експлуатації вікна. Для армування профілю використовується оцинкована сталь, тому він не деформується при перепадах температур або інших впливів навколишнього середовища. На рис. 1.5 представлені найбільш застосовані типи армування. А взагалі розрізняють:

- Г-подібний вид армування - металева вставка встановлюється уздовж двох стін;
- П-подібний вид армування, де метал підсилює три стінки;
- замкнутий вид армування - металева вставка розташована уздовж чотирьох стінок.



а)



б)

Рис. 1.5. Типи армування профілю, а) - квадратне армування, б) - П-подібне армування.

Для віконних конструкцій, які мають склопакети розміром до 1900 мм у висоту, підійде П-подібний армований профіль. Однак, для пластикових вікон великих габаритів, наприклад, для лоджії або балкона, необхідний профіль із замкнутим армуванням.

Товщина стінок профілю визначає його приналежність до певного класу:

Клас А - товщина стінок профілю повинна становити не менше 3 мм;

Клас Б - профіль, де товщина стінки складає від 2,5 мм;

Клас С - ненормована товщина стінки.

В результаті ширина профілю пластикових вікон безпосередньо залежить від його класу. Чим він вищий, тим відповідно ширше профіль.

Профіль підсиленням випускається з легованої оцинкованої сталі та дозволяє значною мірою підвищити міцність конструкції завдяки встановленню у великі головні камери. Профіль з підсиленням підлягає обов'язковій сертифікації. Для ущільнювачів використовується подвійна система з АПТК наповнювачами (синтетичний каучук). Для них важливими є показники морозостійкості, стійкості до світла та дії озону, які повинні бути відображені у сертифікатах. Полімерні матеріали для виготовлення вікон та комплектуючі до них (в тому числі імпортного виробництва) повинні відповідати вимогам діючих стандартів і мати дозвіл до застосування Міністерством охорони здоров'я України [12].

Перші віконні профілі, що з'явилися в середині 50-х років в Німеччині, мали ширину 58 мм. Це було пов'язано з тим, що вони практично повторювали геометрію дерев'яних рам, де така ширина в свою чергу була обумовлена технологічно. 58 – мм системи дозволяють вирішувати більшість завдань в області проектування і виробництва вікон в усіх кліматичних зонах – якщо, звичайно, виробник дотримується технології складання і монтажу готових конструкцій. У другій половині 80-х в Європі стали з'являтися профілі з збільшеною монтажною шириною – 70 мм. Вони призначені для виробництва віконних елементів з поліпшеними теплофізичними характеристиками. Ці системи дозволяють споживачеві істотно розширити перелік можливих опцій вікна (наприклад, як шумозахисні властивості), в них можна використати і склопакети більшої ширини, ніж в 58-мм системах. Зараз на ринку представлені профілі, з шириною до 90 мм і навіть до 127 мм. Чітко можна прослідкувати перехід в стандартному варіанті від коробки шириною 58 – 62 мм до 68- 76 мм, а в останніх розробках вище 88 мм.

Найбільш розповсюдженим та дешевшим є трикамерний профіль. Також на ринку представлені 4, і 5-ти камерні профілі, а також 6-ти та навіть, вже є і 8-ми камерні.

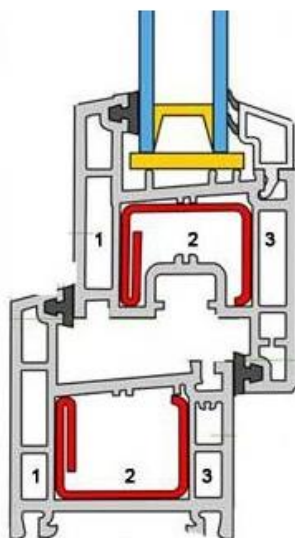


Рис. 1.6. Трикамерний віконний профіль.



На рис. 1.6. Цифрами позначено камери. Покращення теплотехнічних характеристик профілю досягається збільшенням кількості камер (рис. 1.7, 1.8) із застосуванням підсилюючих вкладишів з алюмінію замість металу.

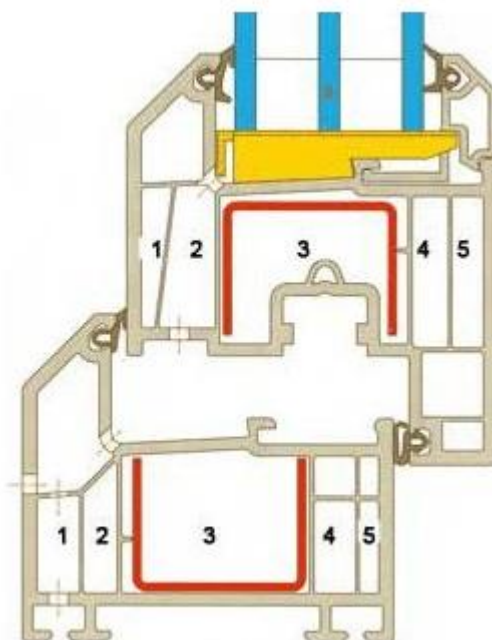


Рис. 1.7. П'ятикамерний профіль.

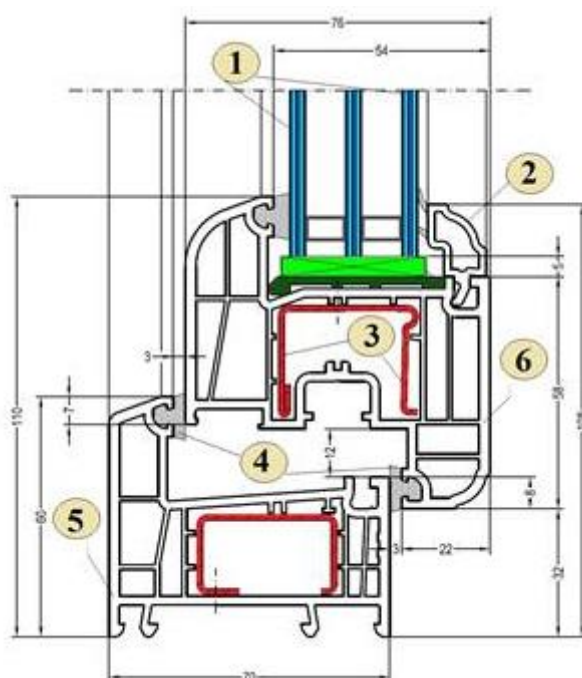


Рис. 1.8. Складові елементи віконного профілю.

Основні складові елементи профілю представлено на рис. 1.8. Де: 1 – склопакет, 2 - штапик, 3 – металеве армування профілю, 4 – контур ущільнювач, 5 – рама (3 камери), 6 – створка (3 камери).

Також застосовуються профілі віконні з дерева (рис. 1.9.) [7]. Такий профіль може бути з цілісного бруса, або з клеєного бруса, який складається з декількох шарів дерева. Перевага такого матеріалу – це висока екологічність, а також нижча собівартість. Правда, є у нього й істотні мінуси, обумовлені природним походженням. При зміні вологості гігроскопічна деревина деформується, а профіль-рама може "перекошуватися". З клеєного бруса профільні системи дещо витриваліші до погодних чинників. При вологому та жаркому кліматі на рамі утворюється пліснява [13]. Також мають місце і різні природні дефекти - сучки, смолисті кармани, різноплощинне переплетення волокон, що значно впливає на якість самих рам. В силу зазначених вище процесів, дерев'яні профілі мають більш низькі терміни корисної експлуатації, в порівнянні з подібними рішеннями з ПВХ. Догляд за такими виробами досить складний для функціональності і зовнішнього вигляду дерев'яних профілів слід регулярно змащувати алюмінієві механізми та нести витрати на придбання різних засобів для обробки дерев'яних частин виробів. Виникають також складності і при виборі миючих засобів, які повинні бути бережливими по відношенню до поверхні такого профілю. Також виникають проблеми з безпекою, через високу схильність до займання в порівнянні з ПВХ профілями. Крім того, натуральне дерево - ідеальне середовище для різноманітних живих організмів, в тому числі й для хвороботворних бактерій. Але, прогресивні технології зробили ці недоліки не настільки помітними.



Рис. 1.9. Переріз віконного профілю з дерев'яним профілем.

На ринку профільних систем зустрічаються і профілі з алюмінію. Такі профілі більш стійкі до атмосферних впливів в порівнянні з профілями з дерева та з ПВХ профілями. Має такі переваги: висока корозійна стійкість, довговічність і технологічність, невелику масу виробу (в порівнянні наприклад із сталлю, в 3 рази меншу), висока міцність для застосування в несучих конструкціях і в огорожувальних. Недоліком є те, що міцність алюмінієвих сплавів зберігається при низьких температурах, тобто його теплопровідність. Тому в конструкціях з алюмінієвим профілем застосовуються термомістки (спеціальні полімерні вставки, термовкладиші) для досягнення нормативного значення опору теплопередачі. Ці термомістки виконують функцію теплоізолятора між зовнішньою і внутрішньою частинами алюмінієвого профілю [4].

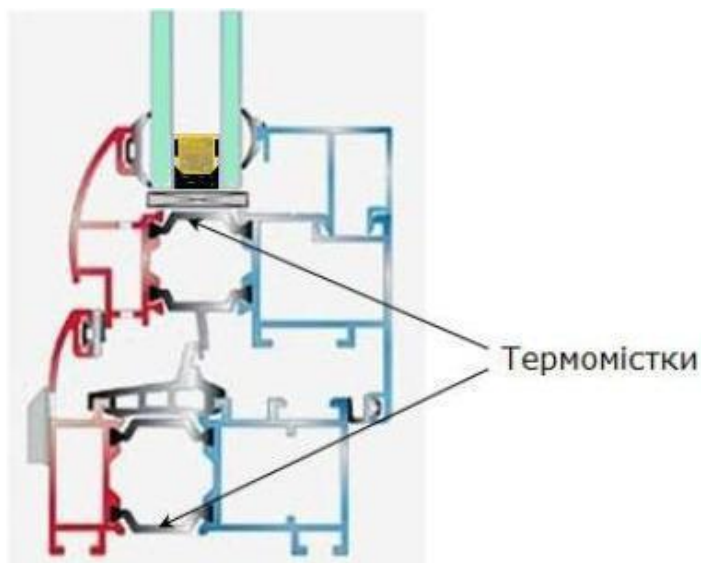


Рис. 1.10. Алюмінієвий профіль з термомістками.

Алюмінієвий профіль з термовкладишами невеликою ширини, менше ніж 16 - 20 мм, в порівнянні з ПВХ або з деревиною має гірші теплозахисні властивості,  $0,30 - 0,40 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  [7]. Більш «теплі» алюмінієві профілі мають термоміст шириною понад 30 мм, або багатокамерний термоміст, у якому простір між поліамідними пластинами заповнюється додатковим теплоізолятором, наприклад, пінополіуретаном. В результаті для такого профілю досягається

значення опору теплопередачі  $0,5 - 0,6 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ , що не набагато гірше від відповідних характеристик профілів з дерева або ПВХ.

### **1.3. Теоретичні дослідження теплопередачі через віконні конструкції.**

При розташуванні склопакета в огороженні ці елементи впливають один на одного. Зміна у часі теплових параметрів по обидва боки зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель зумовлюють необхідність враховувати ці зміни при розрахунку теплопередачі через огороження. Причому, в більшій мірі це стосуватиметься стінової частини огороження через відкоси віконного отвору. Крім фронтальних виникають додаткові бічні поверхні теплопередачі у віконному отворі з істотно змінними температурами. Облік їх впливу на теплопередачу і виявлення рішень, спрямованих на зменшення тепловтрат через огороження з віконним отвором є актуальною і важливою задачею.

В основі існуючих розрахункових методів впливу нестационарної теплопередачі через огорожуючі конструкції будівлі лежить закон гармонічного аналізу О.Є. Власова [14], а також його послідовника Л.О. Семенова. Згідно з цим законом, коливання теплових потоків і температур на поверхні огорожень і всередині них здійснюються гармонійно. В принципі такий підхід можна було б вважати коректним, оскільки гармонічні функції дозволяють формалізувати практично будь-які залежності сукупністю гармонік різних частот, амплітуд і зрушень фаз. Однак однозначних визначень конкретизації числа гармонік, що входять в сукупність, і їх параметрів не існує. Заміна сукупності гармонік єдиним її представником є грубим приближенням і може служити тільки деякою «моделлю» теплопередачі і не більше того. В [15 – 17] розглянуто основні особливості «гармонічних» теорій, всі вони між собою схожі. Так як [17] найбільш нове і сучасне видання, тому на ньому найбільше акцентуємо увагу. Однак у автора мають місце формальні підходи до коливань в шарах огорожувальної конструкції, не конкретизовано в яких саме. В основу аналізу не додано фундаментальне рівняння теплопровідності для нестационарного випадку,

хоча би в одновимірній постановці. Не враховується вплив сукупності граничних умов, особливо на зовнішній стороні огороження, де діють зі змінними характеристиками інсоляція, вітер, температура повітря.

Основні зовнішні фактори, що визначають теплопередачу через огорожувальні конструкції - це температура повітря  $T_{\text{зов}}$ , швидкість вітру  $v_{\text{зов}}$  і інтенсивність сонячної радіації  $q_s$ . Ці характеристики тяжко передбачувані для конкретної доби конкретної місцевості, тому, якщо немає приватної інформації, слід орієнтуватися на середньомісячні показники, які наводяться в кліматичних довідниках для території України.

Своєрідна спроба врахувати дію сонячної інсоляції була зроблена в середині минулого століття А. М. Шкловером [18] шляхом введення умовної зовнішньої температури повітря  $T_y$ , що є сумою температури повітря  $T_{\text{зов}}$  і віртуальної добавки від дії сонячної радіації. Можливості сучасної обчислювальної техніки дозволяють доволі швидко вирішувати задачі по теплопередачі огорожувальних конструкцій. Щоб врахувати дію сонця, треба потрібно задати широту місцевості, кут нахилу зовнішньої поверхні огороження і її орієнтації стосовно сторін світу, в [19] є всі пояснення і дані.

Фундаментальний вклад у вивченні питання конструкцій з газовими прошарками зроблено Дж. Бетчелор [20, 21], який розглядував як гідродинамічну і теплову задачі для вертикальної замкнутої області. Результати його розрахунків корелюються з експериментами [22]. Також, в напрямку вивчення газового прошарку в конструкціях в роботах вчених [23 - 24], а також - Гершуні Г.З., Жуховицький Є. М., Тарунін Є. Л.

Експериментальним дослідженням теплопередачі через ВК присв'ячені роботи [25 – 32]. Розглянуто експериментальні дослідження як у кліматичній камері, так і в натурних умовах, але нажаль, для короткотривалого терміну та з переривчастим часом дослідженням, що не дає повної характеристики тепловтрат через огорожувальні конструкції. В роботах [25, 29, 33, 34] розглянуті вентилязовані ВК. Але не враховано вплив інсоляції, а це не дає змогу дати точну оцінку тепловтрат і енергетичного ефекту застосування таких вікон.

Питанню дослідження теплопереносу через віконні профілі рам приділено мало уваги. В літературі існує невелика кількість публікацій з розрахунками [35, 36], а з дослідженнями тепловтрат через профілі - ще менше [37]. Відомі дослідження теплопередачі через профілі віконні проводилися в термокамері, а це, на жаль не відображає реальної картини дії всіх кліматичних умов. Значення опору теплопередачі визначено не на основі експериментально отриманих даних, а теоретичним методом.

Сьогодні моделювання є одним з найбільш важливих інструментів аналізу і може використовуватися для вирішення завдань різного рівня. Як відомо, в основі моделювання характеристик будівлі лежать теорії з різних дисциплін, переважно з фізики, математики, матеріалознавства, екології та обчислювальної техніки. Було проаналізовано результати робіт [38 - 41]. Встановлено: в створених моделях не було враховано інсоляції; вирішені задачі теплопередачі через ВК були розглянуті в двовимірній постановці та при стаціонарних умовах.

#### **1.4 Мета та постановка задач дослідження.**

Проведений аналіз літературних джерел стосовно теоретичних і експериментальних досліджень теплопередачі через віконні конструкції показав, що розрахункові результати в основному отримані з вирішенням одно- або двовимірної моделі задач. При вирішенні такого типу задач, автори не враховували дію інсоляції, яка має великий вплив на теплопередачу через огорожувальні конструкції. В літературі не достатньо інформації про експериментальні дослідження віконного профілю.

Мета роботи полягає у проведенні теоретичних та експериментальних досліджень аеродинаміки і теплопередачі через віконні конструкції (склопакети та профілі) в реальних кліматичних умовах їх експлуатації та на основі встановлених закономірностей розробити та реалізувати рекомендації щодо зменшення тепловтрат будівлі через світлопрозорі елементи фасадів.

Для досягнення цієї мети були поставлені та вирішені наступні задачі:

- створити експериментальний вимірювальний комплекс для дослідження теплоізоляційних властивостей світлопрозорих огорожувальних конструкцій (СОК) будівлі при їх реальній експлуатації;
- провести експериментальні дослідження полів температури та густини теплового потоку на поверхнях склопакетів та на віконних профілях;
- розробити теплофізичні моделі (в одно-, дво- та в тривимірній нестационарній постановці) аеродинаміки і теплопередачі та проведення їх експериментальної верифікації (валідації);
- дослідити вплив зовнішніх кліматичних факторів на тепловтрати через ВК та на повітряно-температурний внутрішній стан будівлі;
- розробити інженерну методику розрахунку річних тепловтрат через склопакети;
- розробити рекомендації щодо проведення термомодернізації адміністративних будівель в частині світлопрозорих конструкцій (СК) та формування рекомендацій для створення СК будівель високої енергоефективності;
- провести моніторинг теплового стану ВК термомодернізованої будівлі за умов реального клімату їх тривалої експлуатації;
- створити банк експериментальних даних по опору теплопередачі склопакетів та віконних профілів різних СК, особливо для тих, дані для яких наразі відсутні в ДБН України.

### **Висновки до розділу 1.**

На основі проведеного літературного огляду, можна зробити висновок, що при всій різноманітності експериментальних і теоретичних досліджень теплопередачі через ВК, всі вони мають ряд недоліків і переваг. Так, при використанні теплофізичного моделювання існує ряд недостовірно відомих параметрів, припущень, які необхідно визначати з використанням сучасних

методик проведення досліджень. Експериментальні дослідження теплопередачі ВК ефективні, коли проводяться протягом довготривалого терміну і при реальних кліматичних умовах. Для підвищення достовірності отриманих результатів, необхідно використовувати комплексний розрахунково-експериментальний підхід.

Встановлено, що робіт, які описують адекватні, повні та ретельні дослідження теплопередачі через склопакети і профілі віконні в реальних умовах експлуатації, є недостатня кількість. Тому проведення довготривалих експериментальних досліджень тепловтрат через ВК дозволить в реальних умовах експлуатації, з врахуванням кліматичних факторів, чітко встановити, який тип склопакетів є оптимальним для встановлення у ВК, та за рахунок чого можна зменшити радіаційну і конвективну теплопередачу через склопакет і як вплинути на кондуктивну складову теплового потоку.

Виявлено, що в існуючих теплофізичних моделях не враховано вплив інсоляції. Також не зустрічалася тривимірна теплофізична модель аеродинаміки повітря та теплообміну в системі довкілля – двокамерний склопакет – приміщення будівлі. Для з'ясування цих питань було проведено чисельні дослідження.



## РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ЧЕРЕЗ ВІКОННІ КОНСТРУКЦІЇ

### 2.1. Експериментальні дослідження для віконних склопакетів.

Найбільші тепловтрати зовнішньої оболонки будівлі відбуваються через ВК в зв'язку з низьким значенням їх термічного опору теплопередачі, тому важливим завданням при підвищенні енергозбереження будівель різного призначення є оптимальний вибір саме віконних конструкцій [42]. Основними механізмами теплопереносу через такі конструкції є: теплопровідність через скло, конвекція в газовому середовищі, що заповнює простір між стеклами, а також променеве теплоперенесення між поверхнями скла. Загалом зменшення теплопередачі через світлопрозорі огорожувальні конструкції досягається шляхом підвищення термічного опору скла і газового прошарку між склом, а також шляхом зниження рівня променевого теплопереносу [43].

З метою визначення розподілу температур на зовнішніх та внутрішніх поверхнях ОК, а також для аналізу систем опалення і повітрообміну, для виявлення ділянок найбільш суттєвих тепловтрат, було проведено тепловізійне обстеження будівлі корпусу № 1 ІТТФ НАН України в м. Києві по вул. Булаховського, 2. Для цього обстеження було використано тепловізор Fluke Ti 50 (рис. 2.1.1) [44].



Рис. 2.1.1. Зовнішній вигляд тепловізора Fluke Ti 50.

Потрібно відмітити, що всі дослідження проводилися відповідно до вимог [45, 46]. За результатами тепловізійного обстеження визначили ділянки поверхонь огорож, температура яких суттєво відрізняється від температури повітряного середовища. Це свідчить про високі значення теплового потоку на цих поверхнях, що є наслідком низького температурного опору ОК [44]. На рис. 2.1.2 представлені термограми всіх фасадів, на яких можна чітко відслідкувати, що в зонах розміщення вікон спостерігалися великі тепловтрати. Червоний колір у верхній частині вікон вказує на природну конвекцію, що спричиняє рух теплого повітря в міжскляному просторі та біля поверхні вікон.

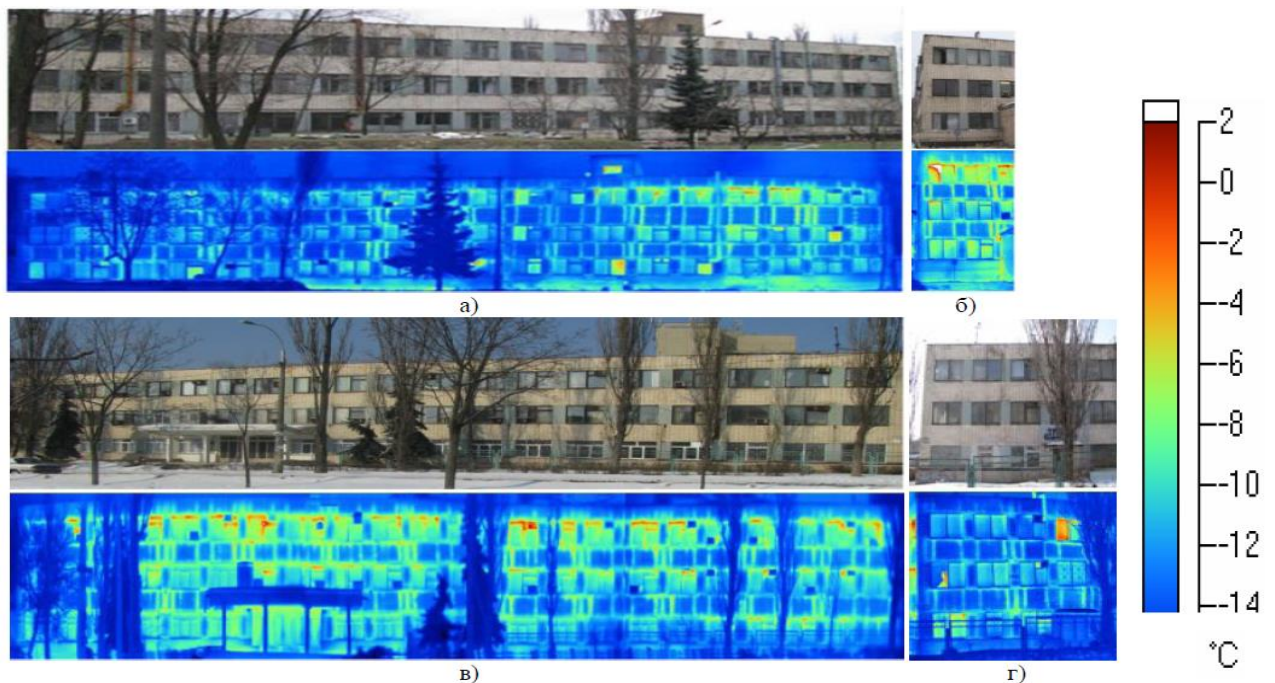


Рис. 2.1.2. Тепловізійне обстеження зовнішніх поверхонь ОК будівлі: а) північний; б) західний; в) південний; г) східний фасади.

Враховавши отримані результати проведеного дослідження, з метою обґрунтування заходів зі зменшення теплоспоживання в існуючих будівлях (за умов дотримання належних санітарно-гігієнічних норм та створення належного рівня теплового комфорту), в Інституті технічної теплофізики НАН України проведено часткову термомодернізацію адміністративної будівлі корпусу №1 по вул. Булаховського, 2 у м. Києві.

Об'єктом досліджень при цьому стала теплоізоляційна спроможність ВК досліджуваної будівлі, в якій була проведена заміна старих віконних конструкцій (з терміном експлуатації 44 роки) на сучасні склопакети та профілі віконних рам. Кількість різних варіантів конструкцій енергозберігаючих вікон становила 20 шт. (табл. 2.1.1). Всі конструкції було встановлені у приміщеннях на другому поверсі північного фасаду триповерхової будівлі для того, щоб уникнути впливу прямої сонячної радіації на тепловий режим приміщення, а також для уникнення впливу даху (без горища) та підлоги першого поверху (без підвального приміщення) [47].

Таблиця 2.1.1. Перелік склопакетів та профілів віконних рам, що були встановлені замість звичайних вікон.

| Номер кімнати             | Варіанти скління  | Газовий наповнювач | Дистанційна рамка | Профіль рами         | Опір теплопередачі склопакета, м <sup>2</sup> К/Вт |
|---------------------------|---|--------------------|-------------------|----------------------|--|
| 209                       | 4M <sub>1</sub> -10-4M <sub>1</sub> -10-i4                            | Повітря            | Алюмінієва        | Rehau euro-design 60 | 0,64   |
| 208                       | 4M <sub>1</sub> .10-4M <sub>1</sub> -10-4M <sub>1</sub>               | Повітря            | Алюмінієва        | Rehau euro-design 60 | 0,47   |
| 208                       | 4M <sub>1</sub> .10-4M <sub>1</sub> -10-4M <sub>1</sub>               | Повітря            | Алюмінієва        | Rehau euro-design 70 | 0,47   |
| 207                       | 4M <sub>1</sub> -10-4M <sub>1</sub> -10-i4                            | Повітря            | Алюмінієва        | Rehau euro-design 70 | 0,64   |
| 206                       | 6M <sub>1</sub> -12-i6  | Повітря            | Алюмінієва        | Rehau euro-design 60 | --   |
| 205                       | 4i-10-4M <sub>1</sub> -10-i4  | Повітря            | Алюмінієва        | Rehau euro-design 60 | 0,93   |
| 205                       | 4i-10-4M <sub>1</sub> -10-i4  | Повітря            | Пластикова        | Rehau euro-design 60 | --   |
| 204                       | 4M <sub>1</sub> -12-4M <sub>1</sub> -8-i4                             | Повітря            | Алюмінієва        | Rehau euro-design 60 | --   |
| 204 а                     | 4M <sub>1</sub> -16-i4  | Повітря            | Duraseal          | Rehau euro-design 60 | --   |
| 203                       | 4M <sub>1</sub> -10-4M <sub>1</sub> -10-i4<br>Енергозберігаюча плівка | Повітря            | Алюмінієва        | Rehau euro-design 70 | --   |
| М                         | 4M <sub>1</sub> -16-i4  | Повітря            | Алюмінієва        | Rehau euro-design 60 | 0,59   |
| Ж                         | 4M <sub>1</sub> -16-4M <sub>1</sub>                                   | Повітря            | Алюмінієва        | Rehau euro-design 60 | 0,32   |
| 202                       | 4M <sub>1</sub> -20-4M <sub>1</sub> -20-i4                            | Повітря            | Алюмінієва        | Rehau Geneo 36       | --   |
| 202 а                     | 4M <sub>1</sub> -16-i4  | Повітря            | Алюмінієва        | Rehau euro-design 60 | 0,59   |
| 201                       | 4M <sub>1</sub> -16-i4  | Повітря            | Алюмінієва        | Rehau euro-design 60 | 0,59   |
| 222                       | 4M <sub>1</sub> -16-i4  | Аргон              | Алюмінієва        | Rehau euro-design 60 | 0,66   |
| 222                       | 4M <sub>1</sub> -10-4M <sub>1</sub> -10-i4                            | Аргон              | Алюмінієва        | Rehau euro-design 60 | 0,71   |
| 201,<br>Північн.<br>фасад | 4M <sub>1</sub> -10-4M <sub>1</sub> -10-i4                            | Повітря            | Алюмінієва        | Rehau euro-design 60 | 0,71   |
| 201,<br>Західн.<br>фасад  | 4M <sub>1</sub> -10-4M <sub>1</sub> -10-i4                            | Повітря            | Алюмінієва        | Rehau euro-design 60 | 0,71   |
| 201,<br>Західн.<br>фасад  | 4M <sub>1</sub> .10-4M <sub>1</sub> -10-4M <sub>1</sub>               | Повітря            | Алюмінієва        | Rehau euro-design 60 | 0,47   |

Розглянемо результати експериментальних досліджень теплопереносу через встановлені склопакети. Протягом трьох опалювальних сезонів було проведено

серію експериментальних досліджень теплопередачі різних склопакетів. Досліджувалися 8 варіантів конструкцій СК:

- двокамерний склопакет зі звичайним склом (1 варіант);
- одно- і двокамерний склопакет з низькоемісійним покриттям (або його ще називають і-покриттям) нанесеним на поверхню одного із стекол, також із двома такими покриттями та з різною відстанню між розміщенням стекол (4 варіанти);
- одно- і двокамерний склопакет з аргоновим заповненням між стеклами (2 варіанти);
- двокамерний склопакет з енергозберігаючою плівкою, нанесеною на одне із стекол (1 варіант).

Були проведені експериментальні дослідження температурних характеристик та густини теплового потоку на поверхнях склопакетів всередині приміщення та зовні, а також вимірювалася температура зовнішнього повітря та температура всередині приміщення. На рис. 2.1.3 на фото (а) і (б) показано розміщення датчиків температури та теплового потоку.



а)



б)

Рис. 2.1.3. Дослідження теплоізоляційних характеристик ВК в реальних умовах, а) – розміщення датчиків всередині приміщення; б) – розміщення датчиків на зовнішній поверхні ВК.

В якості датчиків температури та теплового потоку було використано оригінальні датчики, в корпусі яких поєднувалися високочутливі датчики

теплового потоку та платинові датчики температури типу Pt100. Вони є оригінальною розробкою відділу теплотерії ІТТФ НАН України, виконані у вигляді жорсткої пластини круглої або прямокутної форми, поверхня якої має високу ступінь чорноти. Цей датчик складається з батареї ідентичних диференціальних біметалічних термоелементів, які зафіксовані в електроізоляційному компаунді [48, 49]. За своєю геометрією датчики з розмірами 40×80 мм були подібними до геометрії склопакету, а з розмірами 15×80 мм були подібними до геометрії віконного профілю (рис. 2.1.4). Також для вимірювання тепловтрат через склопакети використовувалися датчики форми круга з діаметром 100 мм. Значення температури та теплового потоку фіксувалися та записувалися через кожні 10 хвилин, тобто 144 значення за добу з одного датчику.

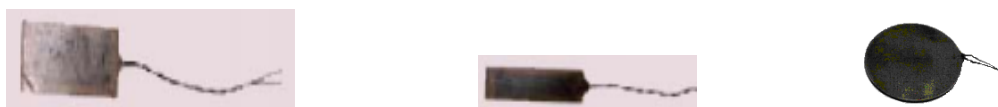


Рис. 2.1.4. Датчики, що застосовувалися для одночасного вимірювання теплового потоку і температури.

Для вимірювання температури застосовувалися платинові (похибка вимірювання 0,1 °С), і мідні (похибка вимірювання 0,2 - 0,3 °С) термометри опору з робочим діапазоном зміни температури -40 ... +100 °С.

Сигнали із заданим часовим кроком 10 хвилин від всіх датчиків записувалися переносним 96-ти каналним блоком теплової реєстрації (БТР), розробленим в Інституті технічної теплофізики НАН України, який дозволяє в умовах реальної експлуатації будівлі досліджувати температурний стан будь-якої віконної конструкції (декларована похибка вимірювання до 1...4%), що наведено на рис. 2.1.5. Головним блоком БТР є комплектація шістьох восьмиканальних приладів вимірювання та контролю температури УКТ-38 для датчиків температури та шести восьмиканальних аналого-цифрових перетворювачів «Експерт» для датчиків теплових потоків (рис. 2.1.6). До цих приладів додавалась також відповідна кількість датчиків температури та теплового потоку зі



з'єднаннями і адаптерами передачі даних. За допомогою спеціального кейса всі ці прилади були об'єднані в одній вимірювальній установці.

Основні технічні характеристики вимірювальних датчиків та вторинних приладів наведені в таблицях додатку А.



Рис. 2.1.5. Зовнішній вигляд блоку теплової реєстрації.



а)



б)

Рис. 2.1.6. Вторинні прилади для обробки інформації з вимірювальних датчиків: а) восьмиканальний аналого-цифровий перетворювач «Експерт»; б) восьмиканальний пристрій вимірування та контролю температури УКТ-38

Схема розміщення датчиків та їх нумерація показані на рис. 2.1.7. Всі експериментальні дослідження були проведені відповідно до [3, 4], а також з врахуванням всіх вимог [50]. Обробка результатів та визначення термічного опору проводилися згідно до [3].

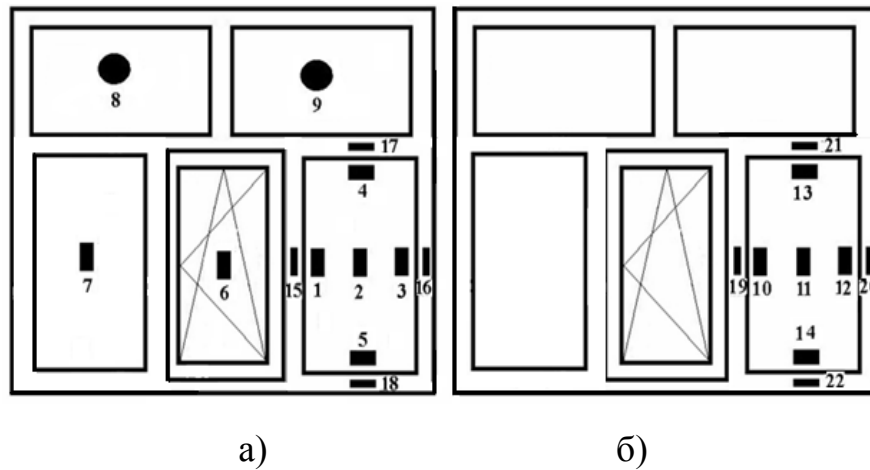


Рис. 2.1.7. Схема розміщення датчиків на ВК, вигляд зсередини приміщення; а) датчики розміщені на склопакеті і віконному профілі всередині приміщення; б) датчики розміщені на зовнішній поверхні ВК.

Провірши серію експериментальних досліджень теплопередачі через ВК та врахувавши всі отримані результати, було визначено оптимальний тип склопакету, для встановлення у віконний проріз. Це склопакети з низькоемісійним покриттям, а краще з двома такими покриттями, нанесеними на внутрішні поверхні склопакету. В наступних пунктах будуть детально представлені експериментальні дані, що отримані при дослідженнях теплопередачі склопакетів з низькоемісійними покриттями. В таблиці 2.1.2 зведено всі отримані результати проведених експериментальних досліджень теплопередачі через ВК, а також з ними можна ознайомитися в [51 - 56]. Вони були представлені на конференціях [57 - 66].

Таблиця 2.1.2. Порівняльна характеристика опору теплопередачі досліджених ВК.

| Тип склопакету  | $R_{дбн}$<br>м <sup>2</sup> ·К/Вт | $R_{о,експ}$<br>м <sup>2</sup> ·К/Вт. |
|---|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 4M <sub>1</sub> -10-4M <sub>1</sub> -10-4M <sub>1</sub>     | 0,47                              | 0,48                                  |
| 4M <sub>1</sub> -10Ar-4M <sub>1</sub> -10Ar-4M <sub>1</sub> | 0,49                              | 0,52                                  |
| 4M <sub>1</sub> -10Ar-4M <sub>1</sub>                       | 0,31                              | 0,36                                  |

|   |      |      |
|---|------|------|
| 4M <sub>1</sub> -10-4M <sub>1</sub> -10-4i (зима) | 0,64 | 0,62 |
| 4M <sub>1</sub> -10-4M <sub>1</sub> -10-4i (літо) | 0,64 | 0,66 |
| 4M <sub>1</sub> -20-4M <sub>1</sub> -20-4i        | -    | 0,96 |
| 4ENERGY50-10-4M <sub>1</sub> -10-4i               | -    | 0,72 |
| 6M <sub>1</sub> -12-i6                            | -    | 0,52 |
| 4i-8-4M <sub>1</sub> -8-4i                        | -    | 0,70 |

## 2.2. Дослідження однокамерного склопакету 6M<sub>1</sub>-12-6i.

Першочергово для експерименту було обрано приміщення, в якому встановлено однокамерний склопакет з низькоемісійним і-покриттям з формулою 6M<sub>1</sub>-12-6i (товщина скла 6 мм, відстань між склом 12 мм, на одне скло нанесене і-покриття). Термін дослідження – 31.01.2015 з 13:50 до 08.02.2015 - 23:50. Експеримент був проведений при погодних умовах, що відповідають вимогам [50]. Графік залежностей температури та густини теплового потоку для такого склопакету представлено на рис. 2.2.1.

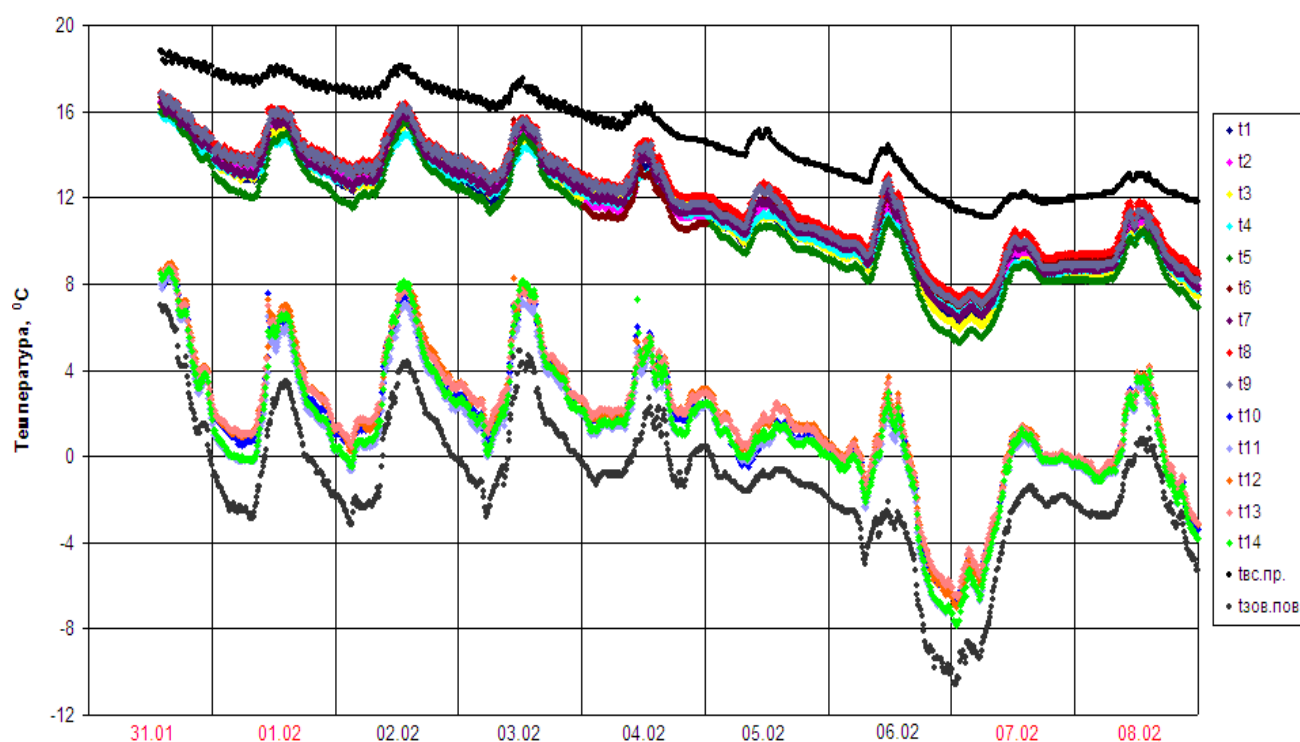




Рис. 2.2.1 Значення температури на внутрішній і зовнішній поверхні однокамерного склопакету 6M<sub>1</sub>-12-бі з і-покриттям, та температури зовнішнього та внутрішнього повітря. Період вимірювання - 01.02.2015 з 00:00 до 08.02.2015 до 23:50

Для зручності показано номери датчиків і кольорами відмічено де вони розміщені на склопакеті, рис. 2.2.2.

Криві - t1, t2, t3, t4, t5, t6 показують температуру на внутрішній поверхні склопакету, криві t7, t8, t9, t10, t11, t12 – відповідно на зовнішній поверхні склопакету, а tвс.пр і tзов.пов. показують значення температури всередині приміщення та зовнішнього повітря на відстані 20 см від склопакету. Точки t6, t7, t8, t9 були встановлені для додаткового моніторингу теплопередачі. Можна чітко відслідкувати, що експеримент був проведений при необхідних умовах, зазначених в [3, 4, 50].

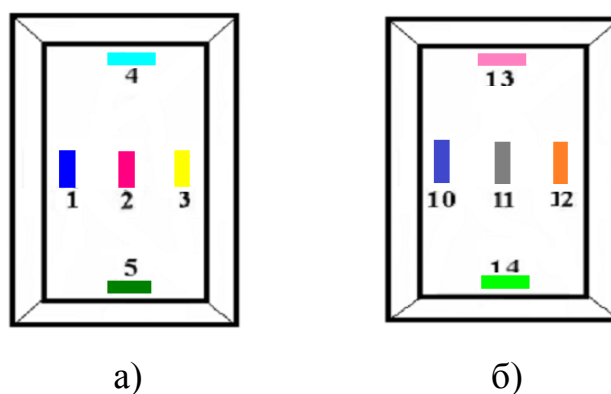


Рис. 2.2.2. Схема розміщення датчиків: а) на склопакеті розташованому всередині приміщення; б) на склопакеті розташованому зовні.

Провівши аналіз отриманих даних, можна зробити висновок, що значення температури датчика № 1, який розміщений всередині приміщення біля стінки, найнижчі через те що термічний опір стінки більший ніж склопакету, а значення на датчику № 4 - найвищі, на датчику № 5 – найнижчі, що пояснюється підйомно-опускною течією повітря поблизу склопакету. Дані, що отримані з центрального датчику мають плавно виражений характер без різких підйомів і опускань теплового потоку та температури, як на решті датчиків, а це дає змогу зробити

висновок про те, що є відтік теплоти від центру склопакету до бокових профілів, а також є вплив того фактору, що профіль та склопакет виготовлені з різних матеріалів і мають різні теплофізичні властивості. Була проведена оцінка різниці температури між центральною точкою (№ 2) та точками, що розміщені збоку всередині приміщення - різниця між точкою №2 та точкою № 1 (що знаходиться біля стінки) в середньому становила  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; різниця між точкою № 2 та точкою № 3 –  $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; різниця точок № 2 та № 4 –  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; різниця між точками № 2 та № 5 –  $1,15\text{ }^{\circ}\text{C}$  (на час проведення досліджень опалювальні конвектори були відключені відповідно для дотримання умов [3, 4, 49]). Значення густини теплового потоку всередині приміщення та ззовні відрізняється тим, що ззовні є коливання і стрибки внаслідок впливу погодних факторів. В ті дні, коли були опади і коли були пориви вітру, це відразу відображалося на експериментальних даних – були стрибки в декілька десятків  $\text{Вт}/\text{м}^2\text{K}$ , а вплив розсіяної сонячної радіації чітко відслідковується в денні години, рис. 2.2.3. Щодо від’ємних значень густини теплового потоку, то вони пояснюються оберненням теплового потоку, яке спостерігалось всередині дня, а це призводить до інверсії температур скляних поверхонь.

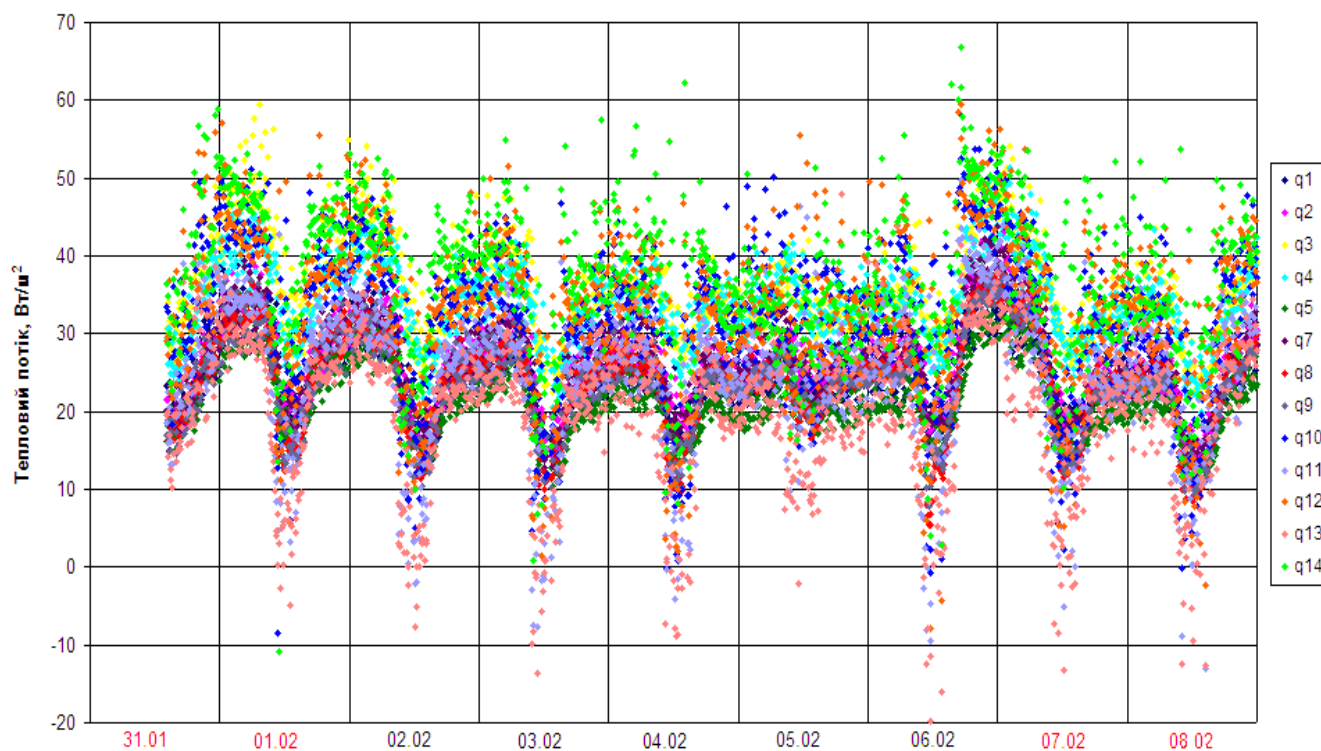


Рис. 2.2.3. Значення густини теплового потоку на поверхні склопакету 6М1–12–бі, датчики встановлені всередині приміщення і ззовні, період вимірювання - 31.01.2015 з 13:50 до 08.02.2015 - 23:50.

На рис. 2.2.3 є суттєві коливання теплового потоку, особливо зовнішнього, що зумовлені пульсаціями швидкості вітрового потоку. Їх характер ілюструє рис. 2.2.4, на якому наведені експериментальні дані локальної швидкості повітря на зовнішній поверхні фасадної стіни, отримані кожну секунду за допомогою термоанемометра Testo 405 (основні технічні характеристики приладу наведені в додатку А) встановленого своїм сенсором врівень з площиною поверхні фасаду, рис. 2.2.5. При середній швидкості вітрового потоку в 3,0 м/с значення її пульсацій досягало до 1,5 м/с, що відповідно до формули В.М. Богословського [16] призводило до зміни коефіцієнту тепловіддачі майже на порядок. Зазначимо, що відповідні експериментальні пульсації температури мали менший масштаб і сягали до 0,4 °С.

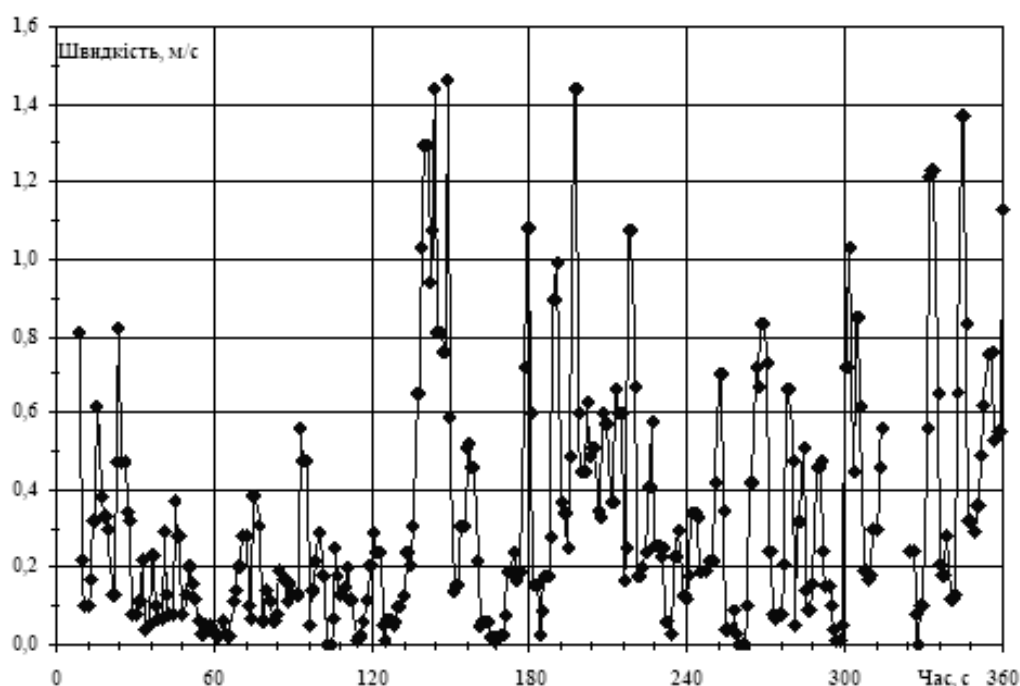


Рис. 2.2.4. Значення швидкості повітря на зовнішній поверхні фасадної стіни адміністративного корпусу №1.



Рис. 2.2.5. Зовнішній вигляд терманімометра Testo 405.

Відомо, що коефіцієнт тепловіддачі з зовнішньої поверхні огорожень залежить від швидкості вітрового потоку. Використовуючи отримані дані можна визначити коефіцієнт тепловіддачі за допомогою формули В.М. Богословського [16], а саме для вертикальної поверхні (так як датчики були встановлені таким чином)

$$\alpha_{з.верт.} = 5.8 + 11.6\sqrt{v}, \quad (2.2.1)$$

де  $v$  - швидкість вітру в м/с, а розмірність  $\alpha$  в Вт/К·м<sup>2</sup>. В залежності від пульсацій швидкості вітру, а було використано значення – 0,2; 0,5; 1; 1,5 м/с - визначили значення коефіцієнту тепловіддачі, який становить відповідно – 10,9; 14; 17,4; 19,96 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Максимальне значення пульсацій швидкості досягали 2,5 м/с, при якому значення коефіцієнту теплообміну становило 24,1 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Середнє значення швидкості вітру – 0,32 м/с, а значення  $\alpha_{ср}$ =12,4 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Зважаючи на це, а також з аналізу даних на рисунку 2.2.4, було зроблено висновок, що пульсації густини теплового потоку, які відображено на графіках залежності густини теплового потоку, зокрема на рис. 2.2.3, також пов'язані зі зміною швидкості вітру і відповідно зі зміною розрахункових значень коефіцієнту

тепловіддачі, а також з тим, що стіни містять вологу (тому значення термічного опору дещо знижується). Внаслідок проведеного аналізу встановлено, що пульсації теплового потоку відповідають пульсаціям швидкості потоку вітру по поверхні стіни.

В таблиці 2.2 представлена зміна значень значення коефіцієнту теплообміну в залежності від швидкості вітру. Де,  $\alpha_{з.верт}$  розраховано по формулі 2.2.1, а  $\alpha_{з.гор}$  – отримано по формулі 2.2.2 за [16], а  $\alpha_{з.пл}$  – визначено по формулі 2.2.3 [17].

$$\alpha_{з.гор} = 8,7 + 2,5v, \quad (2.2.2)$$

$$\alpha_{з.пл} = 1,163 \cdot (6,35v^{0,656} + 3,25e^{-1,91v}). \quad (2.2.3)$$

Таблиця № 2.2. Закономірність зміни коефіцієнтів тепловіддачі в залежності від швидкості та напрямку вітру.

| $V, \text{ м/с}$ | $\alpha_{з.верт.}$ | $\alpha_{з.гор.}$ | $\alpha_{з.пл}$ |
|------------------|--------------------|-------------------|-----------------|
| 0                | 5,8                | 8,7               | 1,16            |
| 1                | 17,4               | 11,2              | 7,94            |
| 1.5              | 19,96              | 12,45             | 9,84            |
| 2,5              | 24,1               | 14,95             | 12,05           |

Критеріями вимірювання вітрового потоку є швидкість та напрямок. В табл. 2.2  $\alpha_{з.гор}$  показує зміну коефіцієнту тепловіддачі в залежності від цього напрямку, та має значно вищі значення коефіцієнту, в порівнянні з отриманим значенням для вертикальної площини  $\alpha_{з.верт.}$ . Це в свою чергу ще раз показує, що пульсації теплового потоку, які спостерігаються на графіках є фізично обґрунтованими.

В результаті обробки експериментальних даних було визначено опір теплопередачі склопакета - R, який є характеристикою теплоізоляційної здатності огорожувальної конструкції будівлі. Чим більше його значення, тим менше теплоти проходить через віконну конструкцію. Для розрахунку опору теплопередачі склопакета обиралися експериментальні дані, що одержані в нічні години (з 19:00 07.02.15 по 06:00 08.02.15), рис. 2.2.6. В цей період відсутнє

сонячне випромінювання та вплив людей в приміщенні. Процес теплопередачі в цей період можна вважати практично квазістаціонарним. Формула, за якою було визначено опір теплопередачі:

$$R = \frac{1}{\alpha_{\text{внутр.}}} + \frac{\bar{t}_{\text{скл.внутр.}} - \bar{t}_{\text{скл.зовн.}}}{\bar{q}_{\text{скл.внутр.}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{зовн.}}} \quad (2.2.4)$$

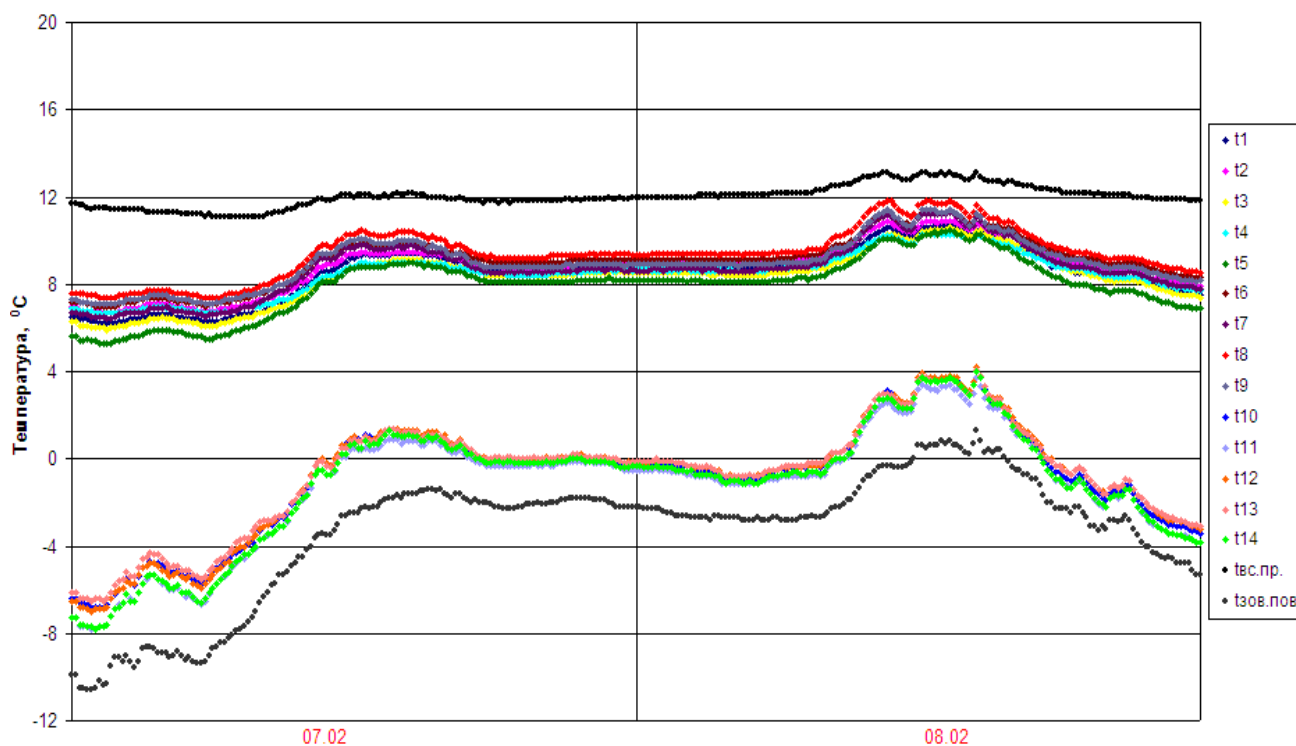


Рис. 2.2.6. Динаміка характерних температур склопакету 6M<sub>1</sub>-12-6i в часі проведення досліджень, які були обрані для визначення термічного опору.

Визначили, що для даного склопакету, 6M<sub>1</sub>-12-6i,  $R_{o,експ}=0,52$  м<sup>2</sup>·К/Вт. В діючих ДБН для такого типу склопакету значення R не приведено, але є значення для схожих варіантів [3]: 4M<sub>1</sub>-12-4i – R=0,56 м<sup>2</sup>·К/Вт; 4M<sub>1</sub>-16-4i – R=0,59 м<sup>2</sup>·К/Вт. На основі проведених експериментальних досліджень теплопередачі через двокамерний склопакет - 4M<sub>1</sub>-10-4M<sub>1</sub>-10-4M<sub>1</sub>, встановлено значення опору теплопередачі -  $R_{o,експ}=0,49$  м<sup>2</sup>·К/Вт. Можна зробити висновок, що навіть однокамерний склопакет з одним низькоемісійним покриттям має кращі теплотехнічні характеристики, ніж звичайний двокамерний склопакет [51].

### 2.3. Дослідження теплопередачі двокамерного склопакету 4M<sub>1</sub>-10-4M<sub>1</sub>-10-4і в зимовий та в літній період року.

Наступним етапом були дослідження двокамерного склопакету з і-покриттям 4M<sub>1</sub>-10-4M<sub>1</sub>-10-4і, з відстанню між склом 10 мм, товщина скла – 4 мм. На рис. 2.3.1, верхні криві - це значення температури на склопакеті всередині приміщенні, а нижні - на зовнішній поверхні склопакету. Експеримент був проведений при погодних умовах, що відповідають вимогам стандарту.

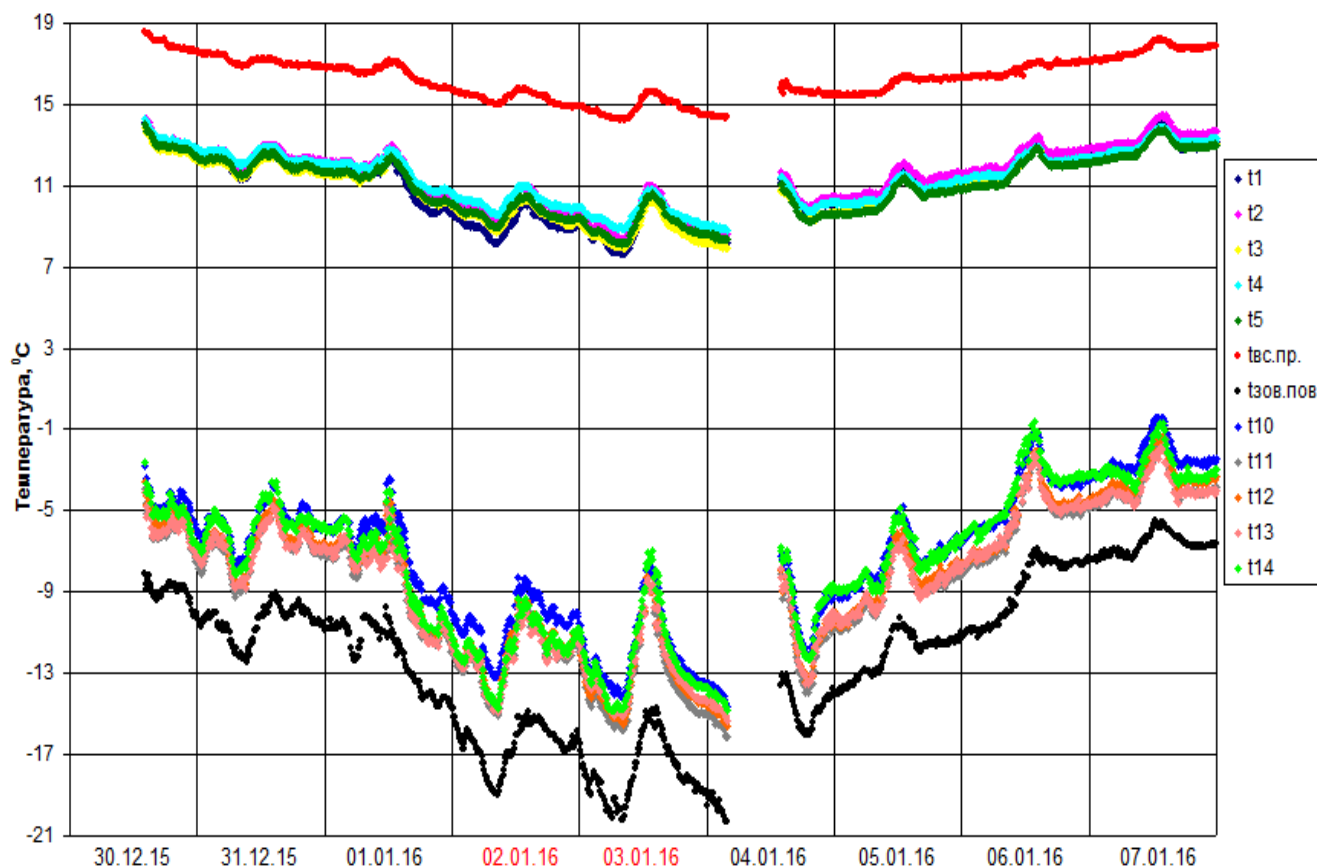


Рис. 2.3.1. Зміна у часі температури на внутрішній і зовнішній поверхні двокамерного склопакету 4M<sub>1</sub>-10-4M<sub>1</sub>-10-4і з і-покриттям та температури зовнішнього і внутрішнього повітря. Електропостачання в будівлі було відсутнє 04.01 з 03:50 до 04.01 - 13:40.

Можна побачити на рис. 2.3.1 такі ж характерні зміни у показаннях датчиків, як і ті, що наведені на графіках для однокамерного склопакета. Тобто датчик, що розташований біля стіни (край віконного прорізу в стіні), показує значення температури найнижчі, а в точці №4, яка знаходиться у верхній частині



склопакета, значення найвищі. Також було визначено густину теплового потоку на поверхнях склопакету, рис. 2.3.2. Тут теж можемо спостерігати явище обернення густини теплового потоку в середині дня, коли інсоляція найвища.

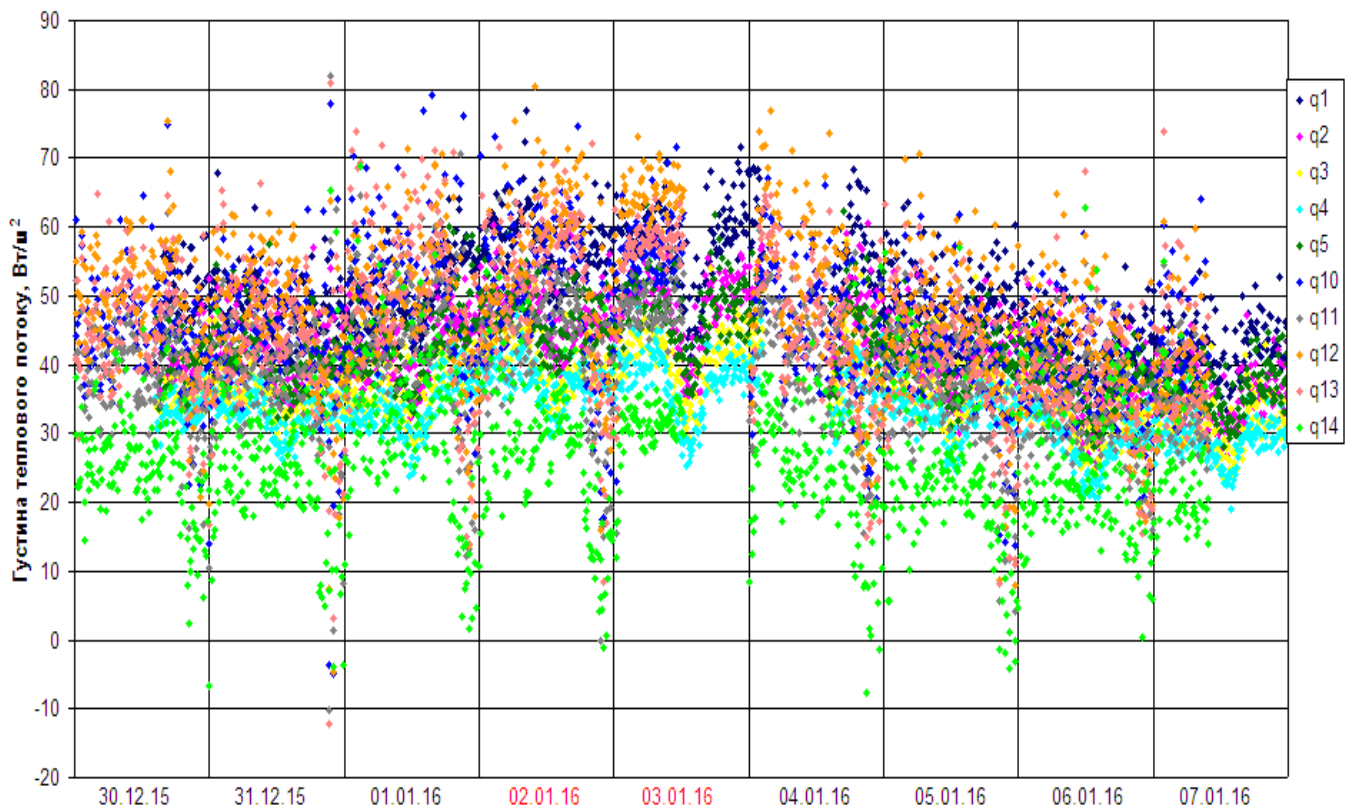


Рис. 2.3.2. Значення густини теплового потоку на внутрішній та зовнішній поверхнях двокамерного склопакету 4M<sub>1</sub>-10-4M<sub>1</sub>-10-4i з і-покриттям. Період вимірювання - 30.12.2015 з 14:00 до 07.01.2016 до 23:50.

На основі отриманих даних було визначено величину опору теплопередачі двокамерного склопакета з і-покриттям, що враховує коефіцієнти тепловіддачі з поверхонь склопакета. Його величина, що визначалася у період часу, коли спостерігався квазістаціонарний режим (з 19:00 31.12.15 по 06:00 01.01.16), становить  $R_{o, \text{експ.}}=0,62 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ . В стандарті [3] його значення становить -  $R=0,64 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ .

Для цього ж двокамерного склопакету з низькоемісійним (і-покриттям), були проведені дослідження термічних характеристик і в літній період. Враховуючи особливість такого покриття, що має відмінність в тому, що влітку воно не пропускає довгохвильовий спектр сонячних променів, тобто зменшує



частку радіаційного випромінювання. Для проведення експериментальних досліджень, був обраний період коли перепад температур, що відповідав приведеним вимогам у стандарті. На рис. 2.3.3 і 2.3.4 показано результати досліджень.

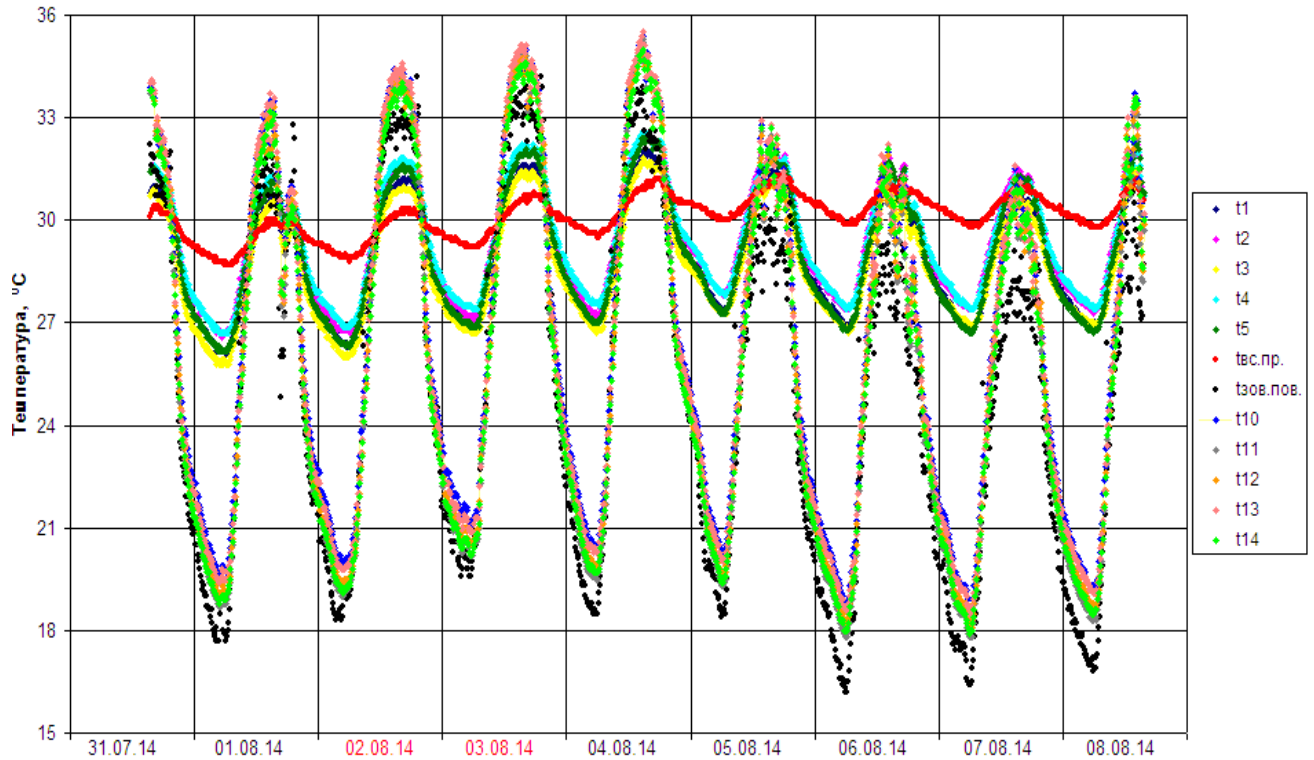


Рис. 2.3.3. Зміна у часі температури на внутрішній і зовнішній поверхні двокамерного склопакету 4M<sub>1</sub>-10-4M<sub>1</sub>-4і з одним низькоемісійним покриттям та температури внутрішнього і зовнішнього повітря, дослідження проводилися в літній період.

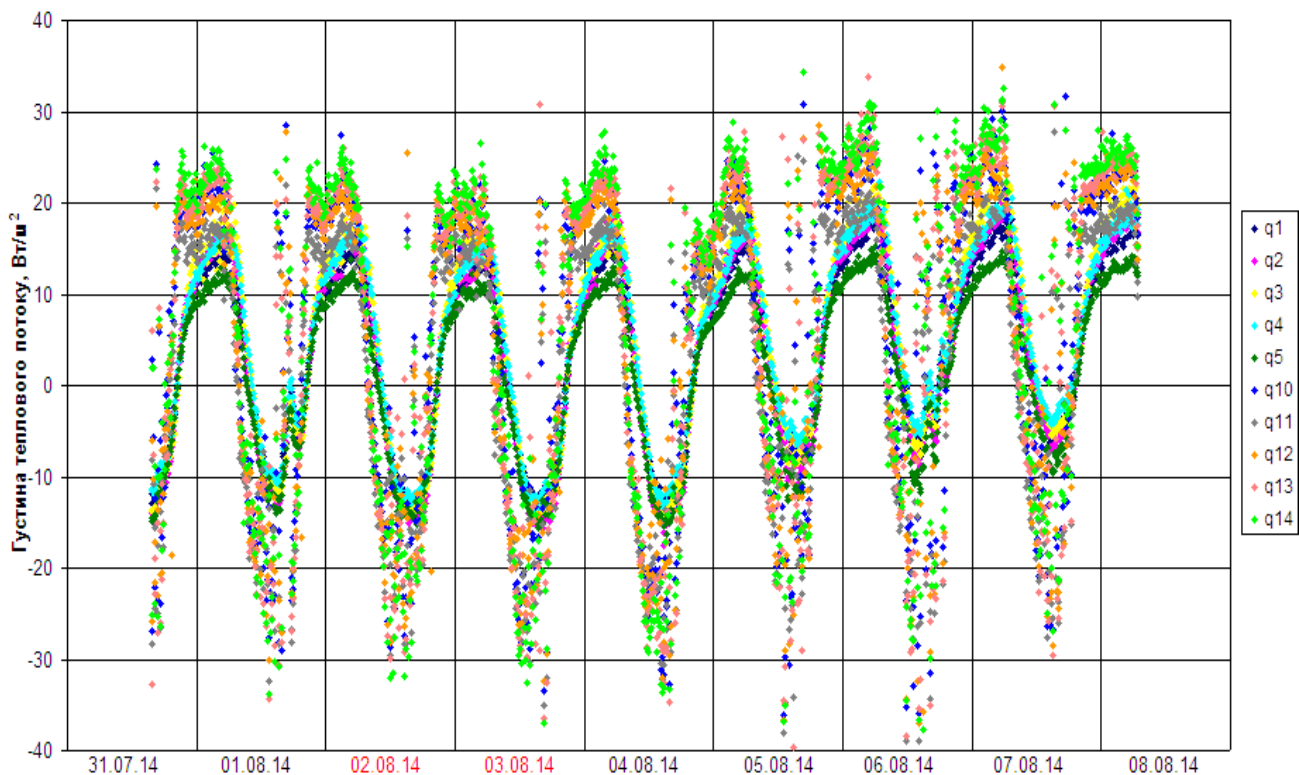


Рис. 2.3.4. Значення густин теплого потоку на внутрішній і зовнішній поверхнях двокамерного склопакету 4M<sub>1</sub>-10-4M<sub>1</sub>-4i з одним низькоемісійним покриттям, дослідження проводилися в літній період.

З рис. 2.3.4 бачимо, що всередині дня також спостерігається обернення густини теплого потоку, але він спостерігався вже не опівдні, як взимку, а близько 14 - 15 години дня. Для цього періоду вимірювань також було визначено значення опору теплопередачі,  $R_{o, \text{експ.}} = 0,66 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ .

#### 2.4. Дослідження двокамерного склопакету 4M<sub>1</sub>-20-4M<sub>1</sub>-20-4i.

Наступний етап експериментальних досліджень проводився з метою визначення характеристик двокамерного склопакету з одним і-покриттям, який відрізнявся від попереднього більшою відстанню між склом: 20 мм. Його формула - 4M<sub>1</sub>-20-4M<sub>1</sub>-20-4i. Із збільшенням ширини дистанційної рамки і відстані між склом, теплоізоляційні характеристики підвищуються, а також покращується шумоізоляція. На рис. 2.4.1 приведена схема розміщення датчиків на поверхнях склопакетів, а на рис. 2.4.2 і 2.4.3 - відповідні графічні залежності.

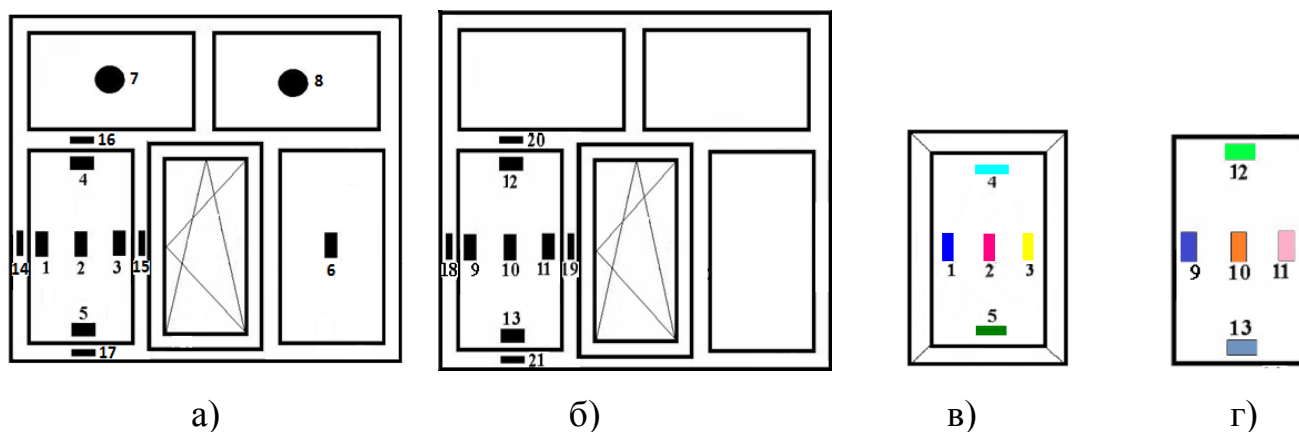


Рис. 2.4.1. Схема розміщення датчиків на поверхнях склопакетів, вид зсередини приміщення; а) датчики розміщені на склопакеті і віконному профілі всередині приміщення; б) датчики розміщені на зовнішній поверхні ВК; в) схема розміщення датчиків на внутрішній поверхні склопакету; г) схема розміщення датчиків на зовнішній поверхні склопакету.

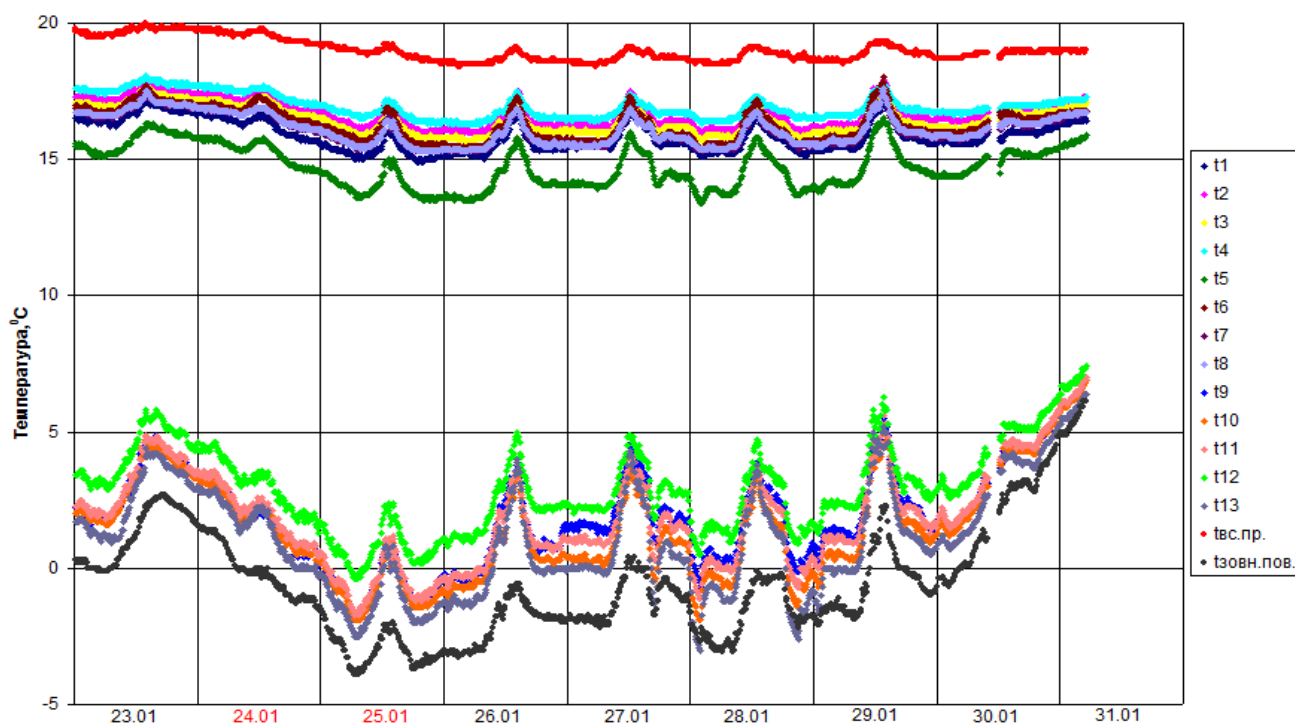


Рис. 2.4.2. Зміна у часі температури на внутрішній та зовнішній поверхнях двокамерного склопакету 4M<sub>1</sub>-20-4M<sub>1</sub>-20-4i з і-покриттям та температури зовнішнього і внутрішнього повітря. Період вимірювання - 23.01.2015 з 00:00 до 31.01.2015 - 04:50. Електропостачання в будівлі було відсутнє 30.01 з 09:40 до 11:50.

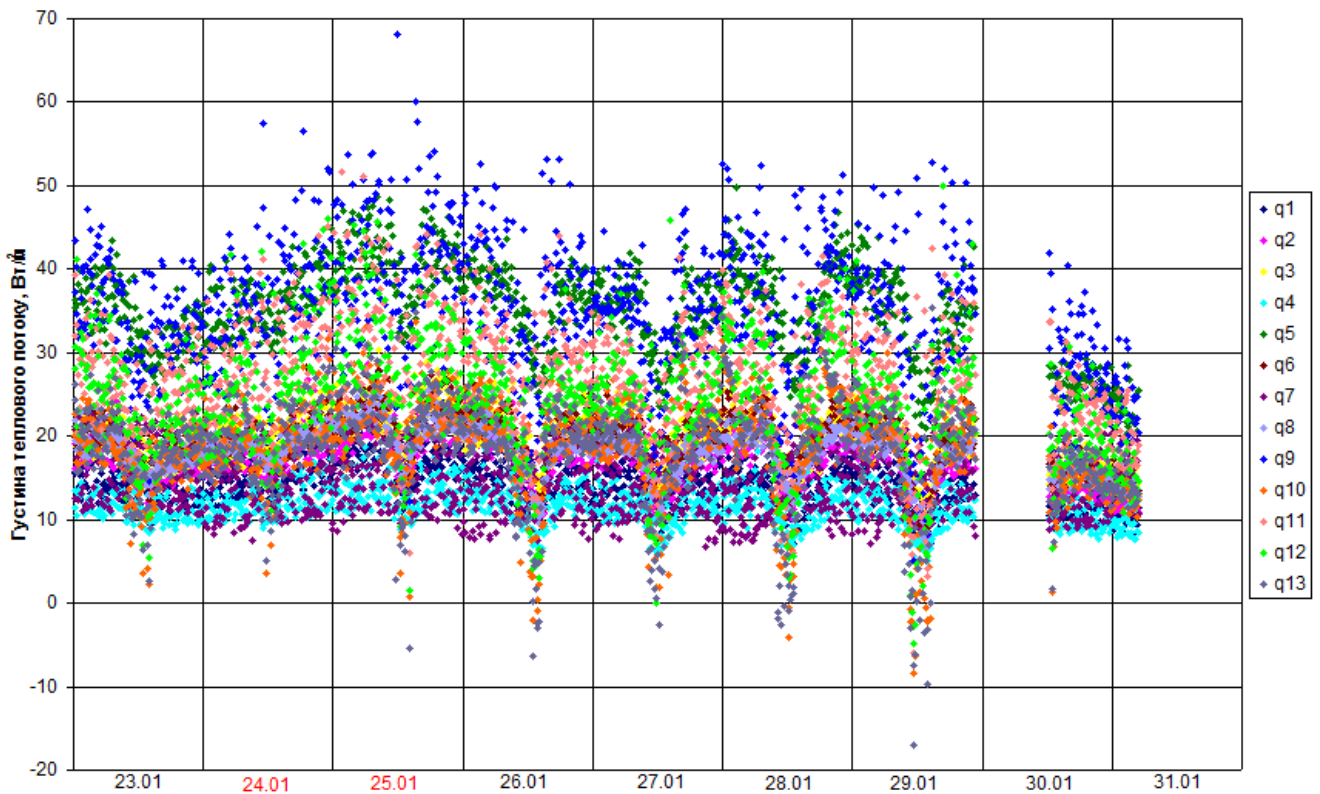


Рис. 2.4.3. Значення густин теплового потоку на внутрішній і зовнішній поверхнях двокамерного склопакету 4M<sub>1</sub>-20-4M<sub>1</sub>-20-4і з і-покриттям. Період вимірювання - 23.01.2015 з 00:00 до 31.01.2015 - 04:50. Електропостачання в будівлі було відсутнє з 29.01 з 22:40 до 30.01 - 12:00.

В діючому стандарті України [3] для такого типу склопакету значення опору теплопередачі не приведено, а наведено значення опору для склопакета, формула якого 4M<sub>1</sub>-16-4M<sub>1</sub>-16-4і. Відстань між склом у цьому склопакеті становить 16 мм, а величина опору теплопередачі - 0,72 м<sup>2</sup>К/Вт. Для досліджуваного склопакета з формулою 4M<sub>1</sub>-20-4M<sub>1</sub>-20-4і експериментально знайдена величина опору становить  $R_{o, \text{експ.}} = 0,96 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ , що на 20% перевищує нині діючі нормативи для світлопрозорих конструкцій. Отже, шляхом збільшення ширини камер склопакета, що заповнені повітрям з низькою теплопровідністю, досягається таке високе значення опору теплопередачі.

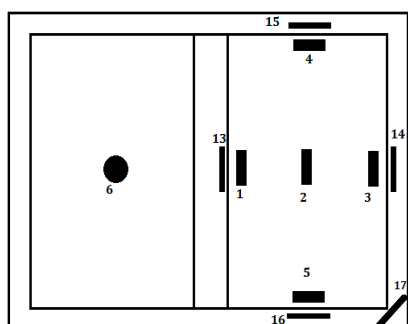
## **2.5. Дослідження двокамерного склопакету з двома низькоемісійними покриттями, встановленого в експериментальному енергоефективному будинку пасивного типу.**

Оскільки цей будинок створювався як науково-технічна та технологічна теплофізична лабораторія [52], велика увага приділялася створенню розгалуженої автоматизованої вимірювальної системи. Вимірювальна система включала різноманітні автоматизовані неперервні вимірювання полів температур, теплових потоків, вологості, тиску, витрат повітря, витрат води, витрат теплової енергії, зовнішніх кліматичних параметрів. Датчики та вимірювальні прилади розташовуються в будівельних конструкціях, в приміщеннях, в навколишньому ґрунті та повітрі. Ці заходи створювалися з ціллю вирішення завдань щодо термомодернізації існуючого житлово-адміністративного фонду, проектування і будівництва енергоефективних будівель шляхом застосування інноваційних технічних рішень, що оптимальні з енергетичної, економічної, екологічної та соціальної сторін [53]. При цьому, нами створені методики передбачають розрахунки теплового стану будівлі і параметрів мікроклімату приміщень в залежності від кліматичних і погодних умов даної місцевості, а також впливу застосованих технологій на довкілля [54]. Додатковою метою є кінцеве підвищення комфортності умов перебування людини у будівлі, що розглядається як єдина енергетична система.

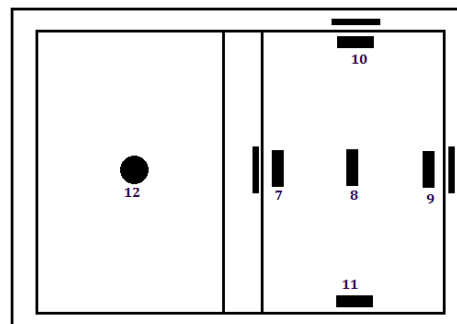
Для визначення тепловтрат через огорожувальні конструкції експериментального енергоефективного будинку розроблено та встановлено вимірювальний комплекс, за допомогою якого в режимі реального часу визначатимуться густини теплових потоків на поверхнях та температурні показники цих поверхонь. Кількісна оцінка тепловтрат, їх аналіз, а також інші теплотехнічні характеристики огорожувальних конструкцій визначаються шляхом встановлення вимірювальних датчиків.

Враховавши будову та особливості пасивного будинку, а також всі отримані експериментальні результати, ми визначили, що для енергоефективного будинку пасивного типу, найкращим варіантом будуть ВК з трикамерним профілем та

склопакетами з двома і-покриттями з формулою  $4i-8-4M_1-8-4i$  і  $4i-10-4M_1-10-4i$ . Після встановлення у будинку склопакетів, було проведено експериментальні дослідження теплопередачі через склопакет –  $4i-8-4M_1-8-4i$ . Схема розміщення датчиків та зовнішній вигляд ВК представлені на рис. 2.5.1.



а)



б)



в)



г)

Рис. 2.5.1. Схема розміщення датчиків на досліджувальній ВК, вид зсередини приміщення; а) датчики розміщені на склопакеті і віконному профілі всередині приміщення; б) датчики розміщені на зовнішній поверхні; в) фотографія розміщення датчиків всередині приміщення; г) фотографія розміщення датчиків зовні на досліджувальному склопакеті.



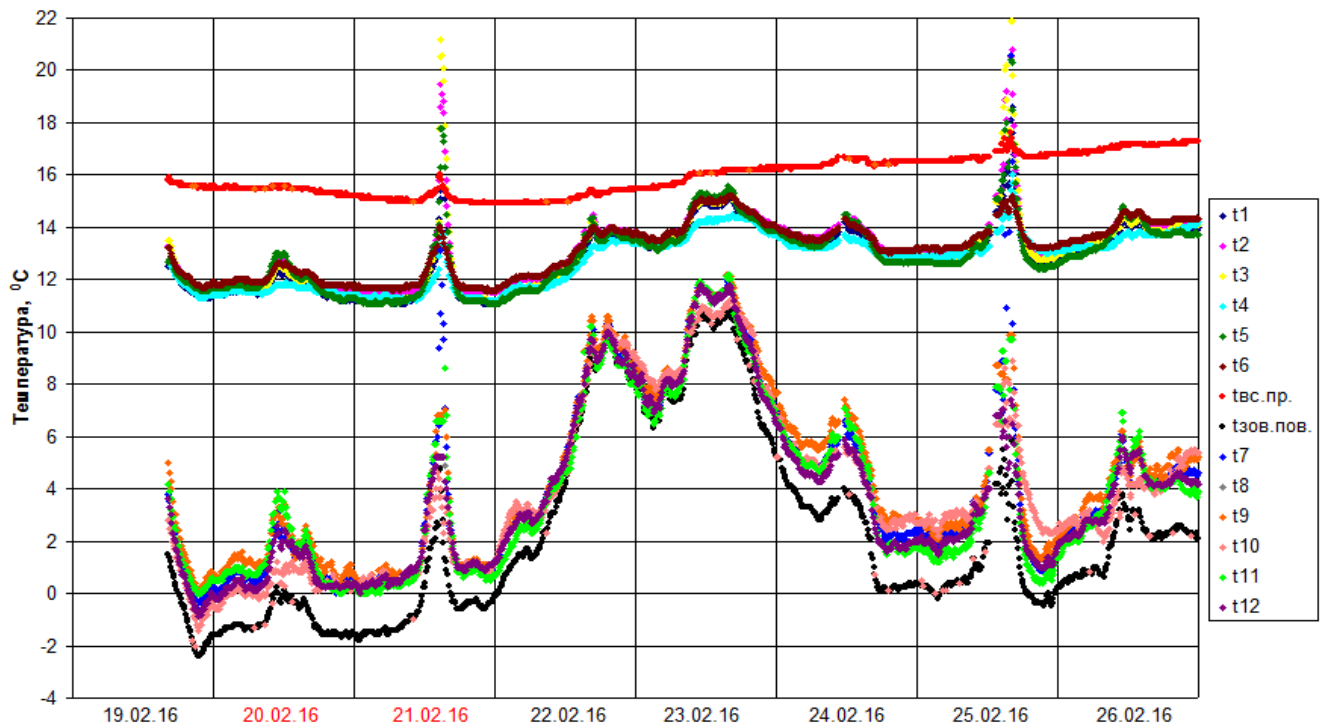


Рис. 2.5.2. Зміна у часі температури на внутрішній та зовнішній поверхнях двокамерного склопакету з 2-ма і-покриттями 4i-8-4M<sub>1</sub>-8-4i, та температури зовнішнього і внутрішнього повітря. Період вимірювання - 19.02.2016 з 16:10 до 26.02.2016 до 23:50.

Найвищі значення температури спостерігалися в точках № 2 і № 6, які знаходяться в центрах досліджуваних частин віконної конструкції. Рівними, або дещо нижчими були значення в точці № 4, яка знаходиться зверху, це пояснюється підйомно-опускною течією повітря, з цієї ж причини, значення в точці № 5 (вона знаходиться знизу) є найнижчими. Стосовно датчика № 1, який був розміщений біля стінки – отримані значення температури були значно нижчими, ніж в центрі склопакету, так як опір теплопередачі стінки більший ніж склопакету. Різниця між температурою всередині приміщення та температурою на внутрішній поверхні склопакету становила приблизно 3 – 4 °С. Стосовно отриманих значень температури на зовнішній поверхні склопакету: тут найвищі значення отримані в точці біля стінки та в точці внизу склопакету. Різниця між температурою зовнішнього повітря та температурою на зовнішній поверхні

склопакету складала  $2^{\circ}\text{C}$  в дні з від'ємною температурою повітря, та з різницею  $0,5^{\circ}\text{C}$  в дні, коли температура була  $0^{\circ}\text{C}$  або вище.

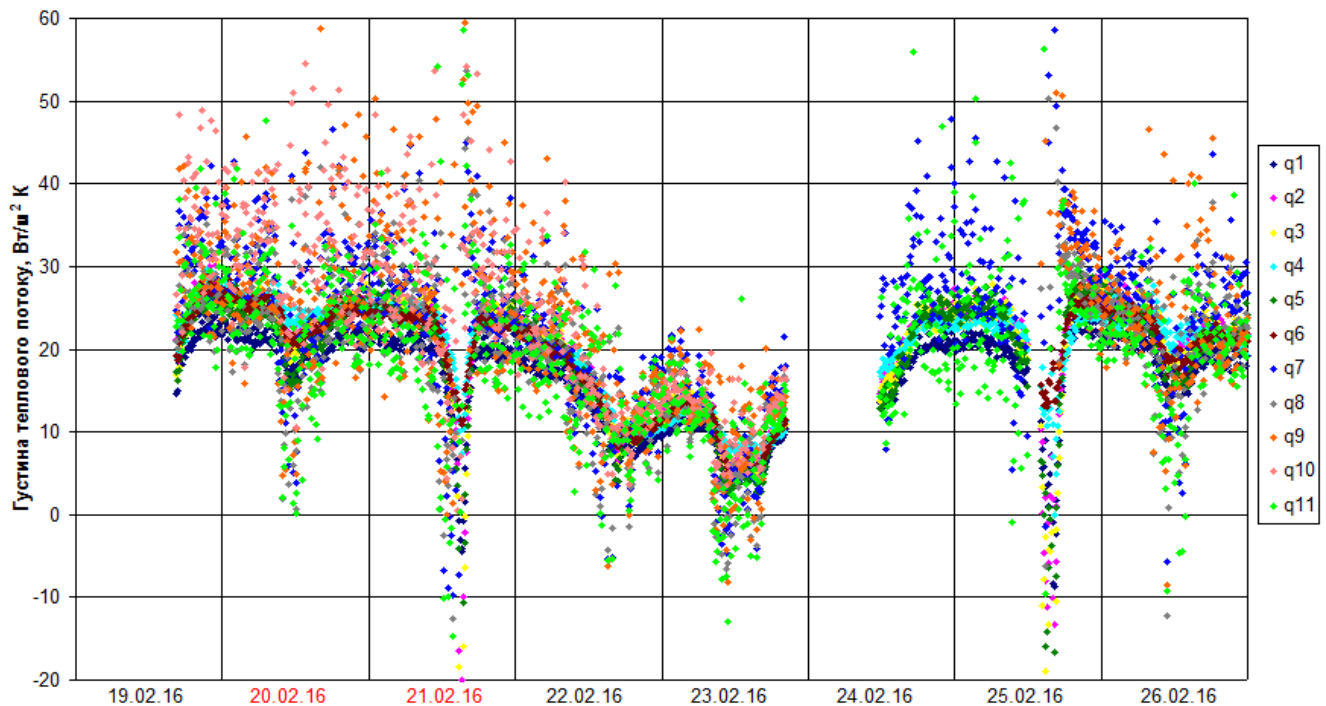


Рис. 2.5.3. Значення густин теплового потоку на внутрішній і зовнішній поверхнях двокамерного склопакету з 2-ма і-покриттями 4i-8-4M<sub>1</sub>-8-4i, та температури зовнішнього і внутрішнього повітря. Період вимірювання - 19.02.2016 з 16:10 до 26.02.2016 до 23:50.

Також було експериментально досліджено густину теплового потоку на поверхнях склопакету, рис. 2.5.3. Можна відзначити пульсації густини теплового потоку. На внутрішній поверхні склопакету коливання густини теплового потоку є невеликі, приблизно на  $20 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ , в той час коли на зовнішній поверхні вони становили приблизно  $50 - 60 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ . Це пов'язано із зміною швидкості вітру і відповідно зі зміною значень коефіцієнту тепловіддачі, а також з тим, що стіни мають деякий вміст вологи (тому значення термічного опору дещо знижується). На графіку видно, що в денні години чітко відслідковується вплив сонячного радіаційного випромінювання, хоча прямого попадання сонячного проміння не було, але все-таки досягало розсіяне випромінювання. Варто також відзначити, що і на графіках температурних залежностей те саме явище можна спостерігати в денні години, де відслідковується підвищення значень температури у всіх



досліджуваних точках. Як і для решти склопакетів, було визначено опір теплопередачі дослідженого склопакету, він становив  $R_{o, \text{експ.}}=0,70 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ . Для порівняння, відповідно до [3] – для однокамерного склопакету з одним і-покриттям  $4M_1-8-4i$ ,  $R=0,51 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ ; для двокамерного склопакету з одним і-покриттям  $4M_1-8-4M_1-8-4i$ ,  $R=0,61 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ , для двокамерного з більшою відстанню між склом з одним і-покриттям  $4M_1-10-4M_1-10-4i$ ,  $R=0,64 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ ; для  $4M_1-12-4M_1-12-4i$ ,  $R=0,68 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ ; а для  $4M_1-16-4M_1-16-4i$ ,  $R=0,72 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ . Тобто, знову переконуємося, що збільшення відстані між склом, підвищує опір теплопередачі.

Основні результати розділу опубліковані в роботах: [42, 47, 51 - 66].

## **Висновки до розділу 2.**

Провівши серію експериментальних досліджень та проаналізувавши всі отримані результати, можна зробити висновок, що оптимальним варіантом для заміни старих віконних конструкцій являються склопакети з низькоемісійним м'яким покриттям. Проведені дослідження показали, що за рахунок нанесеного покриття на поверхню скла зменшується радіаційна складова теплового потоку, що сприяє збільшенню значення термічного опору, а відповідно і зменшенню тепловтрат через світлопрозорі конструкції. При збільшенні відстані між стеклами, опір теплопередачі збільшується. При вірному підборі склопакету можна досягти значення опору теплопередачі вищі, ніж того вимагають діючі стандарти України, тим самим отримавши менші тепловтрати через ВК, а також заощадити кошти споживачів за тепlopостачання. Враховуючи кліматичне розміщення України, для будівель високої енергетичної ефективності рекомендовано встановлювати подвійні двокамерні вікна зі склопакетами  $4i-8-4M_1-8-4i$  або  $4i-10-4M_1-10-4i$ . Врахувавши співвідношення - якість (енергоефективність) – ціна, такі склопакети запропоновані для: - проекту термомодернізації корпусів 1 та 2 ІТТФ НАН України (вул. Булаховського, 2); -

реалізовані в експериментальному будинку пасивного типу ІТТФ НАН України; - в житловому будинку інвестиційного проекту ІТТФ НАН України.

Вперше експериментально було виявлено теплофізичний ефект, що спостерігається в полудень в зимовий період і полягає в оберненні напрямку теплового потоку на зовнішній поверхні склопакету і віконного профілю, що пов'язано з нестационарністю процесу теплопередачі та з впливом денного розсіяного сонячного випромінювання.

Було отримано великий масив експериментальних даних по температурних полях, полях теплового потоку та по опорі теплопередачі 8 варіантів віконних склопакетів при їх довготривалій експлуатації в умовах реального клімату.

Створено експериментальний вимірювальний комплекс для дослідження теплоізоляційних властивостей світлопрозорих огорожувальних конструкцій (СОК) будівлі при їх реальній експлуатації.

## РОЗДІЛ 3. ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ЧЕРЕЗ ВІКОННІ КОНСТРУКЦІЇ

### 3.1. Інженерна методика розрахунку річних тепловтрат через одно- та багатокамерні склопакети (одновимірна теплофізична модель, баланс енергетичних потоків).

Розроблена інженерна методика розрахунку тепловтрат через віконні конструкції в одновимірній постановці. Вона дозволяє врахувати вплив радіаційної складової сонячного випромінювання на теплопередачу через віконний склопакет.

Газові прошарки широко застосовуються в різних пристроях як теплоізолятори. Основною причиною цьому стали низькі коефіцієнти теплопровідності газів в порівнянні з твердими матеріалами. Якщо звернутися до будівельної практики, то відношення теплопровідності повітря і цегли складе:

$$\frac{\lambda_{\text{пов}}}{\lambda_{\text{цег}}} = \frac{0,025}{0,67} = 0,0375, \quad (3.1.1)$$

А отже, теплопровідна здатність повітря майже в 30 разів менша від теплопровідності цегли. Однак гази відносяться до легкорухомих і прозорих середовищ, в яких теплоперенос здійснюється не тільки молекулярною теплопровідністю, але і конвекцією і випромінюванням, що істотно знижує тепловий опір газового прошарку. Характер руху в газових прошарках залежить від багатьох факторів, в тому числі від геометричних характеристик і розташування в просторі. Виходячи з теорії подібності та розмірностей, можна прийти до висновку, що внесок конвективної складової теплопереносу буде зменшуватися в міру звуження ширини каналів. Так виникли двошарові, а в загальному випадку, багатошарові конструкції горизонтальної та вертикальної орієнтації.

**Постановка задачі.** Принципова схема багатокамерного склопакета представлена на рис. 3.1.1. Число газових камер коливається від однієї до трьох (з відповідною зміною кількості порожнин і індексів при позначеннях, показаних на

рис. 3.1.1). Газові прошарки зазвичай замкнуті, а задачі розрахунку руху і теплопереносу в них відносять до класу внутрішніх завдань. З великого числа теоретичних і експериментальних досліджень зупинимося, перш за все, на результатах робіт G. Batchelor [20, 21], в яких дано рішення гідродинамічної і теплової задач для в'язкої рідини, що не стискується, в прямокутній замкнутій області з ізотермічними вертикальними стінками та з температурним перепадом між ними  $T_i - T_{i+1} = \Delta T_{i,i+1}$  ( $i = 2, 4, 6$ ), ідеально теплопровідними, або ідеально теплоізолювальними горизонтальними обмежувальними поверхнями [67].

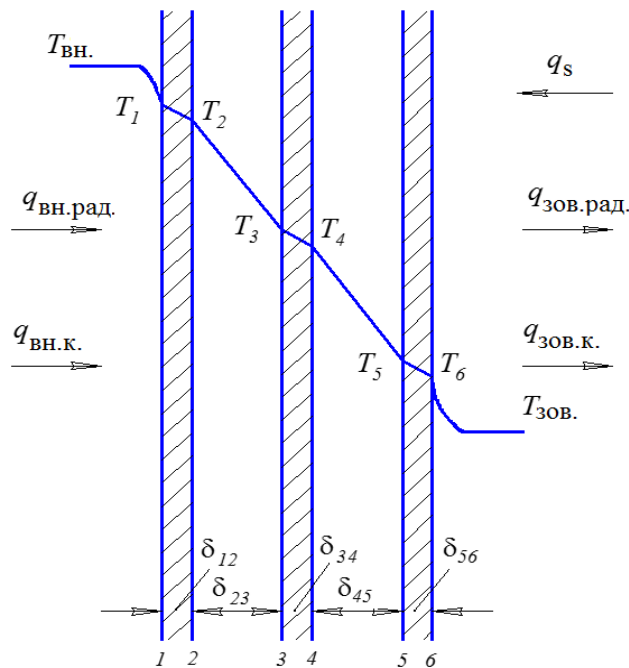


Рис. 3.1.1. Схема перерізу віконного склопакету.

В результаті встановлено, що при

$$\frac{h}{\delta} = 5 \div 200 \quad i \quad Ra = \frac{g\gamma\delta_{i,i+1}^3\Delta T_{i,i+1}}{\nu a} \leq 10^3. \quad (3.1.2)$$

конвекція в горизонтальному напрямку відсутня ( $v_x = 0$ ), теплопередача в замкнутій області здійснюється теплопровідністю, а розподіл вертикальних швидкостей газу наступний:

$$\bar{v}_z = \frac{v_z}{a/\delta_{i,i+1}} = \frac{Ra}{12} \eta(1-\eta)(2\eta-1), \quad \eta = \frac{x}{\delta_{i,i+1}}. \quad (3.1.3)$$

Рішення G.W. Batchelor корелюється з результатами експериментів E.R.G. Eckert, W.O. Carlson [22]:

$$\text{Nu}_{\text{cp}} = \left( \frac{\alpha \delta_{i,i+1}}{\lambda_{i,i+1}} \right)_{\text{cp}} = 1 + 0,00166 \frac{\delta_{i,i+1}}{h} \text{Gr}^{0,9}, \quad \text{Gr} = \frac{g \gamma \Delta T_{i,i+1} \delta_{i,i+1}^3}{\nu^2}, \quad (3.1.4)$$

а також з роботами Г. Гершуні, Е. Жуховицького, Е. Таруніна [23] і М. Міхєєва.

Згідно (3.1.3) і (3.1.4) при температурах повітря  $T_{\text{пов}} \approx 0 \div 20$  °С і  $\Delta T_{i,i+1} \leq 10$  °С, висоті пакету  $h$  порядку 2 м, і повітряному прошарку між стеклами  $\delta = 0,01$  м значення  $\text{Gr} \approx 1,61 \cdot 10^3$ ,  $\text{Ra} \approx 1,138 \cdot 10^3$  і  $\text{Nu}_{\text{cp}} \approx 1$ . Максимальне значення вертикальної швидкості в прошарку -  $v_{z,\text{max}} \approx 1,9$  мм/с.

На склопакет діють (рис. 3.1.1): зі сторони приміщення і на зовнішній його поверхні конвективні і радіаційні складові теплового потоку, а також сонячна інсоляція. Через малу масу склопакету можна знехтувати зміною його тепловмісту. Це дає можливість використання порівняно простого розрахункового алгоритму, записаного для двокамерного склопакету із значеннями коефіцієнтів, загальноприйнятих в будівельній теплофізиці огорожень [16, 17].

Поява коефіцієнта 1,163 в формулах (3.5), (3.6) пояснюється перерахунком розмірності ккал/год у Вт.

Розглянемо методику оцінки впливу сонячної радіації на теплопередачу через віконний склопакет. Густина інсоляції визначається залежностями:

$$U_{\pi/2} = U_{s\downarrow} + 0,5U_{d\leftrightarrow} + 0,5 A (U_{s\leftrightarrow} + U_{d\leftrightarrow}), \quad (3.1.5)$$

$$q_s = \frac{\pi U_{\beta}}{2(t_{\text{зх}} - t_{\text{cx}})} \sin \left( \pi \frac{t - t_{\text{cx}}}{t_{\text{зх}} - t_{\text{cx}}} \right), \quad t \in [t_{\text{cx}}, t_{\text{зх}}], \quad (3.1.6)$$

Оскільки такі задачі найбільш зручно вирішувати чисельно, нижче прийняті наступні значення величин:

1. Повітряний прошарок товщиною  $\delta_{2,3} = \delta_{4,5} = 0,010$  м і  $\lambda_{\text{пов}} = 0,025$  Вт/(м·К).

2. Віконне скло з  $\delta_{1,2} = \delta_{3,4} = \delta_{5,6} = 0,003$  м і  $\lambda_{\text{ск}} = 0,75$  Вт/(м·К).

3. Температура всередині приміщення  $T_{\text{вн}} = 20$  °С = const.

4. Цілорічні дані про зміну температури зовнішнього повітря  $T_{306}(t)$  і швидкості вітру  $v(t)$ , часу сходу сонця  $t_{cx}(t)$  і заходу  $t_{zx}(t)$ , добові значення прямої радіації на вертикальну стінку  $U_{s\uparrow}(t)$ , на горизонтальну поверхню  $U_{s\leftrightarrow}(t)$  і розсіяної радіації  $U_{d\leftrightarrow}$  встановлюються за даними гідрометеослужби для даної місцевості з врахуванням орієнтації вертикальної поверхні. В нашому випадку використовувалися дані для м. Києва [68 - 70, 19] шляхом рівномірного розподілу середньомісячних значень на кожену добу певного місяця.

Система рівнянь в одновимірній системі координат для розрахунку тепловтрат:

$$\alpha_{вн} = 1,163 \left[ 1,43 \sqrt{(T_{вн} - T_1)} \right], \quad \alpha_{306} = 1,163 \left[ 6,31 v_{306}^{0,656} + 3,25 e^{-1,91 v_{306}} \right] \quad (3.1.7)$$

$$C_{вн,1}^+ = \frac{1,163}{\left( \frac{1}{4,50} + \frac{1}{4,65} - \frac{1}{4,96} \right) (T_{вн} - T_1)} \left[ \left( \frac{T_{вн} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_1 + 273}{100} \right)^4 \right],$$

$$C_{23}^+ = \frac{1,163}{\left( \frac{1}{4,65} + \frac{1}{4,65} - \frac{1}{4,96} \right) (T_2 - T_3)} \left[ \left( \frac{T_2 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_3 + 273}{100} \right)^4 \right],$$

$$C_{45}^+ = \frac{1,163}{\left( \frac{1}{4,65} + \frac{1}{4,65} - \frac{1}{4,96} \right) (T_4 - T_5)} \left[ \left( \frac{T_4 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_5 + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (3.1.8)$$

$$C_{6,306}^+ = \frac{1,163}{\left( \frac{1}{4,65} + \frac{1}{4,96} - \frac{1}{4,96} \right) (T_6 - T_{306})} \left[ \left( \frac{T_6 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{306} + 273}{100} \right)^4 \right],$$

$$q_{вн,1} = (\alpha_{вн} + C_{вн,1}^+) (T_{вн} - T_1), \quad q_{12} = \frac{\lambda_{12}}{\delta_{12}} (T_1 - T_2), \quad q_{23} = \left( \frac{\lambda_{23}}{\delta_{23}} + C_{23}^+ \right) (T_2 - T_3). \quad (3.1.9)$$

$$q_{34} = \left( \frac{\lambda_{34}}{\delta_{34}} + C_{34}^+ \right) (T_3 - T_4), \quad q_{56} = \frac{\lambda_{56}}{\delta_{56}} (T_5 - T_6), \quad q_{6,306} = (\alpha_{306} + C_{6,306}^+) (T_6 - T_{306}) - q_s,$$

$$q_{вн,1} = q_{12} = q_{23} = q_{34} = q_{45} = q_{56} = q_{6,306} = q, \quad (3.1.10)$$

$$T_{вн} - T_{306} = q \left( \frac{1}{\alpha_{вн} + C_{вн,1}^+} + \frac{\delta_{12}}{\lambda_{12}} + \frac{1}{\frac{\lambda_{23}}{\delta_{23}} + C_{23}^+} + \frac{1}{\frac{\lambda_{34}}{\delta_{34}} + C_{34}^+} + \frac{\delta_{56}}{\lambda_{56}} + \frac{1}{\alpha_{306} + C_{6,306}^+} \right) + \frac{q_s}{\alpha_{306} + C_{6,306}^+}. \quad (3.1.11)$$

В результаті вирішення системи рівнянь 3.1.7 – 3.1.11 отримано результати для однокамерного склопакету (рис. 3.1.2 (а, б)), розміщеного на південній і на

північній стороні фасаду за обраний період – середину зими (15 січня). Врахувавши всі отримані характеристики, далі було проведено розрахунок і для двокамерного склопакету, а потім – для трикамерного.

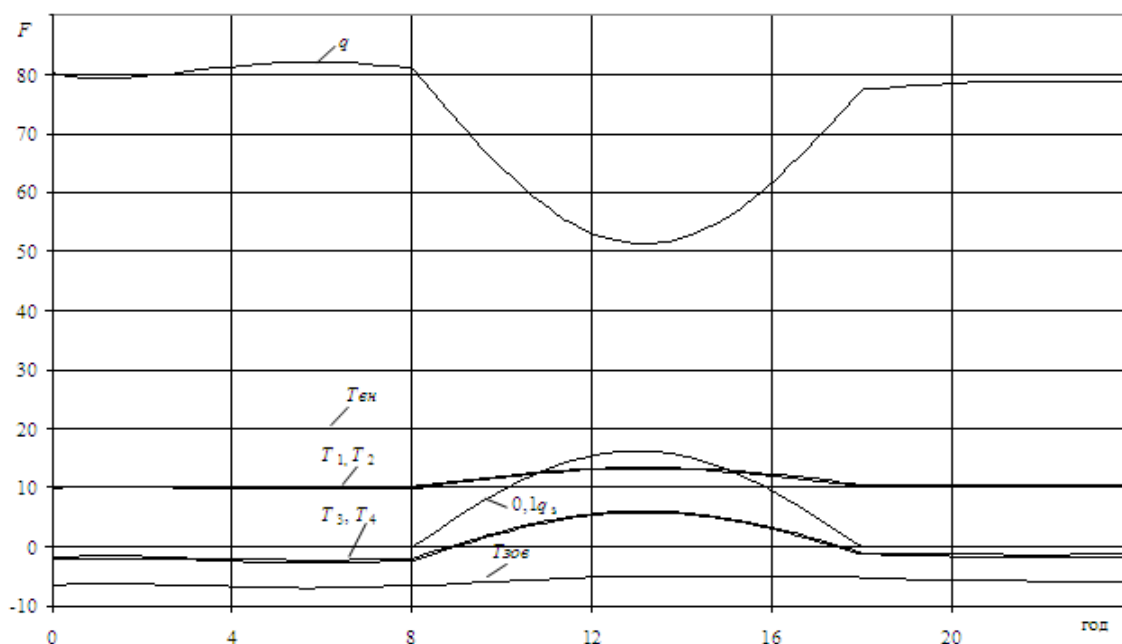


Рис. 3.1.2 (а). Зміна теплових характеристик однокамерного склопакету в середині зими на південній орієнтації фасаду. б) північної орієнтації.

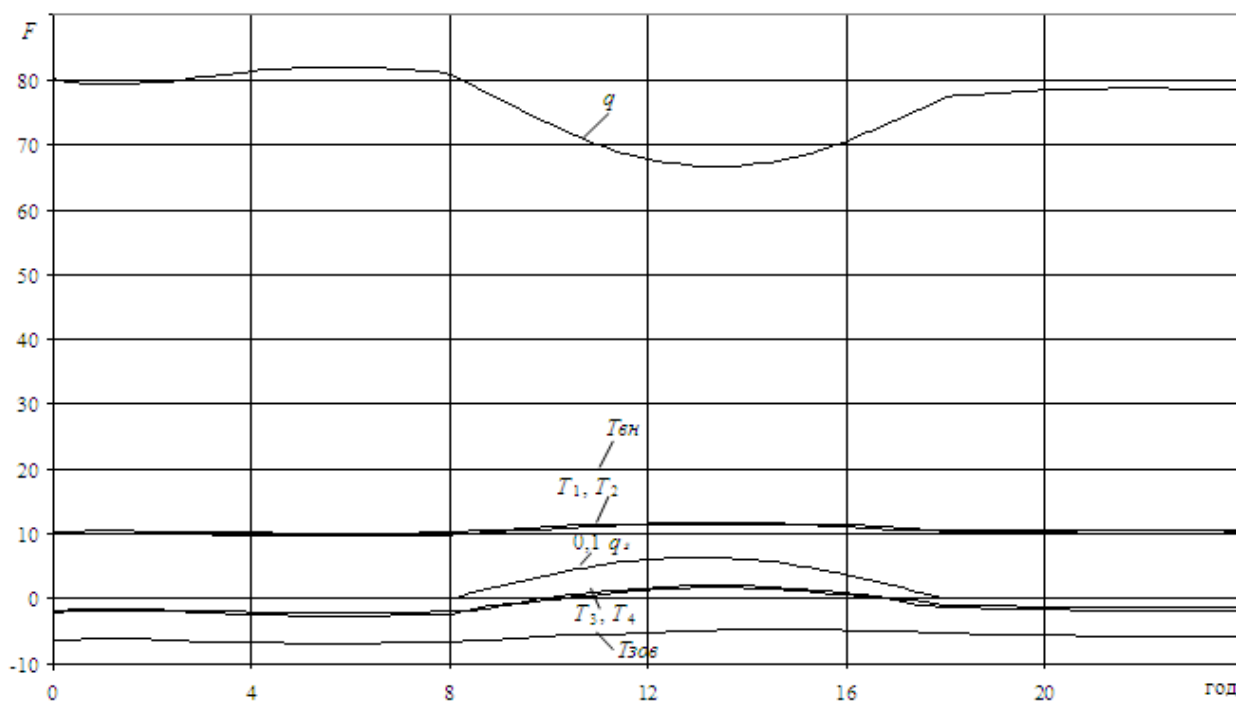


Рис. 3.1.2 (б). Зміна теплових характеристик однокамерного склопакету в середині зими на північній орієнтації фасаду.

Нижче приведені результати розрахунку щогодинної зміни теплових характеристик для двокамерного склопакету при південній (рис. 3.1.3. - 3.1.6) і північній (рис. 3.1.7 – 3.1.10) його орієнтаціях, для середини кожної з пори року (15, 105, 196, 289 доби). З трьох основних кліматичних факторів - температури зовнішнього повітря, швидкості вітру, сонячної радіації - найбільш впливовим виявився останній фактор. Чітко видно на приведених рисунках, що починаючи зі сходу Сонця, незалежно від пори року, різко змінюється поведінка всіх характеристик протягом усього світлового дня. Особливо виражено цей вплив позначається на густині теплового потоку на внутрішній і зовнішній поверхнях вікна. Що стосується температур  $T_i, (i = 1, 2, \dots, 6)$ , то їх значення попарно близькі. На рис. 3.1.10 - 3.1.13 наведені аналогічні дані, але при умові ігнорування тепловою дією сонця ( $q_s = 0$ ). У всіх випадках температури на обох поверхнях стекол практично співпадають. Чітко проявляється дія сонячної радіації, що призводить до різкого зменшення тепловтрат в холодний період року (рис. 3.1.2, 3.1.3, 3.1.4, 3.1.5) і навіть до нагріву приміщення, коли  $q(t) < 0$  (рис. 3.1.6, 3.1.7, 3.1.8, 3.1.9). В останньому випадку температура стекол перевищує температуру приміщення. Зміна напрямку  $q$ , призводить до інверсії температур стекол склопакету (рис. 3.1.6, 3.1.7, 3.1.8, 3.1.9).

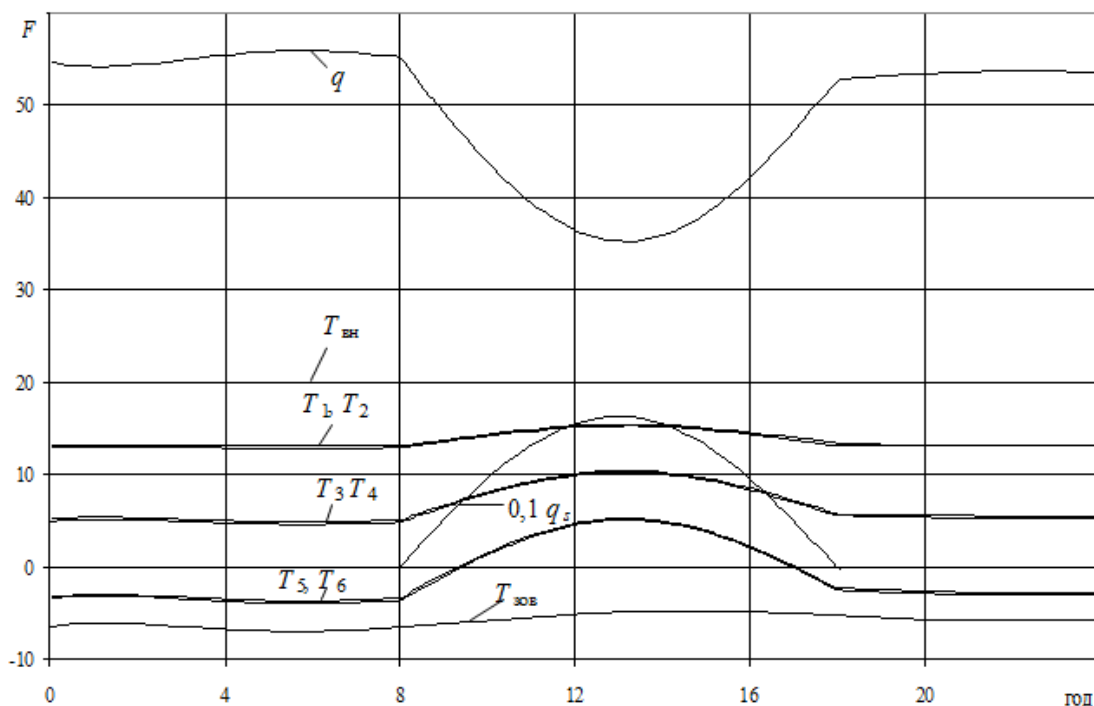




Рис. 3.1.3. Розподіл характеристик  $F = T_{\text{вн}}, T_{\text{зов}}, T_i, 0.1q_s, q$  впродовж 15-ї доби року (середина зими) для двокамерного склопакету на південній орієнтації фасаду.

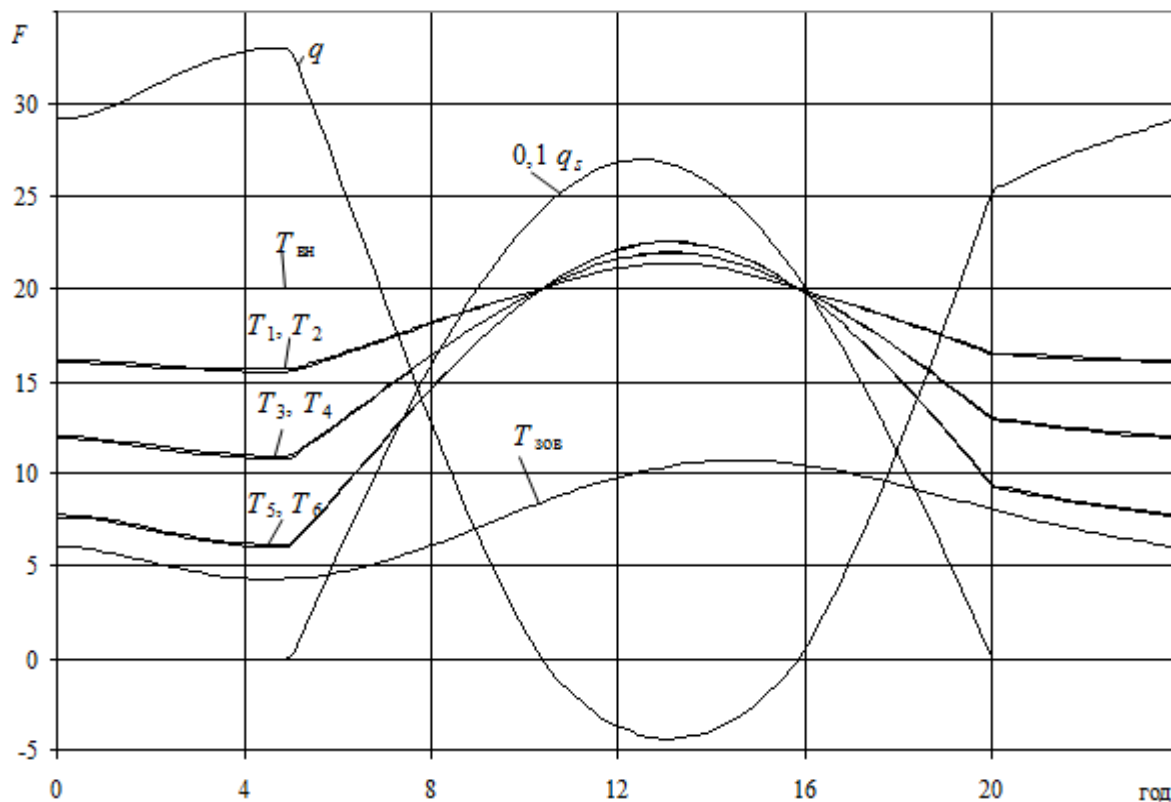


Рис. 3.1.4. Розподіл характеристик  $F = T_{\text{вн}}, T_{\text{зов}}, T_i, 0.1q_s, q$  впродовж 105-ї доби року (середини весни, 15 квітня) для двокамерного склопакету на південній орієнтації фасаду.

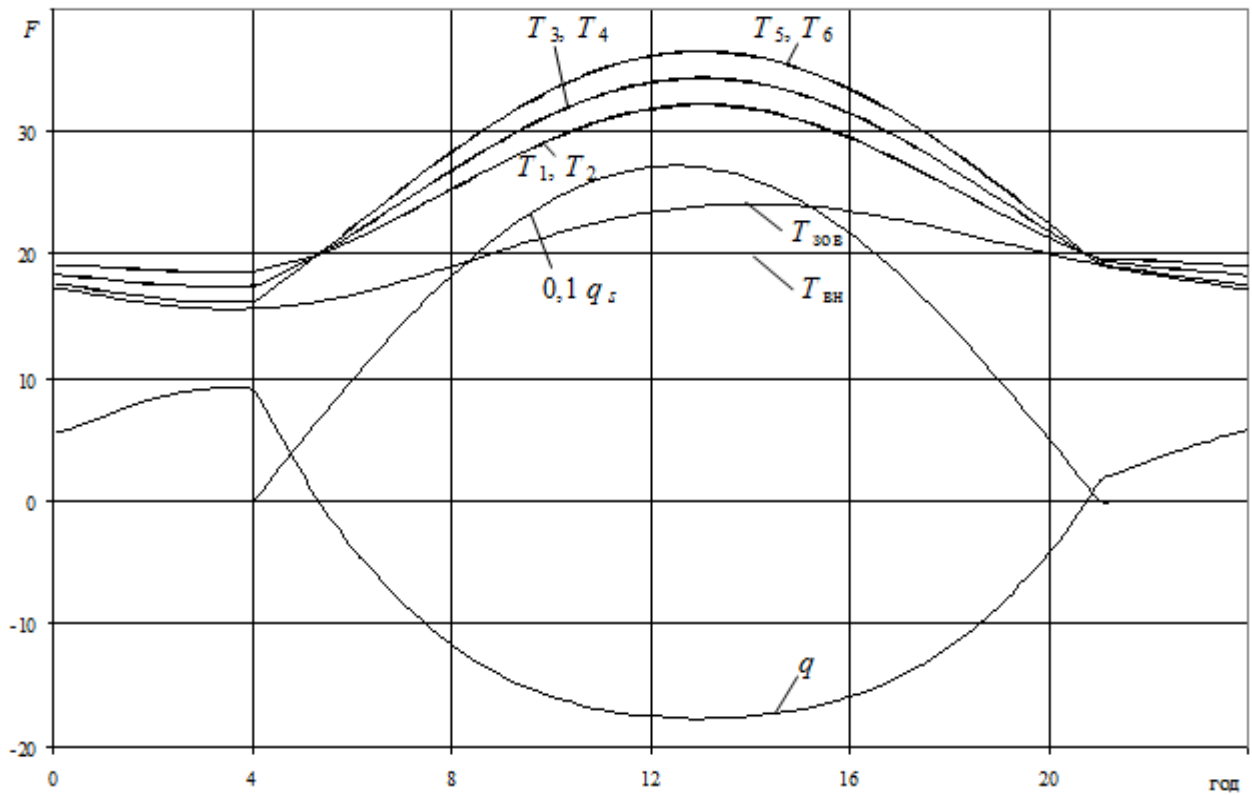


Рис. 3.1.5. Розподіл характеристик  $F = T_{\text{вн}}, T_{\text{зов}}, T_i, 0,1q_s, q$  впродовж 196-ї доби року (середини літа, 15 липня) для двокамерного склопакету на південній орієнтації фасаду.

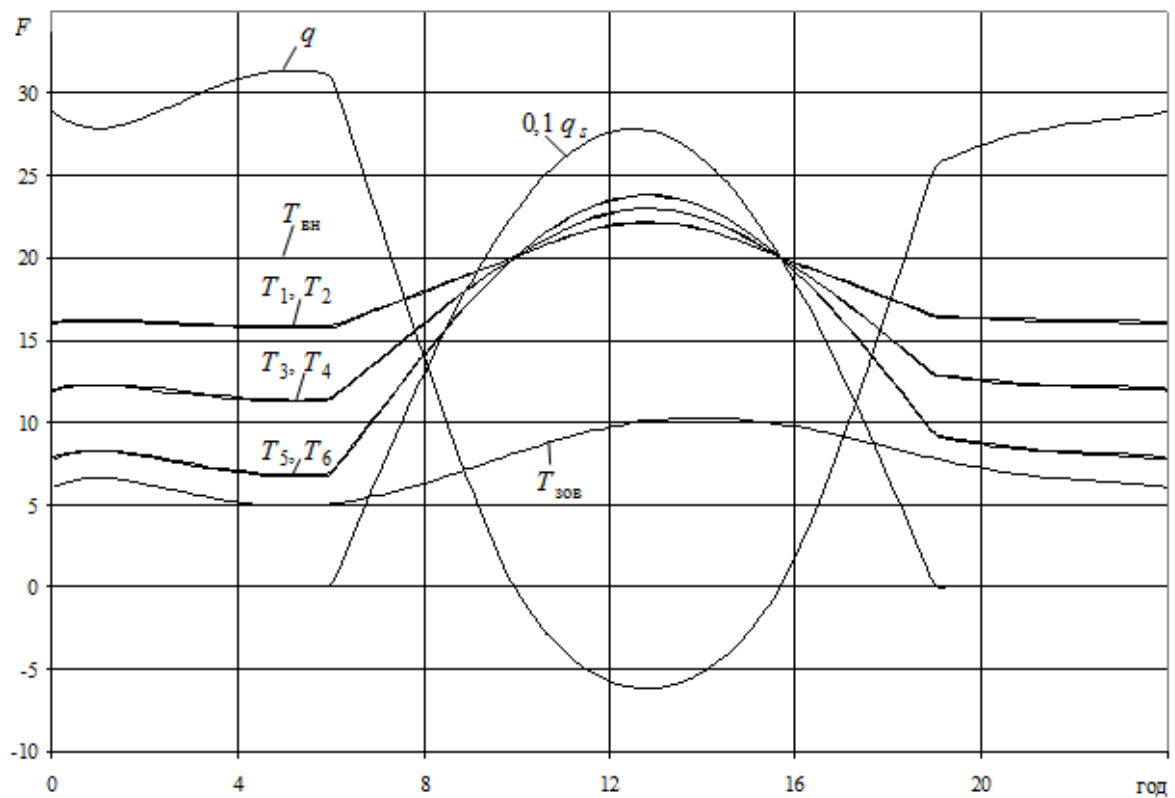


Рис. 3.1.6. Розподіл характеристик  $F = T_{\text{вн}}, T_{\text{зов}}, T_i, 0.1q_s, q$  впродовж 289-ї доби року (середини осені, 15 жовтня) для двокамерного склопакету на південній орієнтації фасаду.

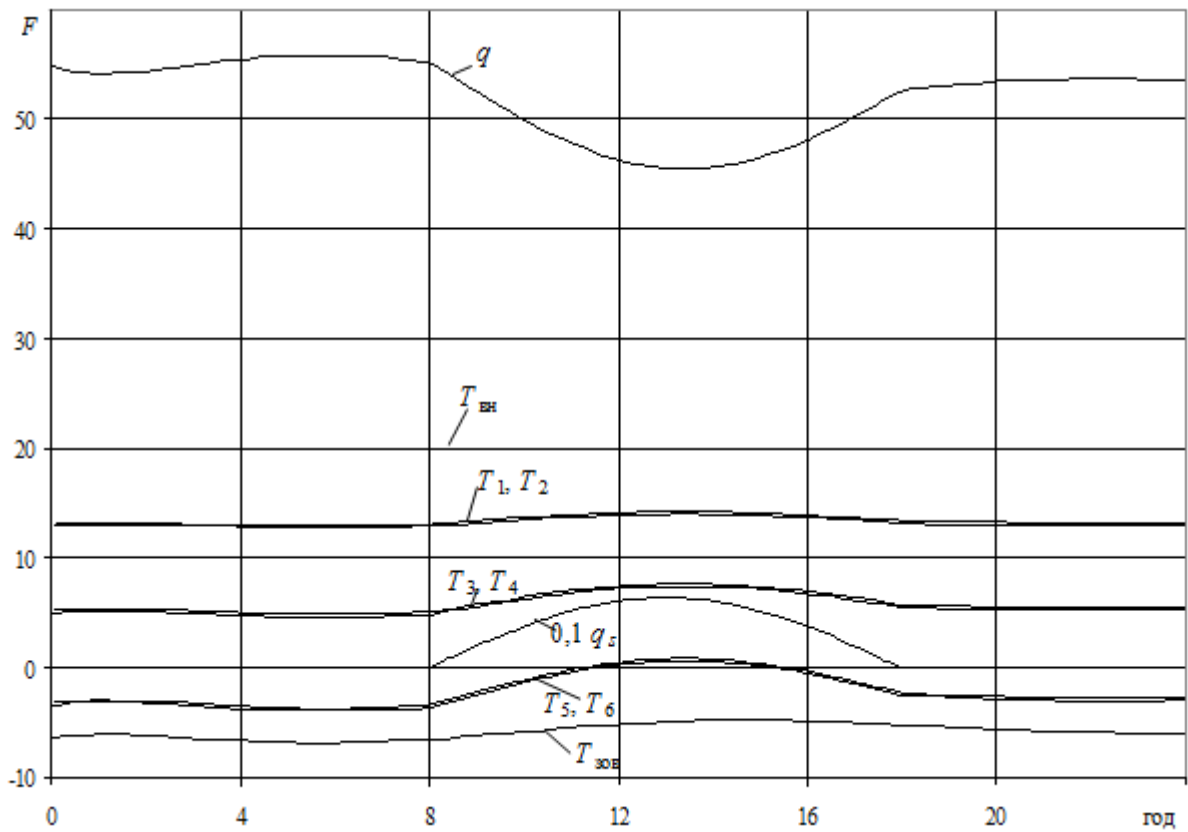


Рис. 3.1.7. Розподіл характеристик  $F = T_{\text{вн}}, T_{\text{зов}}, T_i, 0.1q_s, q$  впродовж 15-ї доби року (середина зими) для двокамерного склопакету на північній орієнтації фасаду.

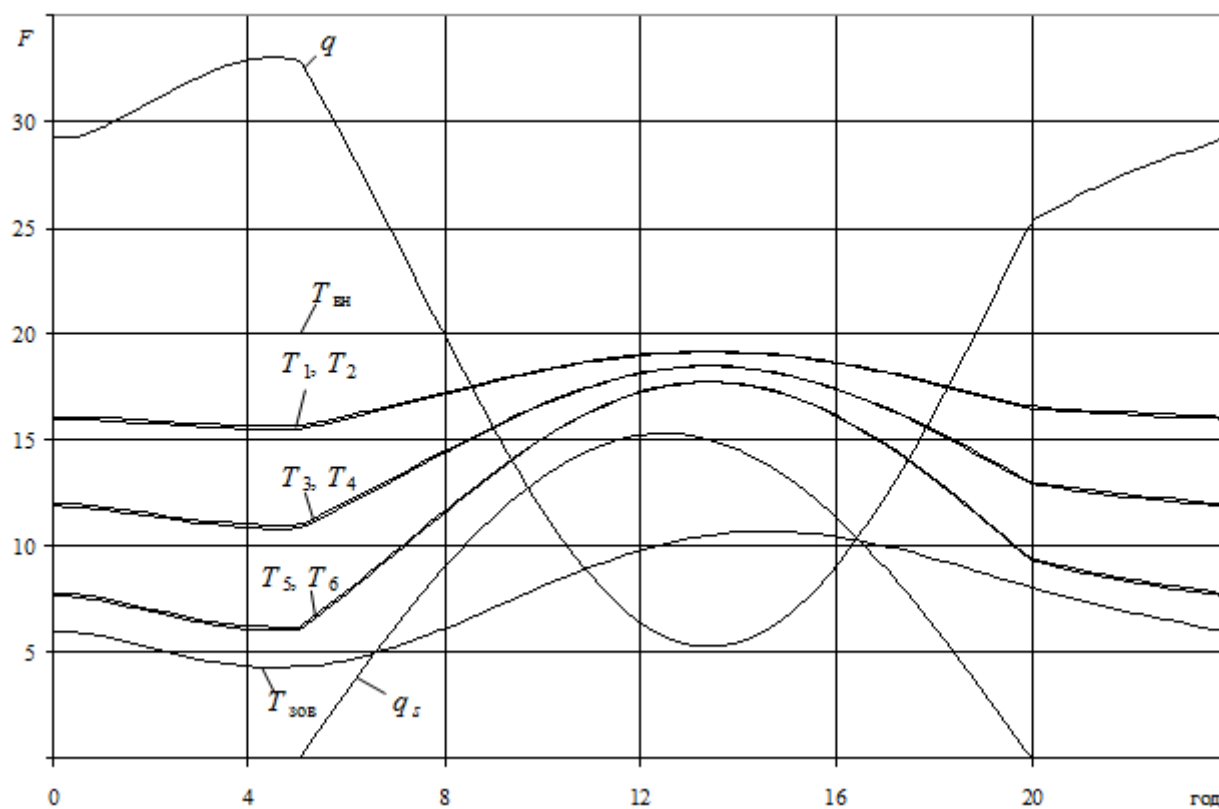


Рис. 3.1.8. Розподіл характеристик  $F = T_{вн}, T_{зов}, T_i, 0.1q_s, q$  впродовж 105-ї доби (середина весни) року для двокамерного склопакету на північній орієнтації фасаду.

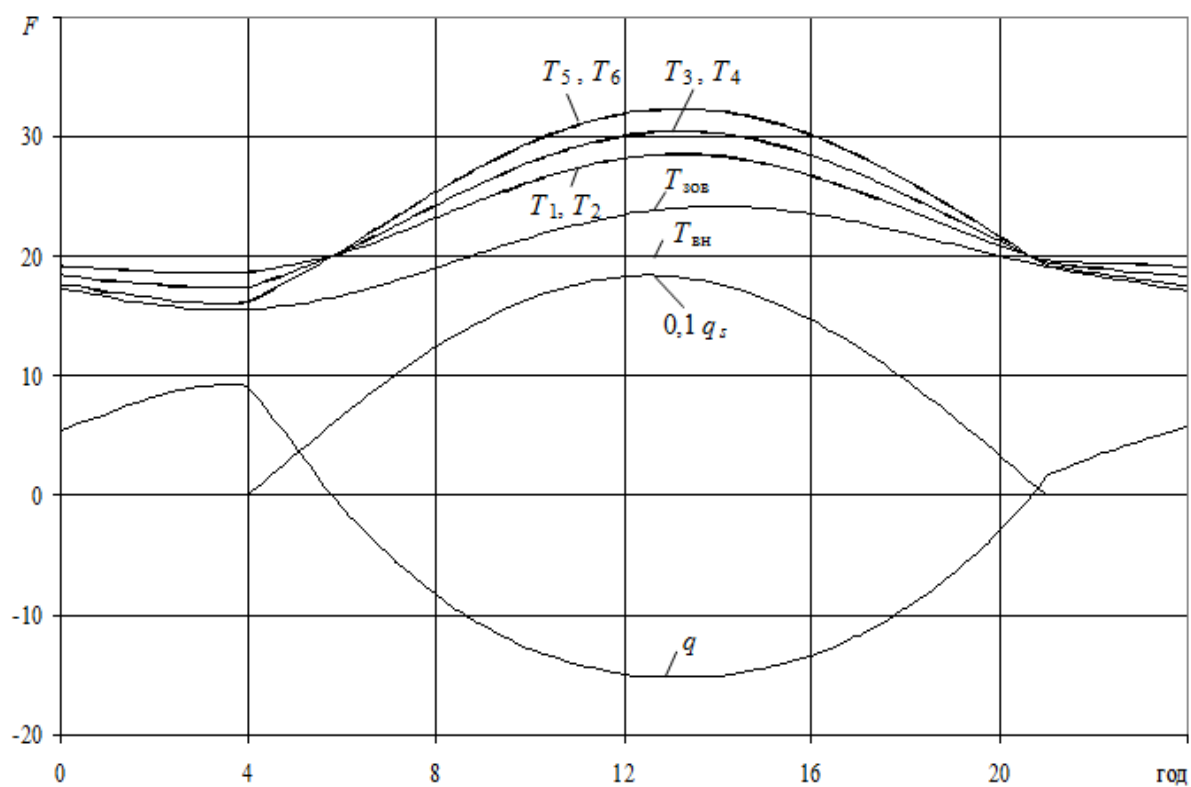


Рис. 3.1.9. Розподіл характеристик  $F = T_{\text{вн}}, T_{\text{зов}}, T_i, 0.1q_s, q$  впродовж 196-ї доби (середина літа) року для двокамерного склопакету на північній орієнтації фасаду.

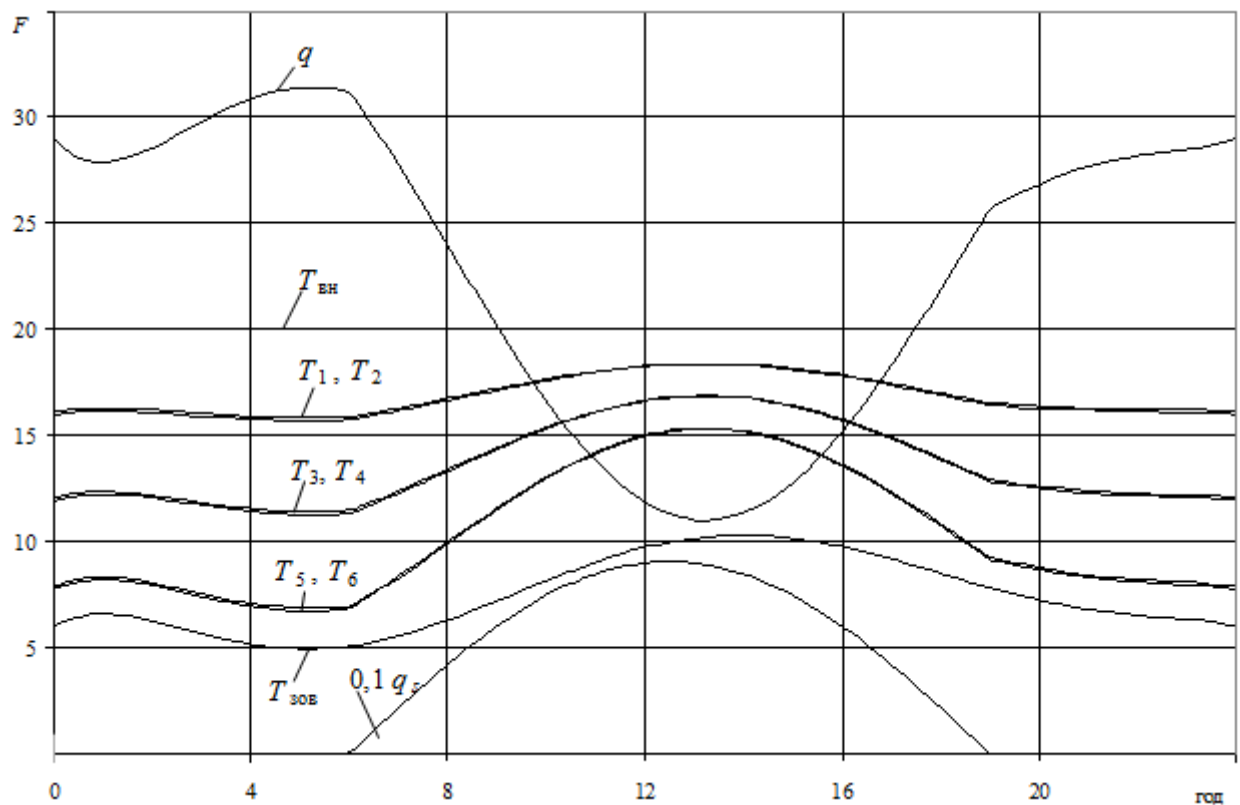


Рис. 3.1.10. Розподіл характеристик  $F = T_{\text{вн}}, T_{\text{зов}}, T_i, 0.1q_s, q$  впродовж 289-ї доби року (середина осені) для двокамерного склопакету на північній орієнтації фасаду.

Якщо не враховувати дію Сонця (рис. 3.1.11 – 3.1.14), то зміна теплових параметрів впродовж доби стає більш рівномірною, відображаючи дію тільки зміни температури і швидкості руху зовнішнього повітря.

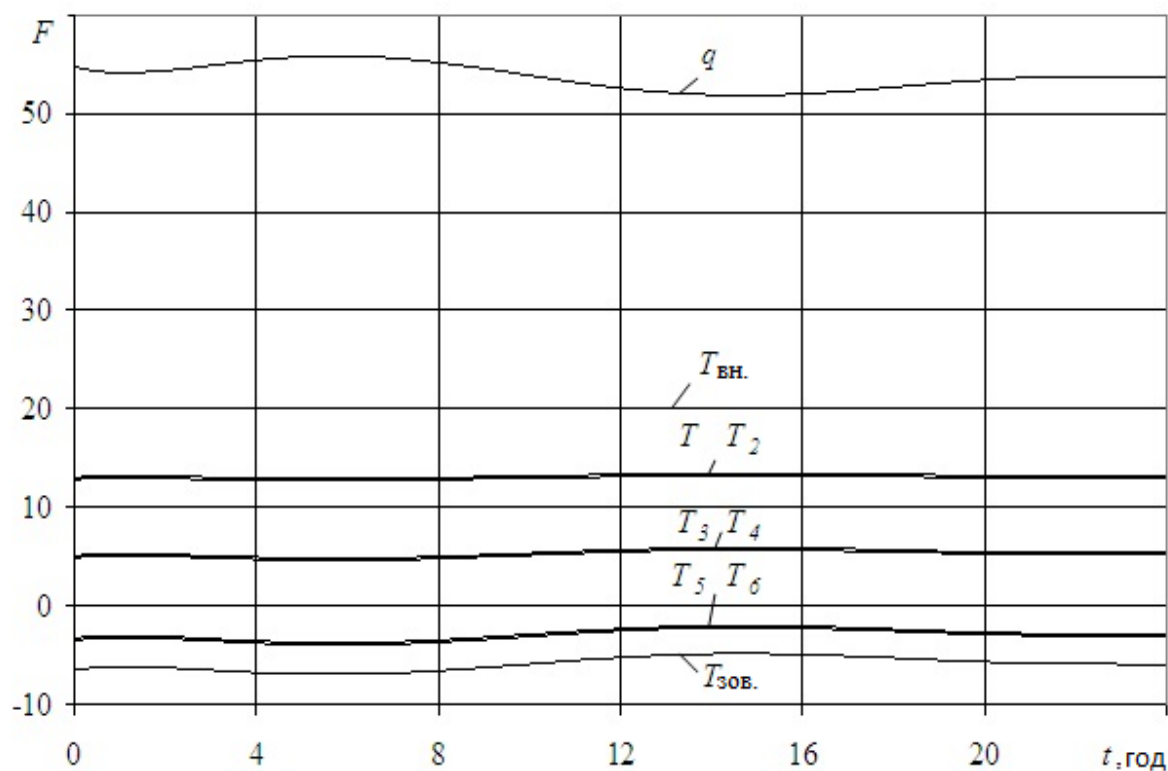


Рис. 3.1.11. Розподіл характеристик  $F = T_{\text{вн}}, T_{\text{зов}}, T_i, q$  впродовж 15-ї доби року для двокамерного склопакету без врахування дії сонячної радіації.

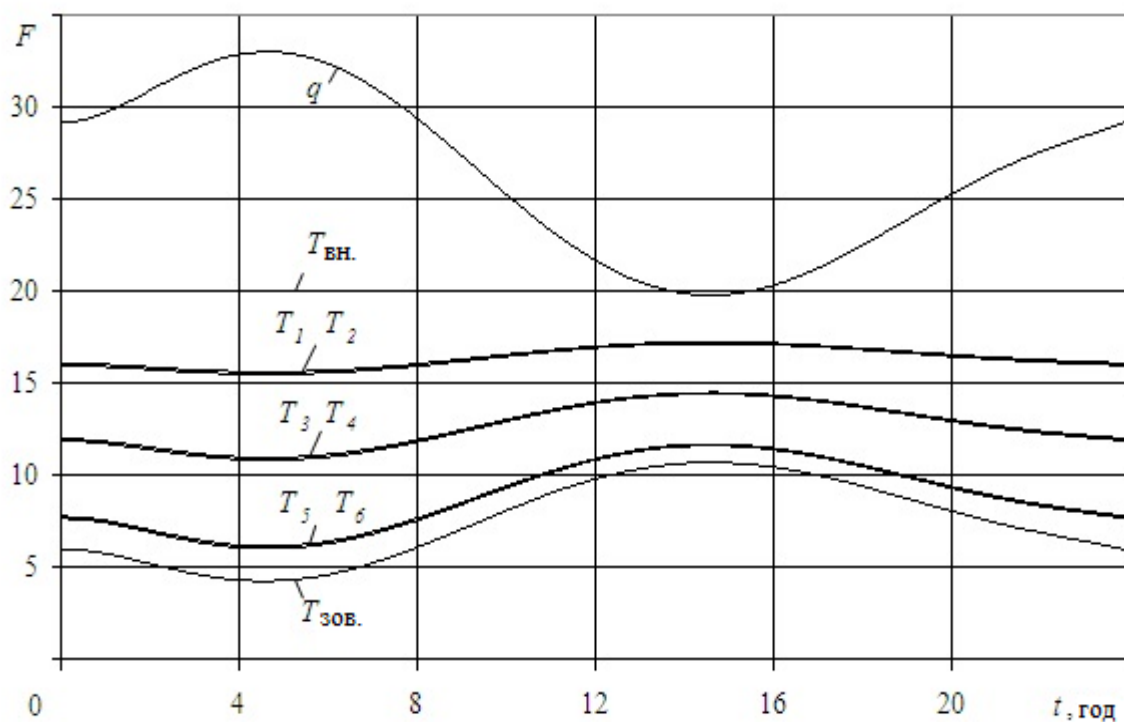


Рис. 3.1.12. Розподіл характеристик  $F = T_{\text{вн}}, T_{\text{зов}}, T_i, q$  впродовж 105-ї доби року для двокамерного склопакету без врахування дії сонячної радіації.

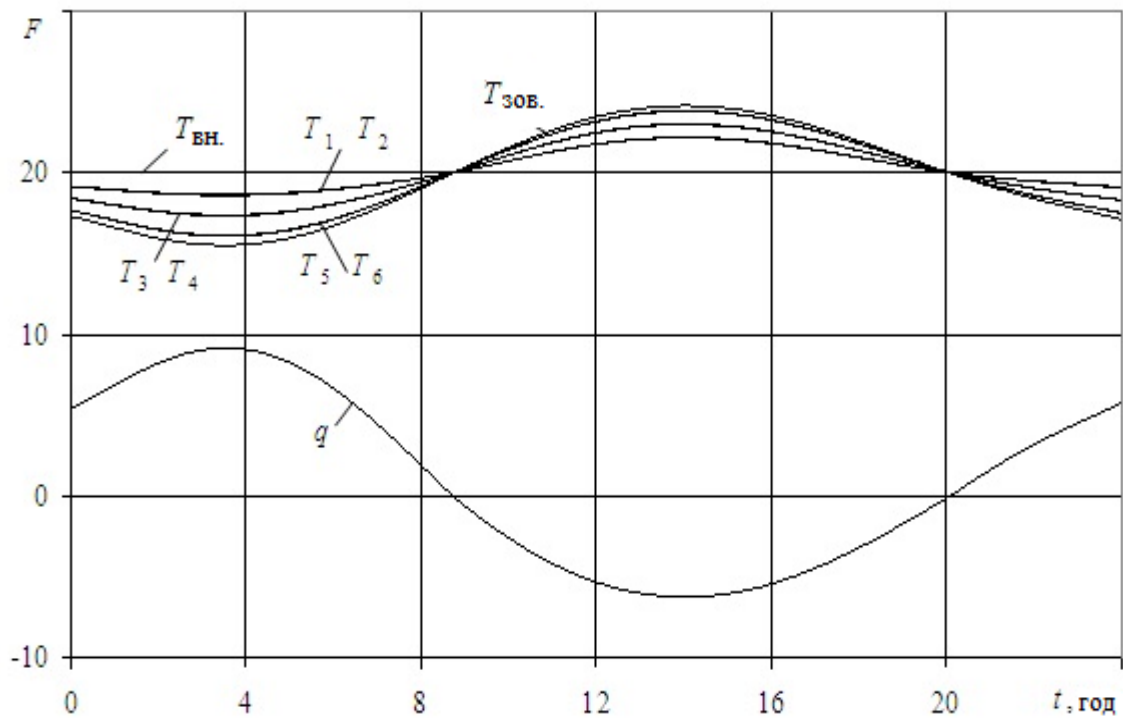


Рис. 3.1.13. Розподіл характеристик  $F = T_{\text{вн}}, T_{\text{зов}}, T_i, q$  впродовж 196-ї доби року для двокамерного склопакету без врахування дії сонячної радіації.

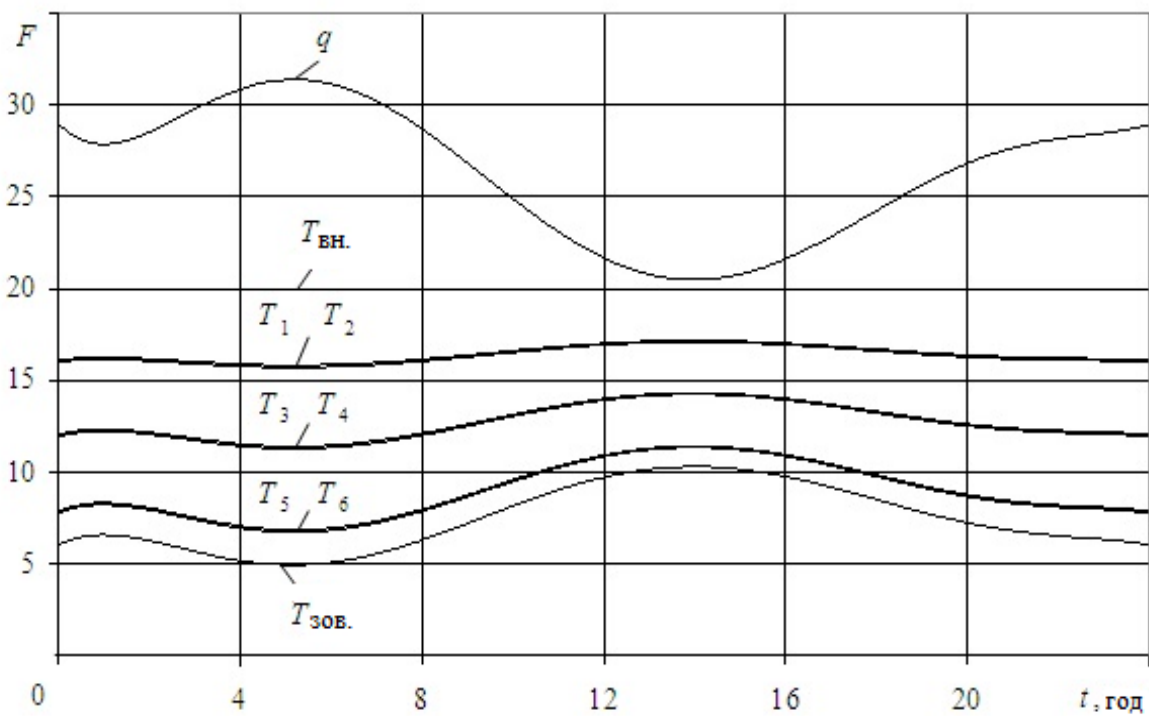


Рис. 3.1.14. Розподіл характеристик  $F = T_{\text{вн}}, T_{\text{зов}}, T_i, q$  впродовж 289-ї доби року для двокамерного склопакету без врахування дії сонячної радіації.

За цією методикою виконано розрахунок і для трикамерного склопакету. На рис. 3.1.15 – 3.1.22 показано теплові характеристики встановленого трикамерного склопакету на південній та північній орієнтації фасаду.

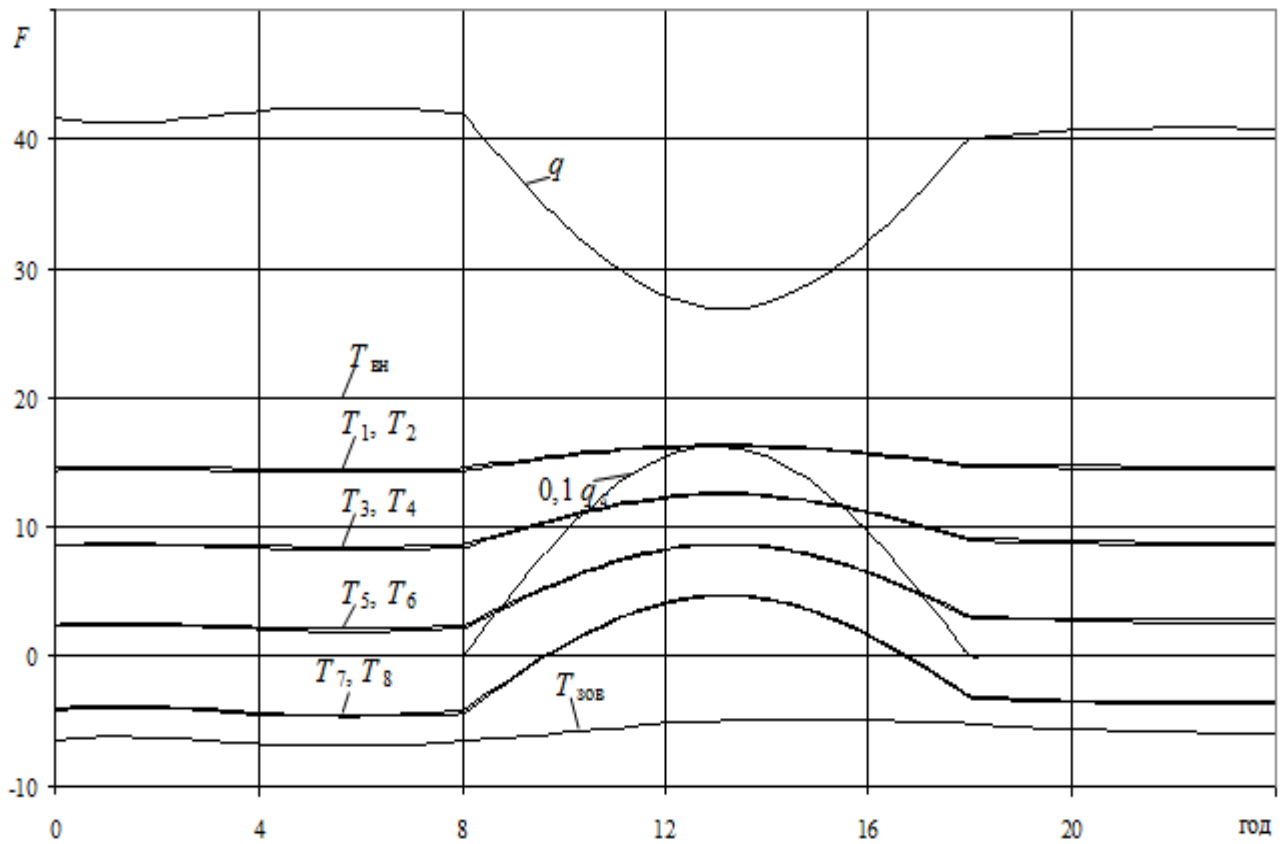


Рис. 3.1.15. Розподіл характеристик  $F = T_{\text{вн}}, T_{\text{зов}}, T_i, 0.1q_s, q$  впродовж 15-ї доби року для трикамерного склопакету на південній орієнтації фасаду.



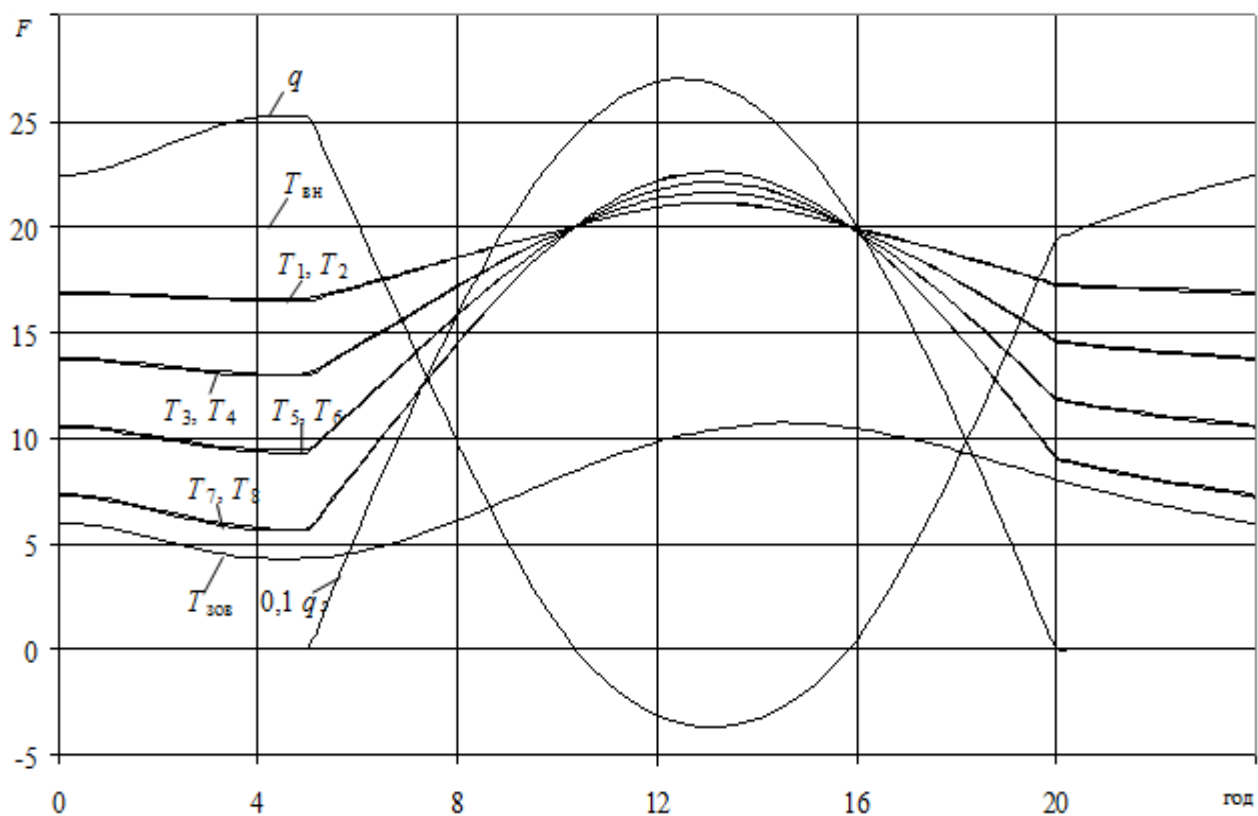


Рис. 3.1.16. Розподіл характеристик  $F = T_{\text{вн}}, T_{\text{зов}}, T_i, 0,1q_s, q$  впродовж 105-ї доби року для трикамерного склопакету на південній орієнтації фасаду.

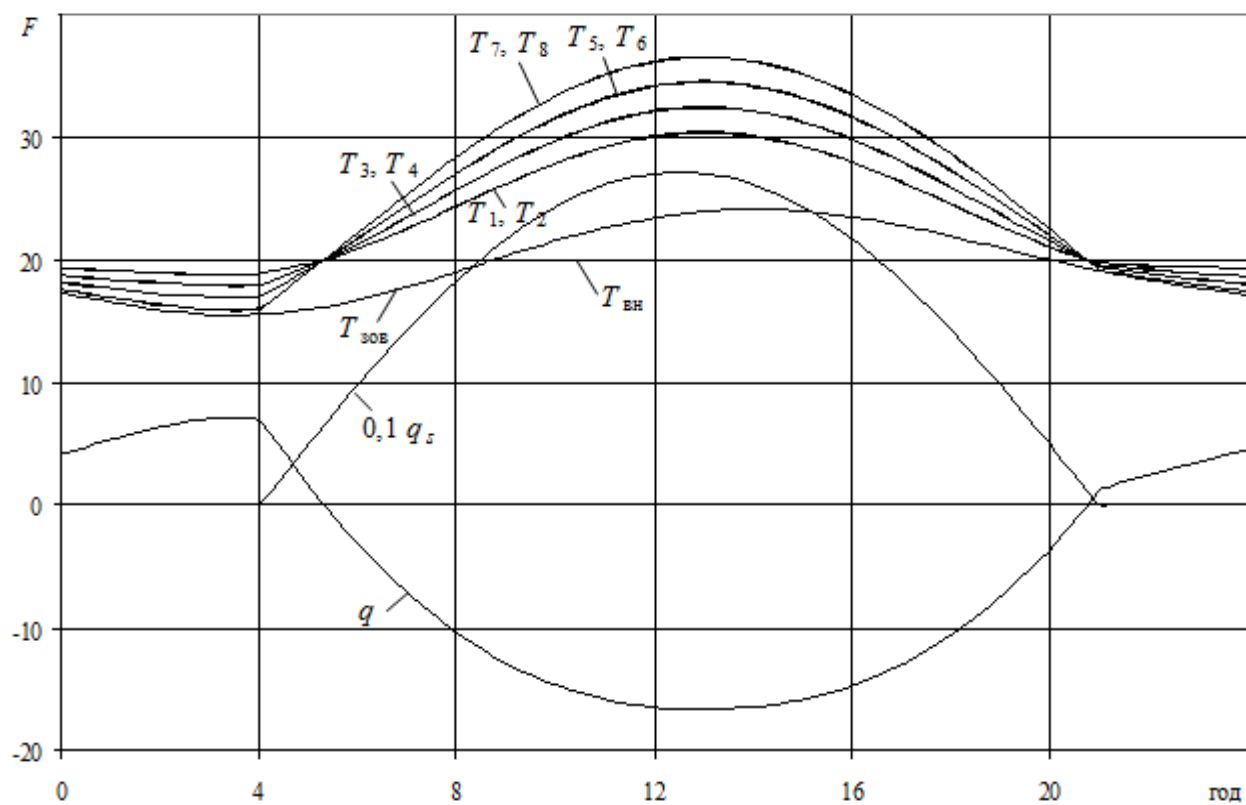


Рис. 3.1.17. Розподіл характеристик  $F = T_{\text{вн}}, T_{\text{зов}}, T_i, 0.1q_s, q$  впродовж 196-ї доби року для трикамерного склопакету на південній орієнтації фасаду.

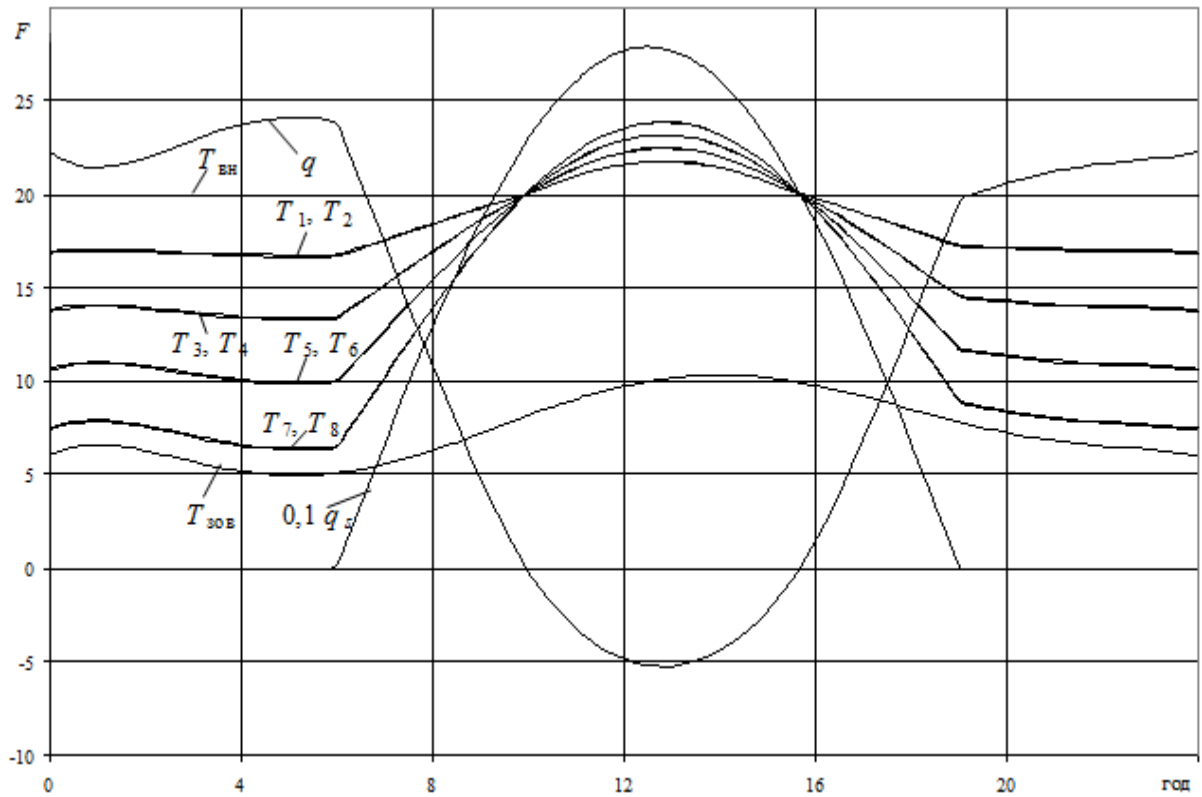


Рис. 3.1.18. Розподіл характеристик  $F = T_{\text{вн}}, T_{\text{зов}}, T_i, 0.1q_s, q$  впродовж 289-ї доби року для трикамерного склопакету на південній орієнтації фасаду.

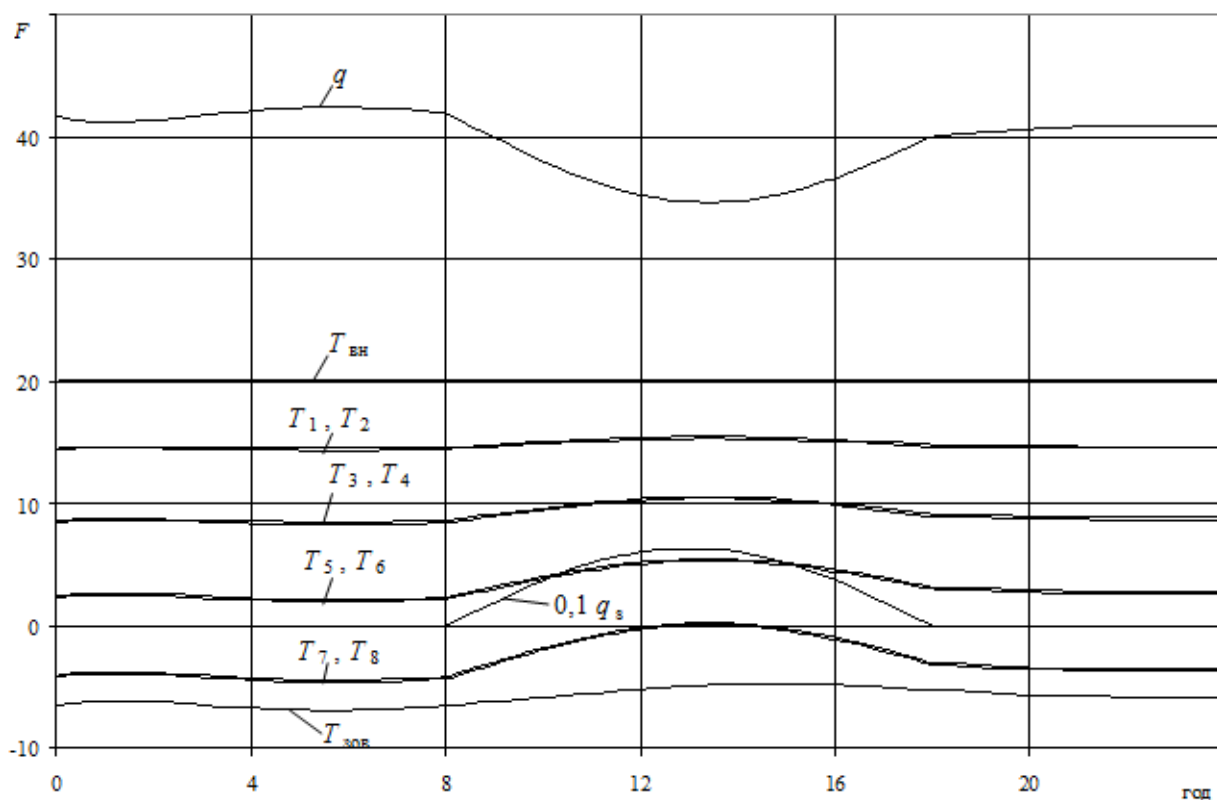


Рис. 3.1.19. Розподіл характеристик  $F = T_{\text{вн}}, T_{\text{зов}}, T_i, 0.1q_s, q$  впродовж 15-ї доби року для трикамерного склопакету на північній орієнтації фасаду.

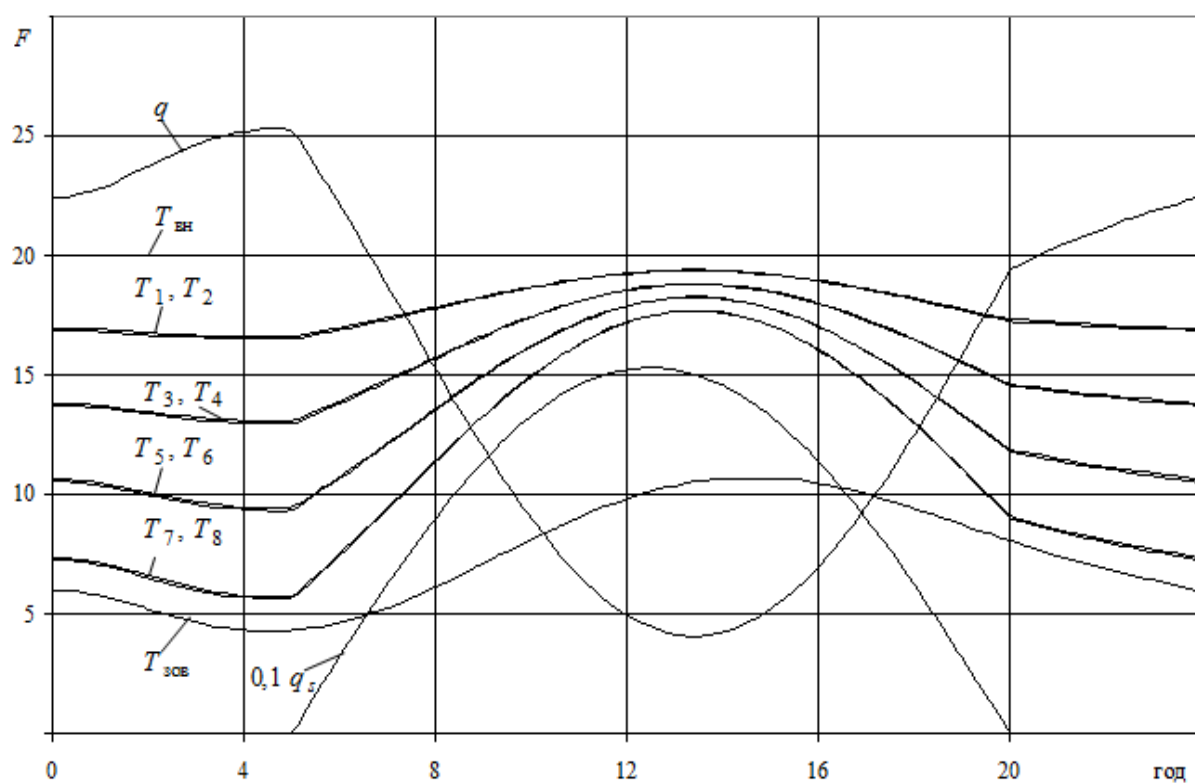


Рис. 3.1.20. Розподіл характеристик  $F = T_{\text{вн}}, T_{\text{зов}}, T_i, 0.1q_s, q$  впродовж 105-ї доби року для трикамерного склопакету на північній орієнтації фасаду.

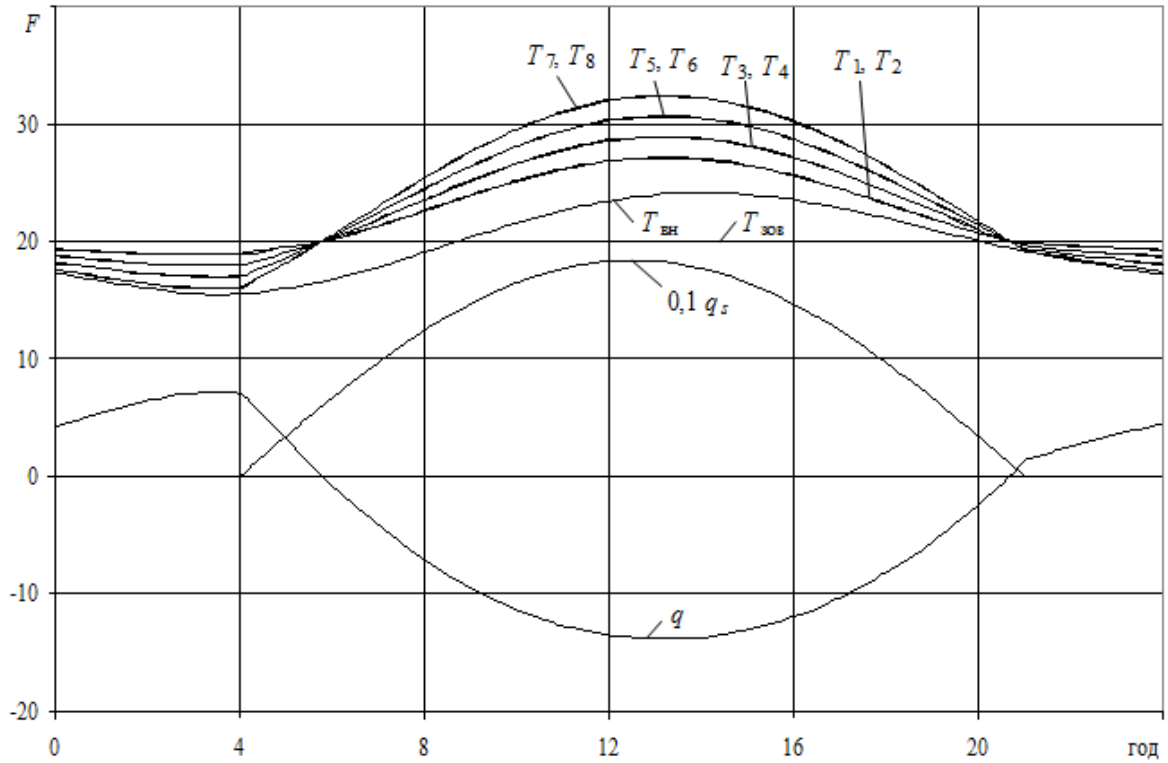


Рис. 3.1.21. Розподіл характеристик  $F = T_{\text{вн}}, T_{\text{зов}}, T_i, 0.1q_s, q$  впродовж 196-ї доби року для трикамерного склопакету на північній орієнтації фасаду.

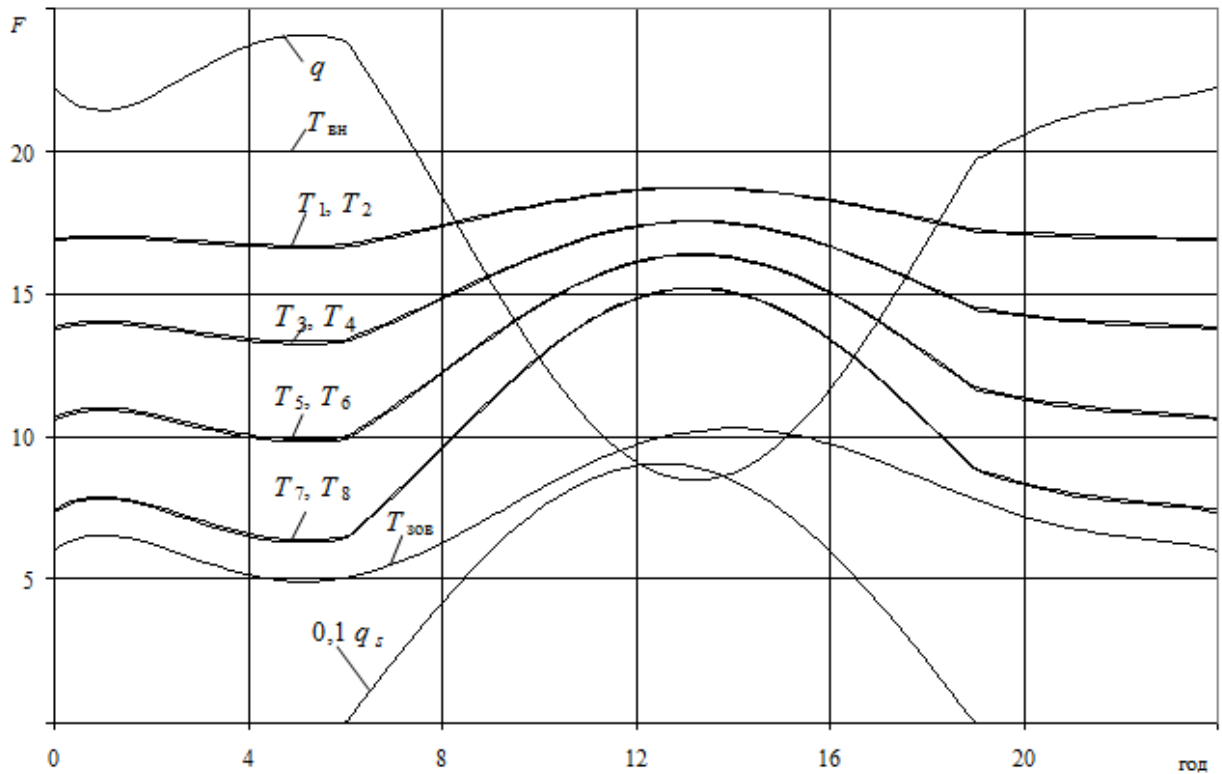


Рис. 3.1.22. Розподіл характеристик  $F = T_{\text{вн}}, T_{\text{зов}}, T_i, 0.1q_s, q$  впродовж 289-ї доби року для трикамерного склопакету на північній орієнтації фасаду.

Дуже інформативними є поточні  $e$  і річні  $e^*$  інтегральні питомі енергетичні показники тепловтрат для всіх типів склопакетів при південній (рис. 3.1.23) і північній (рис. 3.1.24) їх орієнтації. Представлені подібні розрахунки і без врахування сонячного теплового впливу (рис. 3.1.25), що на відміну від зовнішніх цегляних (або цегляно-бетонних) огорожень, великої різниці в тепловтратах через склопакети різної просторової орієнтації не спостерігається. Це обумовлено малою теплоємністю склопакетів в порівнянні з масивними огороженнями. Однак, тепловий вплив Сонця значний. Кількісно його можна оцінити підрахунками по формулі 3.1.12:

$$\frac{e_{\text{б/с}}^*}{(e_{\text{пд}}^* + e_{\text{пш}}^*)/2} = \begin{cases} 1,24 & \text{при } n = 1 \\ 1,28 & \text{при } n = 2 \\ 1,30 & \text{при } n = 3. \end{cases} \quad (3.1.12)$$

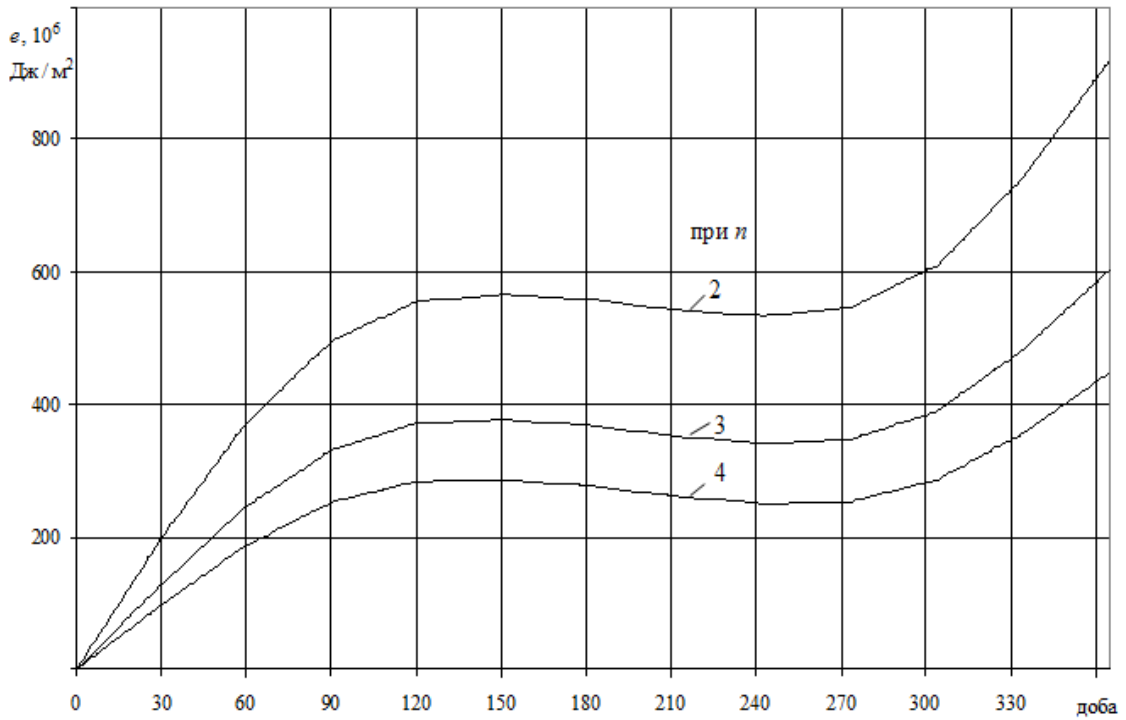


Рис. 3.1.23. Інтегральні енергетичні характеристики  $n$ -камерних склопакетів, розміщених на південній орієнтації.

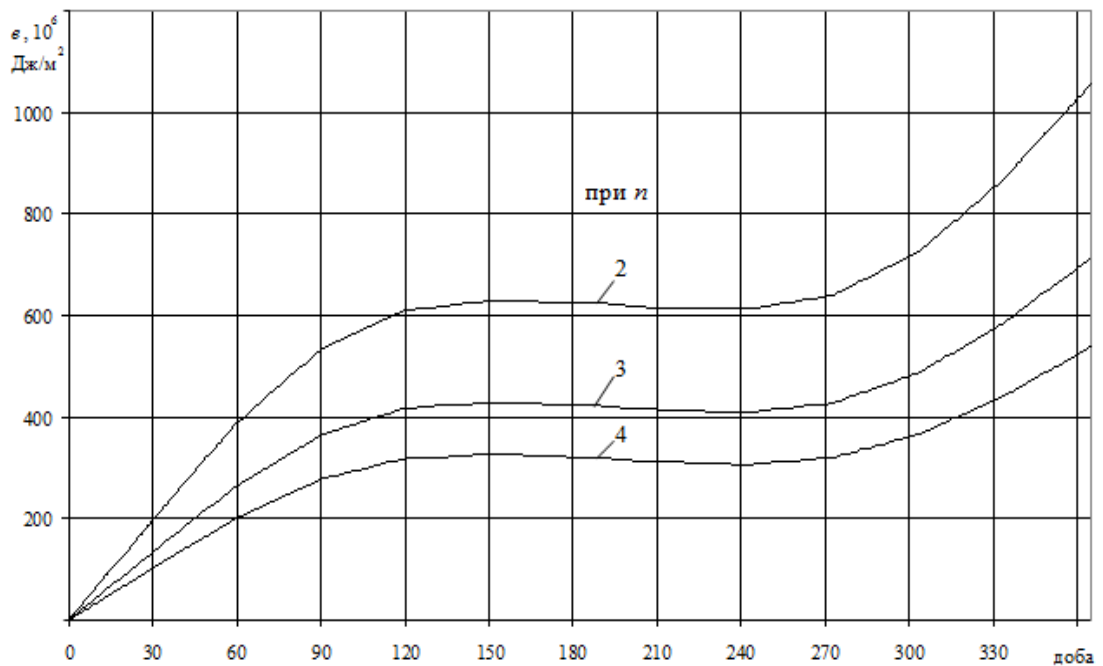


Рис. 3.1.24. Інтегральні енергетичні характеристики  $n$ -камерних склопакетів, розміщених на північній орієнтації.

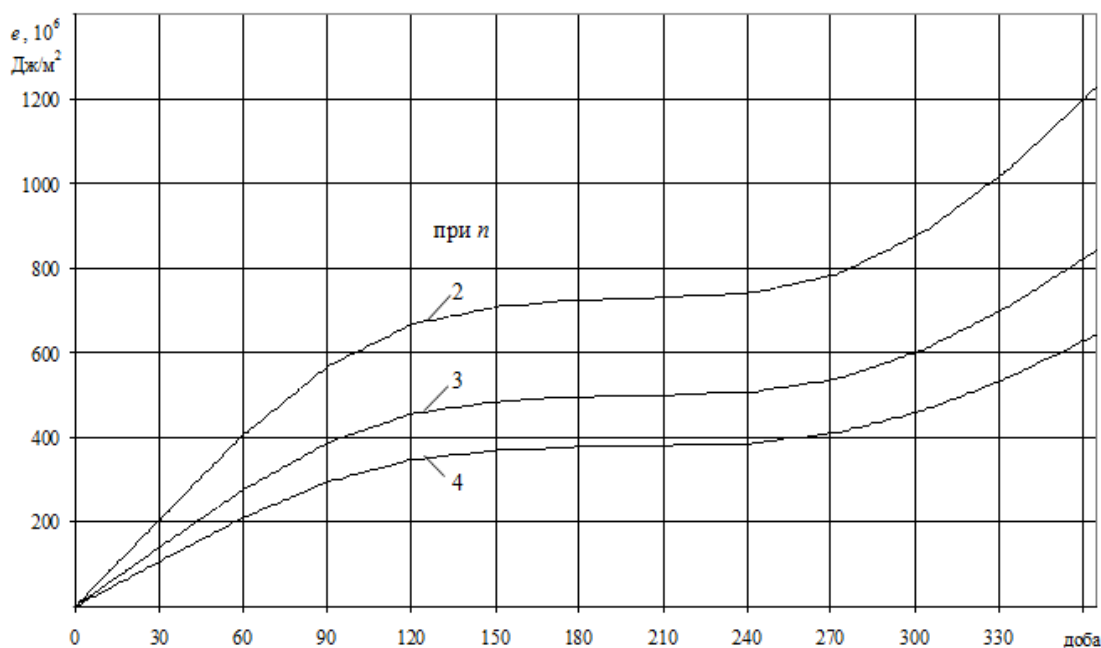


Рис. 3.1.25. Інтегральні енергетичні характеристики  $n$ -камерних склопакетів без врахування дії сонячної радіації.

Розрахункові дані показали, що із збільшенням числа камер склопакетів, їх теплова ефективність знижується (рис. 3.1.23 - 3.1.25). Тому досить обмежитися не більше, ніж двокамерним варіантом.

Проаналізувавши проведені розрахунки можна стверджувати, що теплова дія Сонця істотно впливає на тепловтрати через віконні склопакети і її необхідно враховувати. Встановлено, що тепловтрати через трикамерний склопакет менші, але всього на 3 - 5%, ніж через двокамерний склопакет. Порівняльний енергетичний аналіз для одно-, дво- та трикамерних склопакетів показав, що із збільшенням числа камер склопакета теплова ефективність подальших камер знижується, тобто оптимальним варіантом є встановлення двокамерного склопакету.

### 3.2. Числове моделювання теплопередачі через одно- та двокамерні склопакети. Двовимірна задача.

Для детального встановлення характеристик теплопередачі через двокамерний склопакет, а також встановлення ефектів, що впливають на

збільшення опору теплопередачі, проводилися його чисельні дослідження в двовимірній моделі [30, 43, 71].

Задача теплопереносу через двокамерний склопакет висотою  $H$ , шириною  $L$  та товщиною  $B$  розглядається в стаціонарній двовимірній постановці. Схема розрахункової області представлена на рис. 3.2.1.

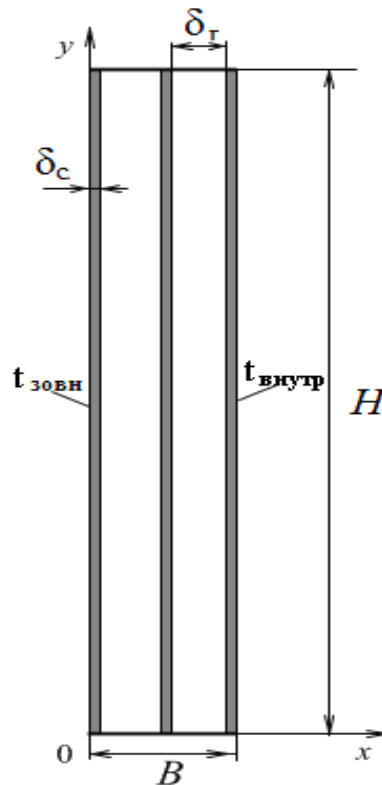


Рис. 3.2.1. Схема розрахункової області.

Вільноконвективна течія газового середовища в камерах склопакета вважається ламінарною і описується системою рівнянь Нав'є – Стокса:

$$\frac{\partial(\rho_r u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_r v)}{\partial y} = 0; \quad (3.2.1)$$

$$\frac{\partial(\rho_r v u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_r v^2)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2\mu}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) - \rho_r g; \quad (3.2.2)$$

$$\frac{\partial(\rho_r u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_r u v)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2\mu}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right). \quad (3.2.3)$$

Конвективний теплоперенос в газовому середовищі описується рівнянням енергії:



$$\frac{\partial(C_{p,r}\rho_r uT)}{\partial x} + \frac{\partial(C_{p,r}\rho_r vT)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_r \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_r \frac{\partial T}{\partial y} \right); \quad (3.2.4)$$

а в склі – рівнянням теплопровідності:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_c \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_c \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0. \quad (3.2.5)$$

Система рівнянь (3.2.1) - (3.2.5) доповнюється рівнянням стану газового середовища:

$$\rho_r = \rho_r(p, T). \quad (3.2.6)$$

Систему рівнянь (3.2.1) - (3.2.5) складено в системі координат, в якій горизонтальна вісь  $OX$  спрямована від зовнішньої поверхні склопакета ( $x = 0$ ) у бік приміщення, а вісь  $OY$  спрямована вертикально вгору. Значення  $y = 0$  відповідає нижньому краю склопакета. У розглянутій задачі вплив дистанційних рамок, а також теплоперенос через торці склопакета не враховуються. Теплофізичні властивості скла приймаються постійними, а теплопровідність і в'язкість газового середовища вважаються залежними від температури по лінійному закону. Рішення поставленої задачі виконується при заданих значеннях температури на зовнішній поверхні зовнішнього скла  $t_{зовн}$  і на зовнішній поверхні внутрішнього скла  $t_{внутр}$ .

Граничні умови записуються в вигляді:

$$x = 0: T = t_{зовн}; \quad x = B: T = t_{внутр}; \quad (t_{внутр} > t_{зовн}); \quad (3.2.7)$$

$$y = 0; \quad H: \frac{\partial T}{\partial y} = 0. \quad (3.2.8)$$

На поверхнях скла, що звернуті всередину склопакета, задаються умови четверного роду, що враховують наявність променевих теплових потоків між поверхнями скла:

$$-\lambda_c \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_{II}-0} = -\lambda_r \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_{II}+0} - q_{r,II}; \quad (3.2.9)$$

$$-\lambda_r \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_{II}-0} - q_{r,II} = -\lambda_c \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_{II}+0}, \quad (3.2.10)$$

де  $q_{r,l}$  – густина променевого теплового потоку, що падає на внутрішню поверхню лівої (більш холодної) поверхні газового прошарку між склом;  
 $q_{r,n}$  – густина променевого теплового потоку на правій (більш нагрітої) поверхні газового прошарку.

Для чисельного розв'язання системи рівнянь (3.2.1) - (3.2.6) з граничними умовами (3.2.7) - (3.2.10) використовується метод контрольного об'єму [72]. Для складання дискретних аналогів диференціальних рівнянь, що описують рух газового середовища і теплоперенос через склопакет, використовується рознесена прямокутна різницева сітка [72, 73]. Особливість такої сітки полягає в тому, що вузли, в яких задаються складові вектора швидкості, розташовуються на протилежних гранях контрольного об'єму, а вузли, що пов'язані з сітковим функціям, температури і густини – в центрі контрольного об'єму. Розрахункова сітка складена так, що області газових прошарків і області скла містять цілу кількість контрольних об'ємів. У зв'язку з цим, границя розділу середовищ (поверхня скла) проходить між вузлами, в яких задаються сіткові функції температури. Для визначення температури на поверхнях скла вводяться додаткові розрахункові вузли, номери яких мають дробові індекси. Дробові індекси означають, що розглянута величина відноситься до точки простору, що розташована між вузлами, в яких задаються основні сіткові функції. Кроки сітки з дробовими індексами розраховуються, як середнє арифметичне довжин двох сусідніх кроків. Для подальшого виключення з розрахункової схеми значень сіткових функцій температури з дробовими індексами використовуються умови спряження (3.2.9), (3.2.10), які в дискретній формі мають вигляд:

$$-\lambda_c \frac{T_{i,j_n+1/2} - T_{i,j_n}}{0,5\Delta x_{j_n}} = -\lambda_r \frac{T_{i,j_n+1} - T_{i,j_n+1/2}}{0,5\Delta x_{j_n+1}} - \frac{\varepsilon_{np} c_0}{\Delta y_i L} \sum_{i_1=1}^m F_{i,i_1} \left[ \left( \frac{T_{i,j_n-1/2}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{i,j_n+1/2}}{100} \right)^4 \right]; \quad (3.2.11)$$

$$-\lambda_r \frac{T_{i,j_n-1/2} - T_{i,j_n-1}}{0,5\Delta x_{j_n-1}} - \frac{\varepsilon_{np} c_0}{\Delta y_i L} \sum_{i_1=1}^m F_{i,i_1} \left[ \left( \frac{T_{i,j_n-1/2}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{i,j_n+1/2}}{100} \right)^4 \right] = -\lambda_c \frac{T_{i,j_n} - T_{i,j_n-1/2}}{0,5\Delta x_{j_n}}, \quad (3.2.12)$$

де  $T_{i,j}$  – сіткові функції температури, що пов'язані з вузлами сітки, розташованим в центрах контрольних об'ємів;  $F_{i,i_1}$  – площі взаємних поверхонь опромінення

елементів з номерами  $i$  та  $i_1$ , що розташовані на протилежних внутрішніх поверхнях скла, та розраховується за формулою:

$$F_{i,i_1} = \frac{dy_i dy_{i_1} b_2^2}{\pi} \int_0^L \int_0^L \frac{dz_1 dz_2}{\left[ b_2^2 + \left( \sum_{k=1}^i dy_k - \sum_{k=1}^{i_1} dy_k \right)^2 + (z_2 - z_1)^2 \right]^2}; \quad (3.2.12)$$

$\varepsilon_{np}$  – приведений коефіцієнт чорноти поверхонь скла, між якими відбувається променевий теплообмін. Індексами  $j_L$ ,  $j_{II}$  позначені номери граничних контрольних об'ємів сітки, що відносяться до лівого і правого скла та прилягають до газового прошарку. У цьому випадку об'єми з номерами  $j_{L+1}$  та  $j_{II-1}$  відносяться до граничних контрольних об'ємів з боку газового прошарку, а дробові індекси  $j_{L+1/2}$  і  $j_{II-1/2}$  позначають ліву та праву границі розподілу середовищ, тобто поверхні скла.

Система дискретних рівнянь переносу, в яких для апроксимації перших похідних в лівих частинах рівнянь (3.2.2) - (3.2.4) використовується схема “проти потоку”, розглянута в [69, 70]. Її розв'язання виконується методом матричної прогонки [74]. В результаті розв'язання визначаються поля швидкості, тиску і температури в склі і газових прошарках двокамерного склопакета.

Розглянемо результати розрахунку теплопереносу через двокамерний склопакет висотою  $H = 1,08$  м і шириною  $L = 0,75$  м. Це типовий склопакет для вікон експериментального полігону енергоефективних світлопрозорих конструкцій, що розташований на всьому 2 поверсі адміністративної триповерхової будівлі ІТТФ НАН України (суто північної орієнтації). Скло (кожне з трьох) має товщину  $\delta_{скл} = 4$  мм. Відстані між склом  $\delta_2 = 10$  мм. Коефіцієнт теплопровідності скла  $\lambda_{скл} = 0,74$  Вт/(м·К). Ступені чорноти всіх поверхонь скла  $\varepsilon_{скл} = 0,89$ . Камери склопакета заповнені повітрям. Температура поверхні внутрішнього скла, що звернена в бік приміщення, дорівнює  $t_{внутр} = 12,7$  °С, а температура зовнішньої поверхні зовнішнього скла складає  $t_{зовн} = -7,5$  °С. Отримані в результаті розв'язання задачі поля швидкості і температури у вертикальному перерізі двокамерного склопакета представлені на рис. 3.2.2, [43].

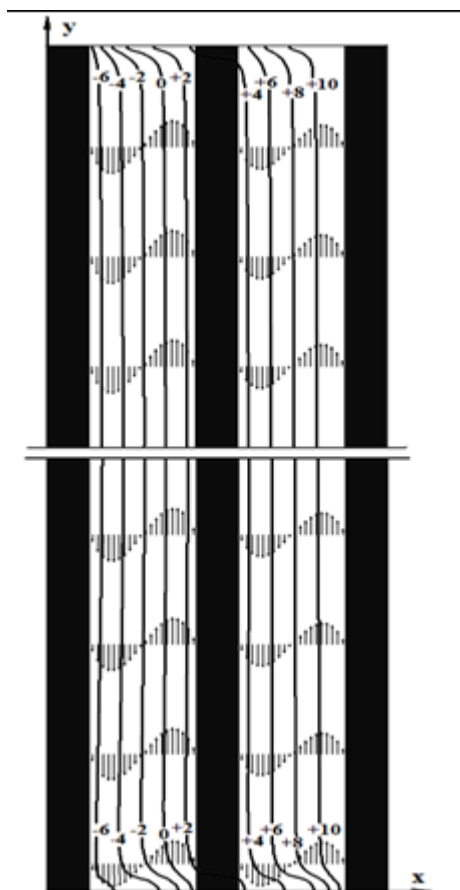


Рис. 3.2.2. Температурне поле ( $^{\circ}\text{C}$ ) та напрямки швидкості газового середовища у вертикальному перерізі двокамерного склопакету.

Розподіл вертикальної швидкості в газовому середовищі і температури по товщині склопакета в його середньому горизонтальному перетині наведено на рис. 3.2.3.

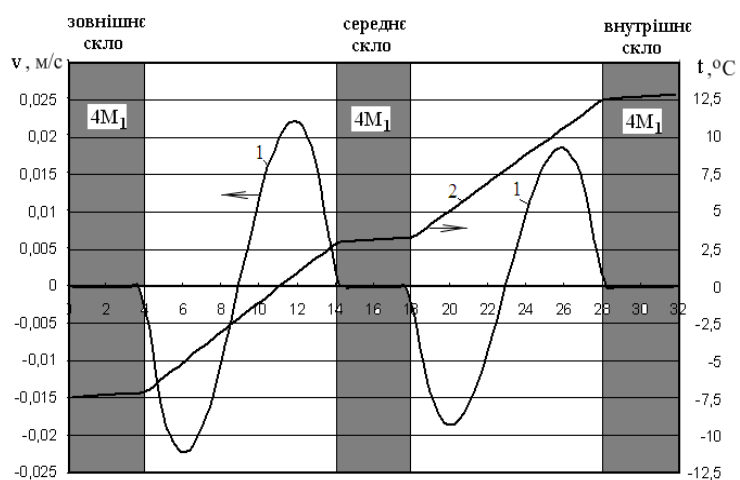


Рис. 3.2.3. Розподіл вертикальної швидкості (1) в газових прошарках і температури (2) по товщині двокамерного склопакета.

Як видно з даних рисунків, в обох камерах склопакета відбувається підйомно-опускна вільно-конвективна течія повітряного середовища. У камері, що примикає до зовнішнього скла, максимальна вертикальна швидкість складає  $v_{max} = 0,022$  м/с, а в камері, що примикає до внутрішнього скла  $v_{max} = 0,018$  м/с. Внаслідок малості зазначених величин швидкості, конвекція в прошарках між склом двокамерного склопакета несуттєво впливає на теплоперенос. Тому розподіл температури по товщині газового прошарку близький до лінійного, як це має місце в тому випадку, коли перенос теплоти здійснюється переважно теплопровідністю. Характерною особливістю такого режиму теплопереносу є також те, що ізотерми у вертикальному перерізі двокамерного склопакета практично паралельні (рис. 3.2.2). Відхилення від паралельності ізотерм спостерігається лише у верхній і нижній частинах склопакета, де відбувається розворот потоку газового середовища і напрямок течії змінюється від підйомного до опускного. Зміна температури по товщині скла незначна.

На рис. 3.2.4, густини теплового потоку на обох поверхнях практично збігаються в середній частині склопакета. Відмінності спостерігаються на верхній і нижній ділянках поверхонь. Максимальні значення густини теплового потоку на зовнішній поверхні склопакета (крива 1) спостерігаються на її верхній ділянці, а максимальні теплові потоки на внутрішній поверхні мають місце в нижній її частині (крива 2). Така особливість теплопереносу через склопакет пояснюється наявністю підйомних і опускних течій газового середовища всередині камер. Біля верхнього і нижнього торців склопакета відбувається зміна напрямків течії середовища. Внаслідок цього, біля однієї поверхні камери склопакета градієнти температури по горизонтальній координаті зменшуються, а біля протилежної – збільшуються. У середній же частині склопакета градієнти температури практично не змінюються по товщині газового прошарку (рис. 3.2.3), а градієнти температури по вертикальній координаті практично дорівнюють нулю (рис. 3.2.2). Тому теплові потоки в середній частині двокамерного склопакета однакові на зовнішній та внутрішній поверхнях (рис. 3.2.4).

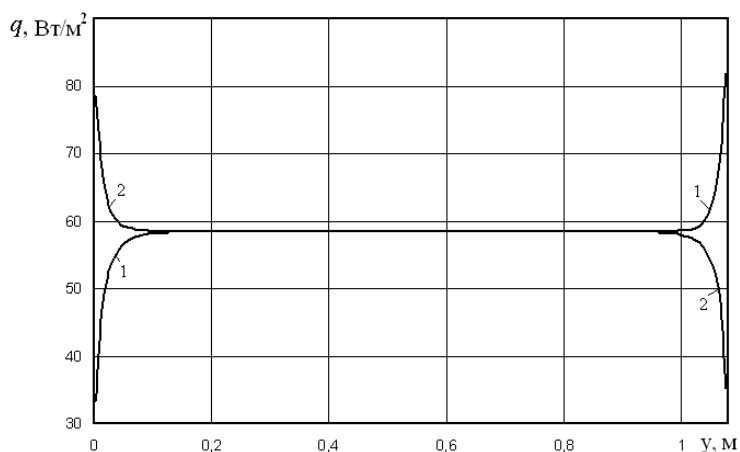


Рис. 3.2.4. Розподіл густини теплового потоку на зовнішній (1) і внутрішній (2) поверхнях двокамерного склопакета.

У розглянутому випадку сумарний тепловий потік через двокамерний склопакет становить  $Q = 47,22$  Вт. При цьому на частку радіаційної складової припадає 58% сумарного теплового потоку в камері, що примикає до зовнішнього скла ( $Q_r = 27,38$  Вт), і 60% - у внутрішній камері ( $Q_r = 28,33$  Вт).

$$R = \frac{(\tau_{\text{вн}} - \tau_{\text{зов}})HL}{Q}. \quad (3.2.13)$$

З представлених результатів випливає, що для двокамерного склопакета зазначеної вище геометрії, в камерах якого знаходиться повітря, а ступінь чорноти скла становить  $\varepsilon_{\text{скл}} = 0,89$ , опір теплопередачі  $R = 0,346$  м<sup>2</sup>К/Вт, [75].

### 3.3. Теплофізичне моделювання теплопередачі через двокамерні склопакети з низькоемісійними покриттями.

Для з'ясування впливу низькоемісійного покриття на характеристики теплопередачі через двокамерні склопакети було проведено аналогічні чисельні дослідження такого склопакета з м'яким і-покриттям на внутрішній поверхні внутрішнього скла з одним та з двома і-покриттями, відстань між склом 10 мм. Граничні умови були такі ж, як у попередньому варіанті розрахунку, але ступінь чорноти було задано для скла з і-покриттям -  $\varepsilon_{\text{скл}} = 0,2$ .

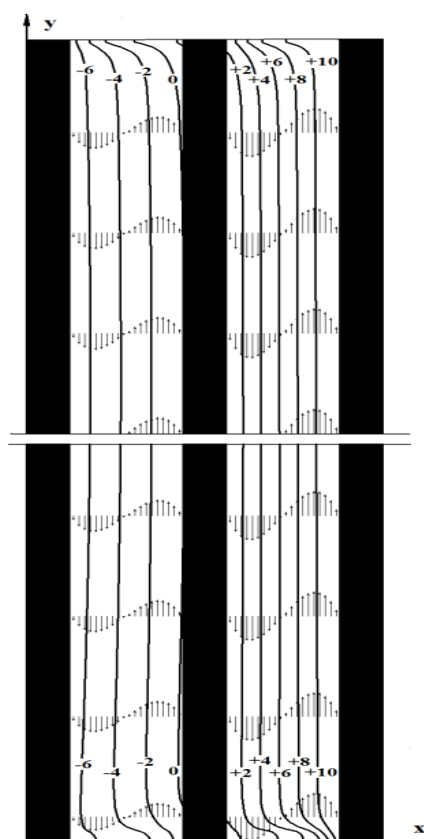


Рис. 3.3.1. Температурне поле ( $^{\circ}\text{C}$ ) та напрямки швидкості газового середовища у вертикальному перерізі двокамерного склопакету з одним і-покриттям.

Розподіл безрозмірної вертикальної швидкості (1) в газових прошарках і безрозмірної температури (2) по товщині двокамерного склопакету з одним і-покриттям наведено на рис. 3.3.2.

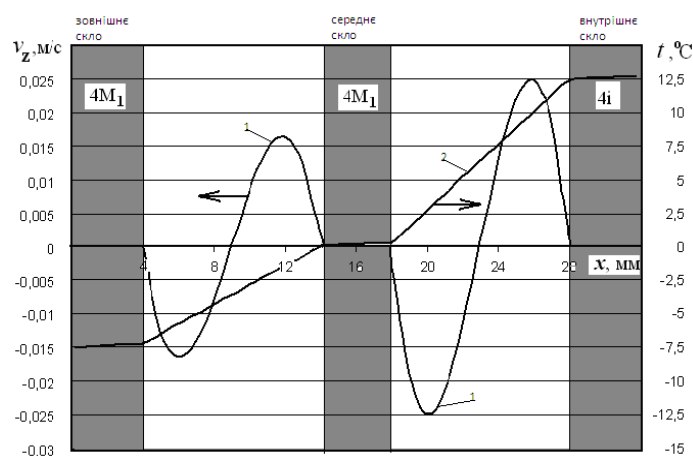


Рис. 3.3.2. Розподіл вертикальної швидкості (1) в газових прошарках і температури (2) по товщині двокамерного склопакету з одним і-покриттям.

Порівнявши рис. 3.2.2 з 3.3.1 і 3.3.2 можна побачити відмінність значень швидкості в камерах склопакету – максимальне значення в двокамерного склопакету з одним і-покриттям становить не в камері біля зовнішнього скла, як у випадку двокамерного склопакету без покриття, а навпаки – біля внутрішнього скла. Це свідчить про те, що і-покриття знижує рівень радіаційної теплопередачі та збільшує опір теплопередачі через внутрішню камеру. Внаслідок цього збільшується різниця між температурами протилежних поверхонь внутрішньої камери склопакета.

Також було проведено розрахунки і для двокамерного склопакету з двома і-покриттями при таких же умовах що і в попередніх двох випадках. В результаті отриманих значень, переконалися, що у випадку з двома і-покриттями, зменшення швидкості відбувається в обох камерах. Про це свідчить рис. 3.3.3. Порівнявши рис. 3.2.3 де представлено результати розрахунку для двокамерного склопакету з рис. 3.3.3, можна відмітити, що значення швидкості є значно нижчими в обох камерах, а це в свою чергу сприяє зменшенню радіаційного теплопереносу.

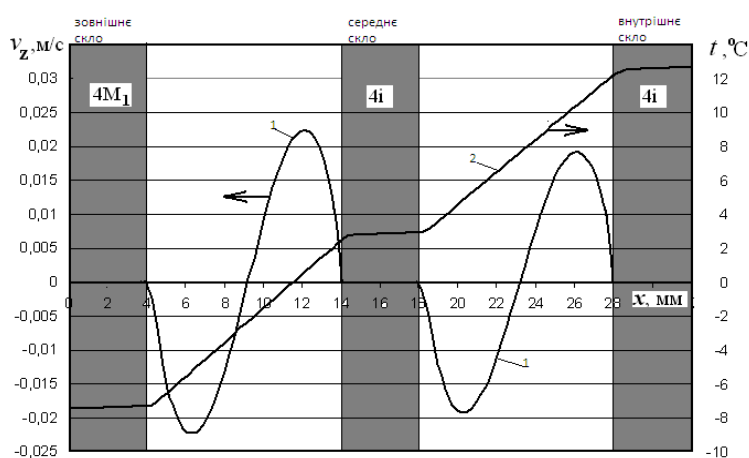


Рис. 3.3.3. Розподіл вертикальної швидкості (1) в газових прошарках і температури (2) по товщині двокамерного склопакета з двома і-покриттями.

За допомогою цієї теплофізичної моделі визначено закономірності радіаційно-конвективних складових теплового потоку, що проходять через склопакет (табл. 3.1). В таблиці значення  $R_{ск}$  наведено без врахування коефіцієнтів тепловіддачі. Чисельні дослідження показали, що центральне скло в двокамерному склопакеті сприяє зменшенню конвективного теплопереносу через



газове середовище за рахунок зниження швидкості вільноконвективних течій в камерах. Але більш впливово зменшенню радіаційного теплопереносу сприяє центральне скло, виконуючи функцію термозахисного екрану. Завдяки нанесенню низькоемісійних покриттів на поверхні склопакету зменшується радіаційна складова теплопереносу. Внаслідок цього збільшується значення опору теплопередачі. Конвективний теплоперенос зменшується за рахунок збільшення кількості камер в склопакеті, а теплопровідність – за рахунок заповнення камер аргоном або криптоном [65, 66, 75, 77].

Таблиця 1. Закономірності радіаційно-конвективних складових теплового потоку.

| Тип склопакету   | q, Вт | $R_{ск}$ ,<br>$м^2 \cdot К/Вт$ ,<br>теор.визн. | Частка радіаційного потоку від загального теплового потоку, у внутрішній камері, % | Частка радіаційного потоку від загального теплового потоку, у зовнішній камері, % |
|--|-------|--|--|---|
| Двокамерний,<br>4M <sub>1</sub> -10-4M <sub>1</sub> -10-4M <sub>1</sub>        | 47,22 | 0,35   | 60   | 58  |
| Двокамерний з одним і-покриттям,<br>4M <sub>1</sub> -10-4M <sub>1</sub> -10-4i | 33,86 | 0,48   | 27   | 58  |
| Двокамерний з двома і-покриттями<br>4i-10-4M <sub>1</sub> -10-4i               | 26,47 | 0,61   | 27   | 26  |
| Двокамерний з двома і-покриттями<br>4i-8-4M <sub>1</sub> -8-4i                 | 31,6  | 0,52   | 24   | 23  |

### 3.3.1. Верифікація теплофізичної моделі по експериментальних даних.

На основі складеної моделі, з використанням отриманих експериментальних даних, було проведено моделювання теплопередачі через двокамерний склопакет з одним і-покриттям при нестационарних умовах. Було взято отримані значення температури і густини теплового потоку по трьох точках у вертикальному перерізі по площині склопакету. Спочатку було розглянуто задачу при стаціонарних умовах. На рис. 3.3.1.1. представлено розподіл температури по ширині двокамерного склопакета зі звичайним склом 4M<sub>1</sub>-10-4M<sub>1</sub>-4M<sub>1</sub> (1) та по ширині двокамерного склопакету з одним низькоемісійним покриттям 4M<sub>1</sub>-10-

4M<sub>1</sub>-4i (2). Можна відмітити, що температура в міжскляному прошарку в середньому на 2 °С вища, в склопакеті з низькоемісіним покриттям, в порівнянні з двокамерним склопакетом. А це в свою чергу зменшить ймовірність утворення конденсату в крайових зонах. З рис. 3.3.1.2 слідує, що зменшення швидкості в склопакеті з низькоемісіним покриттям зменшить конвективні потоки, а це призведе до зменшення радіаційної складової. Аналізуючи рис. 3.3.1.3 бачимо, що в середній частині склопакету густина теплового потоку вирівнюється, що пояснюється тим, що в середині камер є підйомні і опускні течії газового середовища, а біля верхнього і нижнього торців склопакета відбувається зміна напрямків цієї течії газового середовища.



Рис. 3.3.1.1. Розподіл температури по ширині двокамерного склопакету (1), та по ширині двокамерного склопакету з одним низькоемісіним покриттям (2).

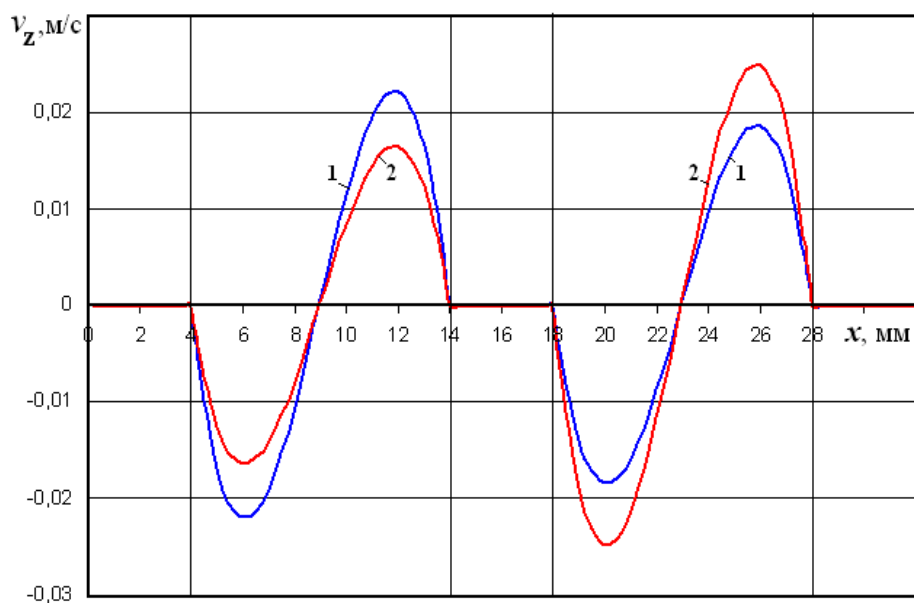


Рис. 3.3.1.2. Розподіли вертикальної швидкості повітря по ширині двокамерного склопакета  $4M_1-10-4M_1-4M_1$  (1) та по ширині двокамерного склопакета з одним низькоемісійним покриттям  $4M_1-10-4M_1-4i$  (2).

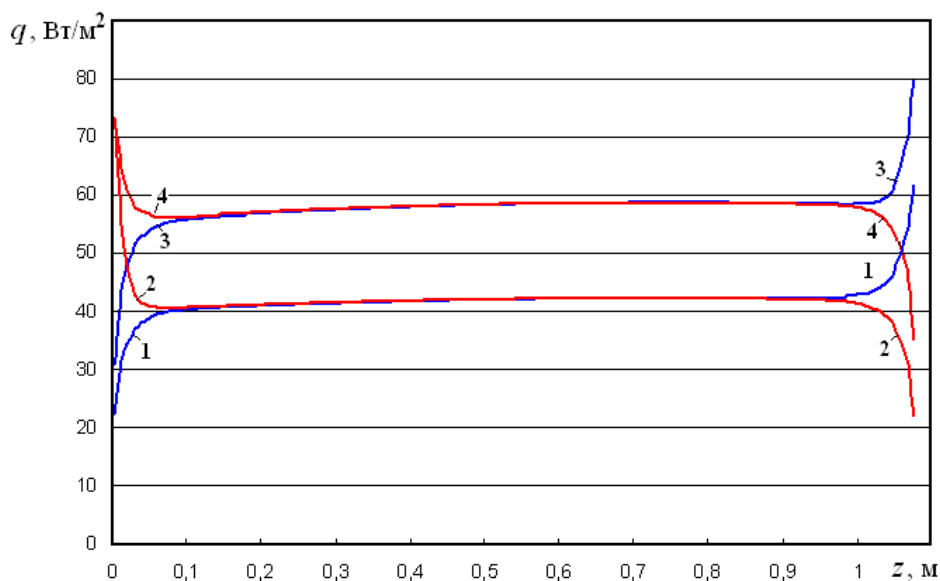


Рис. 3.3.1.3. Розподіли густин теплового потоку по зовнішній (1; 3) та внутрішній (2; 4) поверхнях двокамерного склопакета з одним низькоемісійним покриттям  $4M_1-10-4M_1-4i$  (1; 2) та двокамерного склопакета  $4M_1-10-4M_1-4M_1$  (3; 4).

Наступним етапом було розглянуто цю задачу, але вже для нестационарних умов. На рис. 3.3.1.4 представлено розподіл температур на поверхні склопакету.

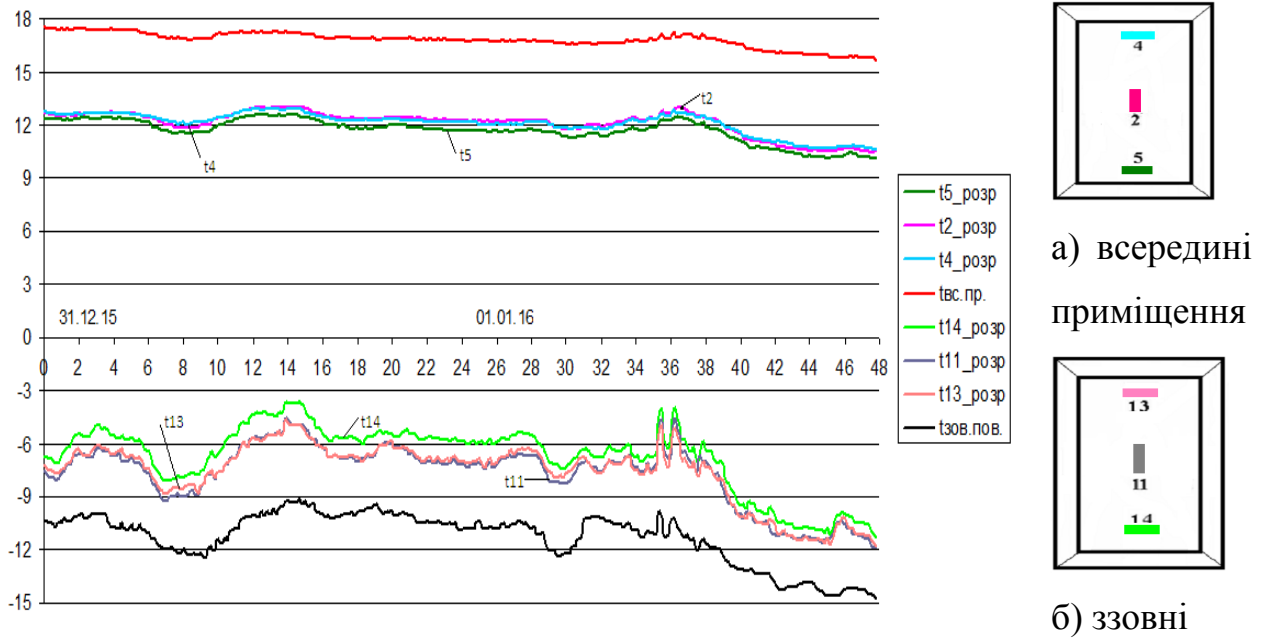


Рис. 3.3.1.4. Зміна у часі температури на внутрішній поверхні внутрішнього скла та на зовнішній поверхні зовнішнього скла за даними експерименту : 1-  $z = 0,01$  м; 2-  $z = 0,5$  м; 3-  $z = 1,0$  м; а) розміщення датчиків на склопакеті всередині приміщення; б) розміщення датчиків на склопакеті зовні.

Також, було визначено густину теплового потоку по тих самих трьох точках на внутрішній поверхні склопакету і на зовнішній поверхні склопакету. Порівняльна характеристика представлена на рис. 3.3.1.5 (а, б, в).

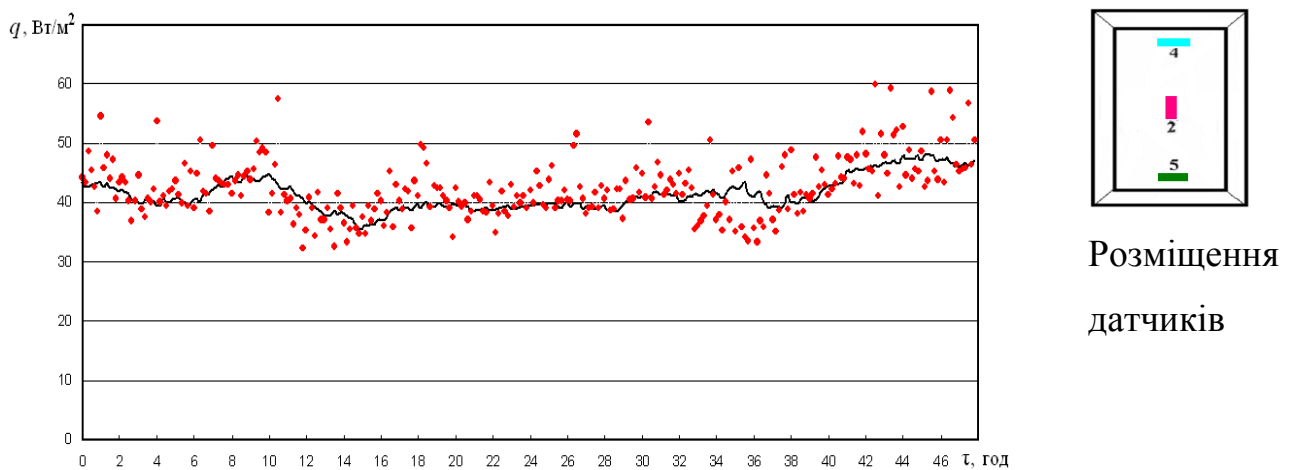


Рис. 3.3.1.5 (а). Зміна у часі густини теплового потоку на внутрішній поверхні внутрішнього скла двокамерного склопакету з і-покриттям на висоті  $z = 0,01$  м ( $q_5$ ): точки - за даними експерименту; суцільна лінія – результати чисельного моделювання.

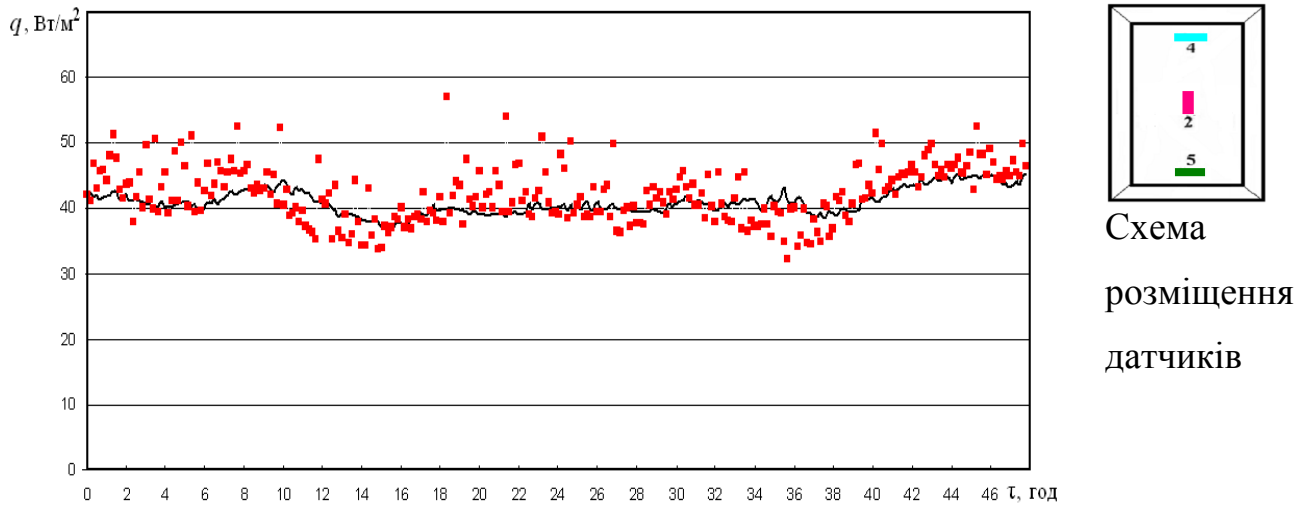


Рис. 3.3.1.5 (б). Зміна у часі густини теплового потоку на внутрішній поверхні внутрішнього скла двокамерного склопакету з і-покриттям на висоті  $z = 0,5$  м ( $q_2$ ): точки - за даними експерименту; суцільна лінія – результати чисельного моделювання.

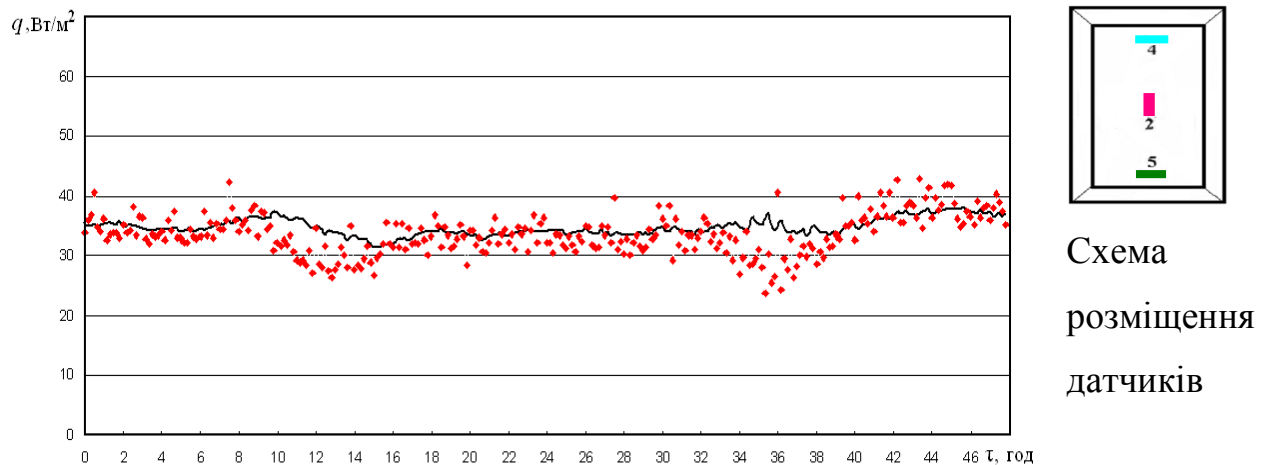


Рис. 3.3.1.5 (в). Зміна у часі густини теплового потоку на внутрішній поверхні внутрішнього скла двокамерного склопакету з і-покриттям на висоті  $z = 1,0$  м ( $q_4$ ): точки - за даними експерименту; суцільна лінія – результати чисельного моделювання.

Можна відмітити співпадіння розрахункових і експериментальних даних, що свідчить про адекватність запропонованої моделі. Розглянемо отримані дані густини теплового потоку на зовнішній поверхні склопакету, рис. 3.3.1.3 (а, б, в).

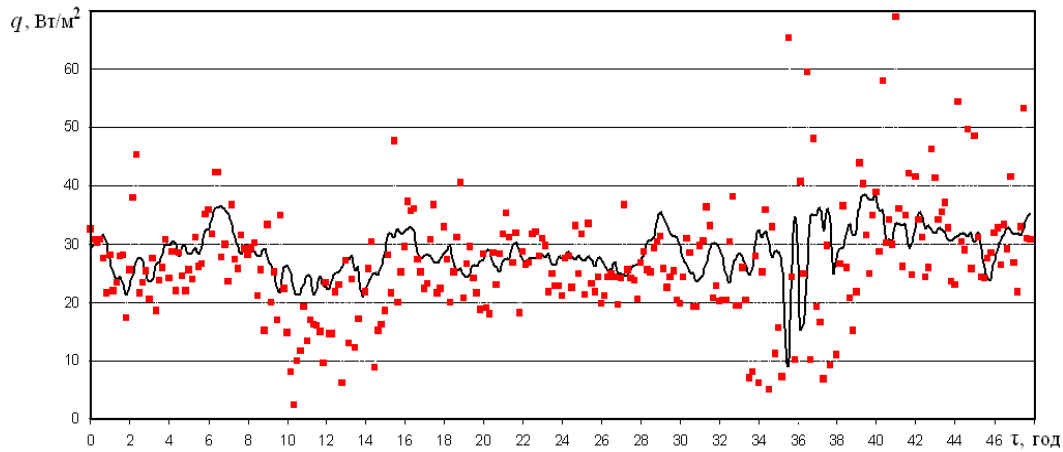


Схема  
розміщення  
датчиків

Рис.3.3.1.6 (а). Зміна у часі густини теплового потоку на зовнішній поверхні зовнішнього скла двокамерного склопакету з і-покриттям на висоті  $z = 0,01$  м (q14): точки - за даними експерименту; суцільна лінія – результати чисельного моделювання.

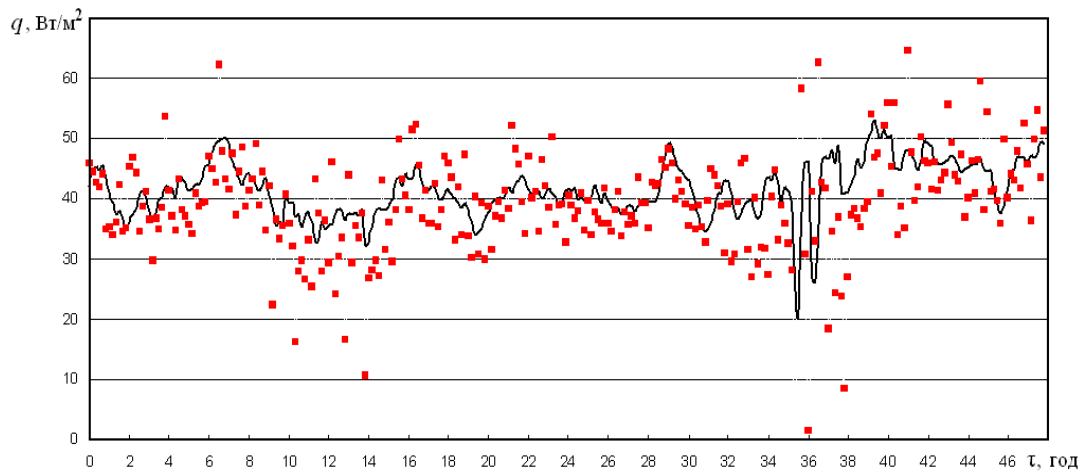


Схема  
розміщення  
датчиків

Рис.3.3.1.6 (б). Зміна у часі густини теплового потоку на зовнішній поверхні зовнішнього скла двокамерного склопакету з і-покриттям на висоті  $z = 0,5$  м (q11): точки - за даними експерименту; суцільна лінія – результати чисельного моделювання.

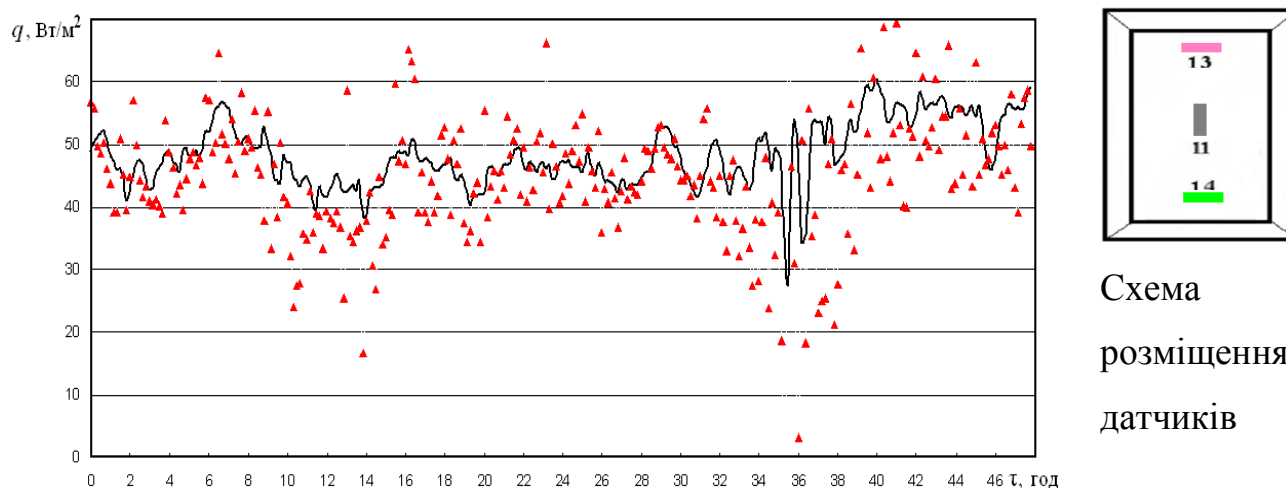


Рис.3.3.1.6 (в). Зміна у часі густини теплового потоку на зовнішній поверхні зовнішнього скла двокамерного склопакету з і-покриттям на висоті  $z = 1,0$  м ( $q_{13}$ ): точки - за даними експерименту; суцільна лінія – результати чисельного моделювання.

Можна спостерігати характерні стрибки густини теплового потоку на зовнішній поверхні склопакету. В котрий раз переконаємося, що вплив зовнішніх факторів впливає на зміну значень густини теплового потоку.

Проведена верифікація запропонованої теплофізичної моделі розрахунку теплопередачі через двокамерний склопакет з низькоемісійним покриттям підтвердила відповідність моделі та адекватність отриманих розрахункових даних. Діапазон відхилення розрахункових даних від експериментальних знаходиться в межах 2 - 4%.

### **3.4. Комп'ютерне CFD моделювання радіаційно-конвективного теплообміну двокамерного склопакету в тривимірній постановці.**

Для визначення теплофізики впливу профілю рами та пристінової області примикання вікна на теплопередачу в склопакеті виконано CFD моделювання радіаційно-конвективного теплообміну двокамерного склопакету, встановленого в корпусі №1 ІТТФ НАН України по вул. Булаховського, 2, в тривимірній

постановці. Моделювання було виконано за допомогою програмної системи Ansys Fluent.

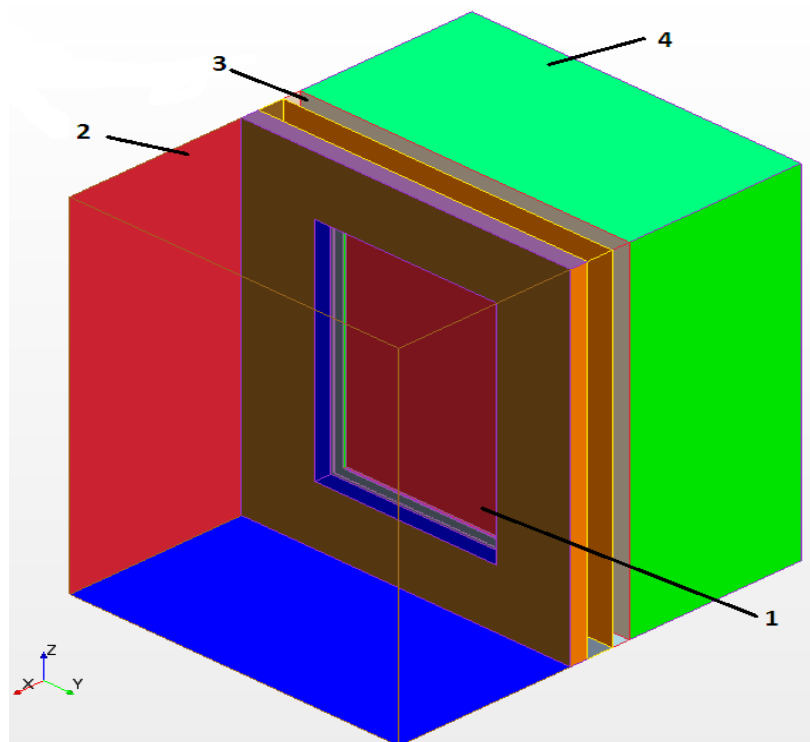


Рис. 3.4.1. Розрахункова область.

На рис. 3.4.1: 1 - двокамерний склопакет 4M<sub>1</sub>-10-4M<sub>1</sub>-10-4M<sub>1</sub> з розмірами 1,06x0,642 м, що встановлений в трикамерний профіль 0,04x0,06 м і шар монтажної піни товщиною 0,01 м; 2 – зовнішнє середовище з  $T_{\text{зов.пов.}} = -20$  °С; 3 - стінова «сендвіч» панель, що включає в себе - бетон 7 см, за ним шар мінеральної вати – 10 см, а за ним ще шар бетону - 7 см; 4 – приміщення кімнати з  $T_{\text{вс.пр.}} = 20$  °С. Розрахункова сітка містить 3707694 елементів. Повітря вважається ідеальним газом. Течія в умовах природної конвекції – ламінарна. На поверхнях розрахунку «тверде тіло - повітря» або «тверде тіло» – «тверде тіло» застосовуються умови спряження (умови 4 роду). Розрахунок виконано на основі системи рівнянь нерозривності, енергії, рівняння газового стану і теплопровідності. Всі ці рівняння були представлені в попередньому пункті. В результаті проведених розрахунків отримані поля швидкості, температури.

Теплообмін на внутрішній поверхні вікна більшою мірою визначається видом течії повітряних мас і різницею температур між внутрішнім повітрям  $T_{\text{вн}}$  і



на поверхні скла  $T_c$ . Як видно з рис. 3.4.2 на фрагменті 1 і 2 спостерігається підйомно-опускна течія повітря.

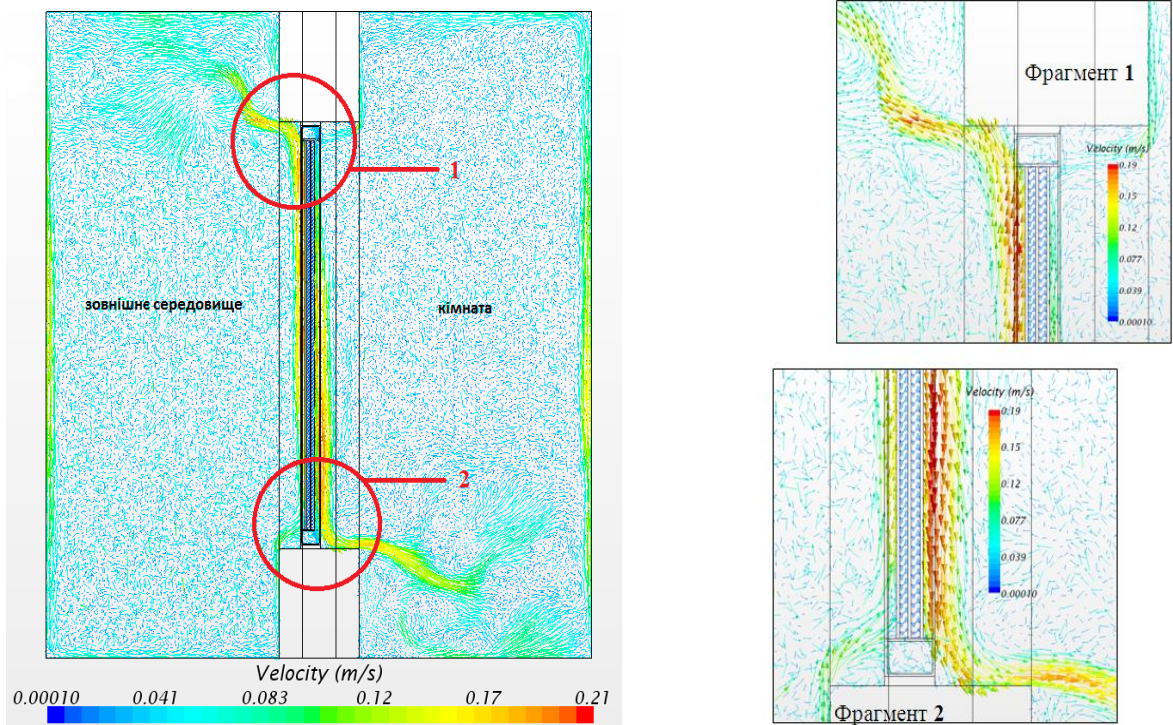


Рис. 3.4.2. Поля швидкостей у вертикальному перерізі.

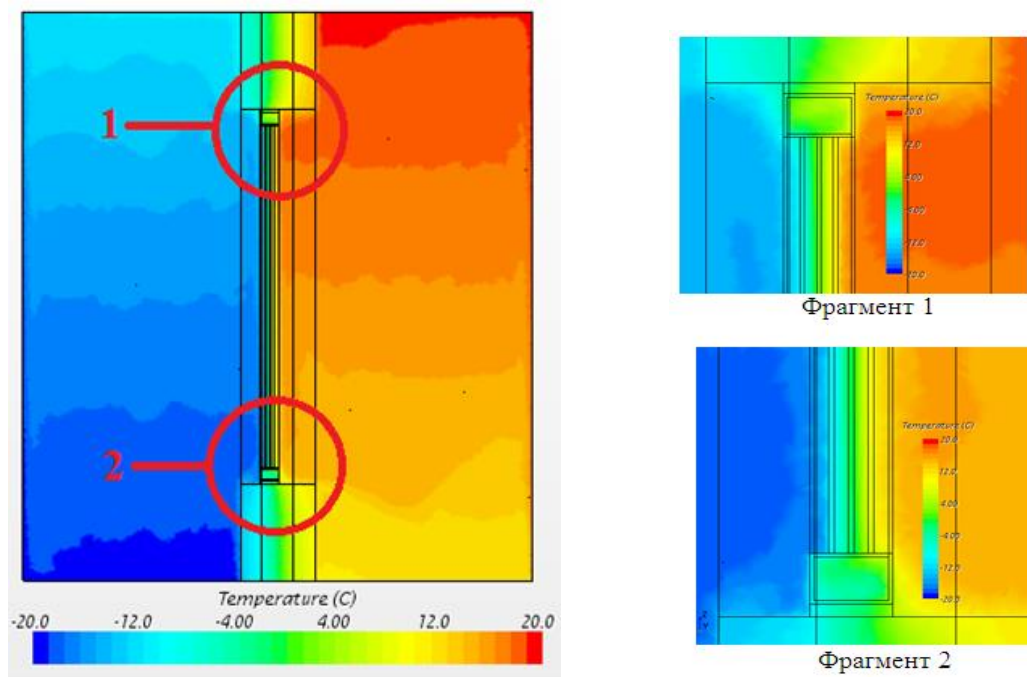


Рис. 3.4.3. Поля температур у вертикальному перерізі.

Рис. 3.4.3 теж явно показує на значні тепловтрати в зоні профілю, які обумовлюють пониження температури на внутрішніх поверхнях в зоні профілю та можливість конденсації вологи. Спостерігаються коливання температури на поверхні скла, що обумовлені нерівномірністю поля швидкості, відривом і приєднанням повітряного потоку на поверхні скла в умовах природної конвекції.

Пристінкові зони повітря, де спостерігаються перепади температур, є примежовими шарами. Так як в склопакеті є два пустотних проміжки між стеклами, то можна говорити про 6 примежових шарів [41]. Якщо через такий склопакет проходить тепловий потік  $100 \text{ Вт/м}^2$ , то на кожному примежовому шарі температура змінюється приблизно на  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

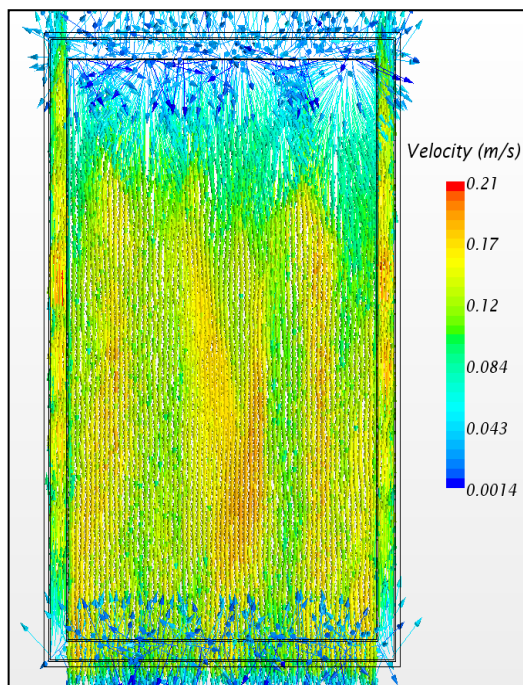


Рис. 3.4.4. Значення швидкості руху повітря біля поверхні склопакету.

Формування примежових шарів в умовах природної конвекції обумовлено силами гравітації, за рахунок яких повітря біля теплої вертикальної поверхні починає підніматися, а біля холодної – опускатися, рис. 3.4.4. Чим вища швидкість руху повітря, що обумовлена природною конвекцією, тим тонший примежовий шар, рис. 3.4.4. і 3.4.5. При цьому в повітряних прошарках між стеклами виникають циркуляційні потоки, які беруть участь у перенесенні теплоти спільно з кондуктивними потоками.

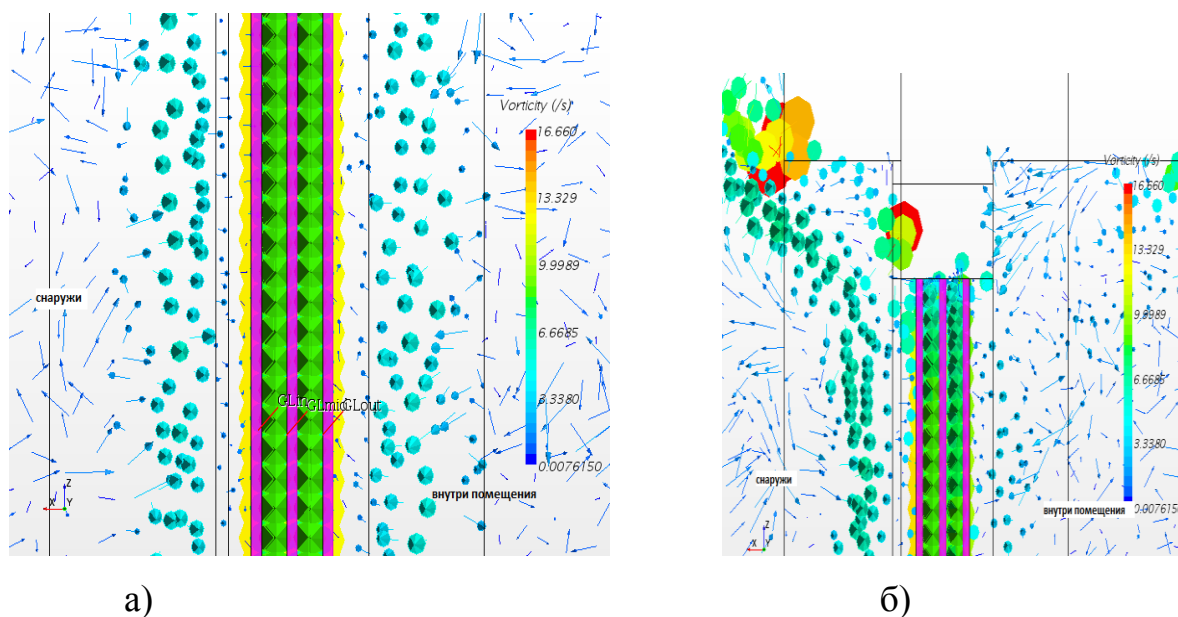


Рис. 3.4.5. Завихореність поля швидкостей повітря в системі довкілля – склопакет - приміщення будівлі, (а) - фрагмент завихореності поля швидкостей в плоскому перерізі двокамерного склопакету; б) - фрагмент завихореності поля швидкостей в плоскому перерізі 3D CFD моделі двокамерного склопакету - верхня частина.

При малих товщинах цих повітряних прошарків, зустрічні потоки повітря біля протилежних стінок прошарку починають «напливати» один на одного, змішуючись. При цьому товщина повітряного прошарку стає менше двох незбурених прилежових шарів, внаслідок чого коефіцієнт теплопередачі збільшується, а опір теплопередачі відповідно зменшується. Крім того, при підвищених температурах стінок повітряних прошарків починають грати роль процеси теплопередачі випромінюванням.

Основні результати розділу опубліковані в роботах: [65, 66, 75, 76, 77].

### Висновки до розділу 3.

Розроблена інженерна методика розрахунку тепловтрат через віконні конструкції в одновимірній постановці. Вона дозволяє врахувати вплив

радіаційної складової сонячного випромінювання на теплопередачу через склопакет та визначити, які тепловтрати відбуваються через склопакети. Порівняльний енергетичний аналіз для одно-, дво- та трикамерних склопакетів показав, що із збільшенням числа камер склопакета теплова ефективність подальших камер знижується, тобто оптимальним варіантом є встановлення двокамерного склопакету.

Розроблено теплофізичну двовимірну модель для дослідження теплопередачі через одно- та двокамерний склопакет, з використанням якої визначено закономірності радіаційно-конвективних складових теплового потоку, що проходять через склопакет. Теоретично встановлено, що радіаційний тепловий потік складає до 70% в однокамерному та до 65% в двокамерному склопакеті. Центральне скло в двокамерному склопакеті сприяє зменшенню конвективного теплопереносу через газове середовище за рахунок зниження швидкості вільноконвективних течій в камерах. Більш впливово центральне скло сприяє зменшенню радіаційного теплопереносу, виконуючи функцію термозахисного екрану. Завдяки нанесенню низькоемісійних покриттів на поверхні склопакету зменшується радіаційна складова теплопереносу. Конвективний теплоперенос зменшується за рахунок збільшення кількості камер в склопакеті, а теплопровідність – за рахунок заповнення камер інертним газом.

Проведена верифікація запропонованої теплофізичної моделі розрахунку теплопередачі через двокамерний склопакет з низькоемісійним покриттям підтвердила повноту моделі та адекватність отриманих розрахункових даних. Діапазон відхилення розрахункових даних від експериментальних знаходиться в межах 2 - 4%.

Вперше оцінено розподіл теплопровідно-конвективних та радіаційних вкладів теплового потоку на зовнішній та внутрішній поверхнях склопакету.

Було проведено в тривимірній постановці, комп'ютерне CFD моделювання радіаційно-конвективного теплообміну двокамерного склопакету, встановленого у вікнах будівлі адміністративного корпусу №1 ІТТФ НАН України по вул. Булаховського, 2. В результаті встановлені зони, де відбуваються найбільші

тепловтрати, а також температура «точки роси», що призводить до утворення конденсату на ВК.

Отримані розрахункові результати щодо теплопередачі через одно- чи двокамерний склопакет в межах випадкової похибки співпадають з експериментальними даними, що незалежно отримані із застосуванням розробленого переносного блоку теплової реєстрації.

## РОЗДІЛ 4. ПРОФІЛІ ВІКОННІ.

Так як у ВК площа віконних рам займає до 20%, то відповідно через них теж відбувається значна частина тепловтрат. Як було показано в розділі 3.4 за результатами CFD моделювання, є значні тепловтрати через трикамерний віконний профіль, а особливо через краєві зони, а це призводить до утворення «місточків холоду» та до випадання конденсату на ВК. Температурний режим в зоні примикання склопакету і профілю визначається спільним протіканням декількох взаємопов'язаних процесів: передачею теплоти теплопровідністю, конвективним теплопереносом в прошарку між стеклами і радіаційним випромінюванням. Передача теплоти теплопровідністю відбувається через дистанційні рамки, герметики та частково через повітря або газ, який заповнює прошарок між стеклами у склопакеті. Тому велику увагу було приділено дослідженню теплотехнічних характеристик віконного профілю.

### 4.1. Експериментальні дослідження теплопередачі через трикамерний профіль.

В розділі 2.1 було детально описано методику проведення експериментальних досліджень через склопакети. Паралельно з дослідженнями склопакетів, проводилися дослідження температурних характеристик та густини теплового потоку на поверхнях віконних профілів всередині приміщення та ззовні, а також фіксувалася температура зовнішнього повітря і температура всередині приміщення. На рис. 4.1.1 представлена схема розміщення датчиків на ВК, на фрагментах (а) і (б) показано розміщення датчиків на профілі.

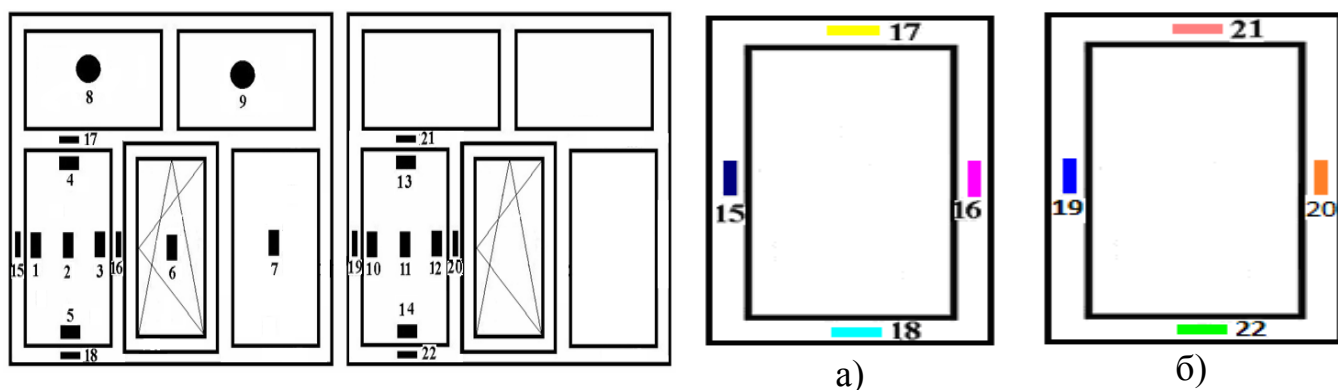




Рис. 4.1.1. Схема розміщення датчиків; а) розміщення датчиків на поверхні профілю всередині приміщення; б) розміщення датчиків на поверхні профілю зовні.

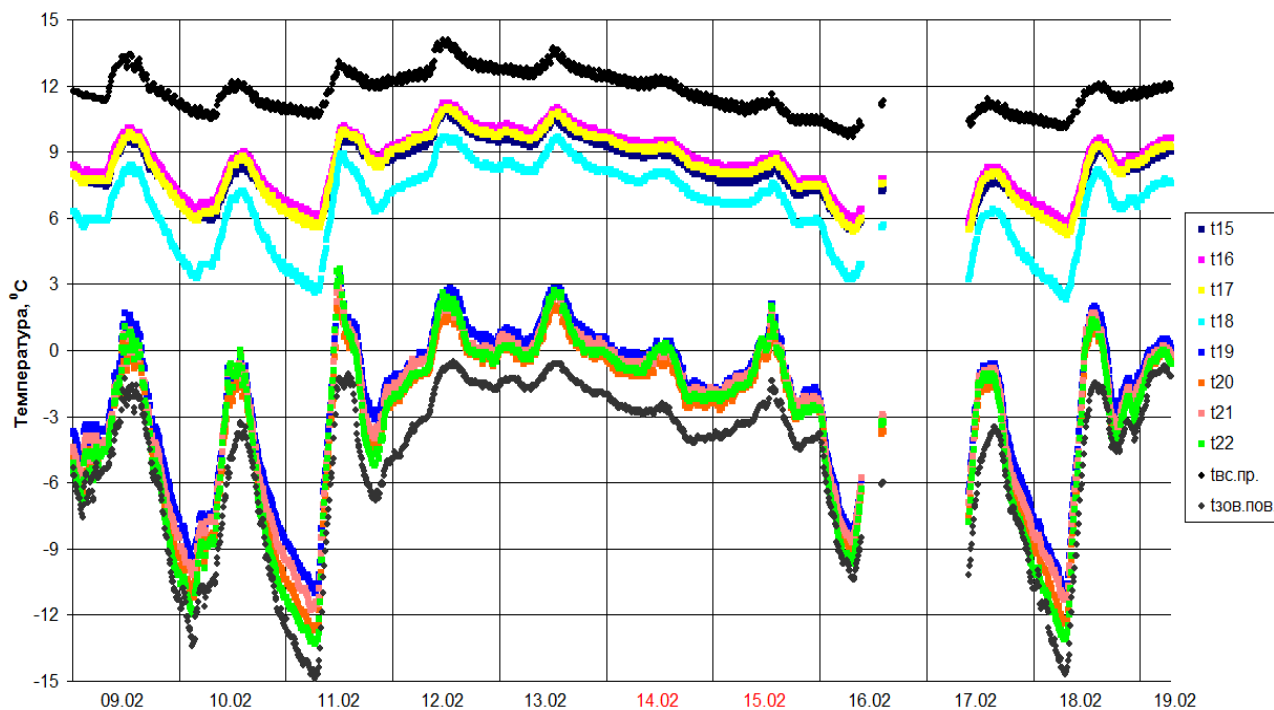


Рис. 4.1.2. Значення температури на внутрішній і зовнішній поверхні трикамерного профілю та температури зовнішнього та внутрішнього повітря. Період вимірювання - 09.02.2015 з 00:00 до 19.02.2015 - 06:50.

Криві - t15, t16, t17, t18 показують температуру на внутрішній поверхні профілю, криві t19, t20, t21, t22 – відповідно на зовнішній поверхні профілю, а tвс.пр і tзов.пов. показують значення температури всередині приміщення та зовнішнього повітря на відстані 20 см від склопакету. Можна чітко відслідкувати, що експеримент був проведений при необхідних умовах, зазначених в [3, 4, 50]. Відсутність експериментальних даних на графіку – відбулося відключення електропостачання будівлі і експериментальна установка не працювала. Значення температури датчика № 18, який розміщений всередині приміщення знизу ВК біля підвіконня, найнижчі, а також низькі значення температури датчик № 15, який розміщений біля стінки. Це вказує на те, що є тепловтрати в даних зонах. Значення температури датчик №17 вищі, ніж попередніх двох тому, що він був

розміщений над склопакетом зверху і на нього діяла конвективна течія теплового повітря. Значення температури датчик № 16 найвищі – він був розміщений біля склопакету і тепловтрати там були менші, ніж від стіни.

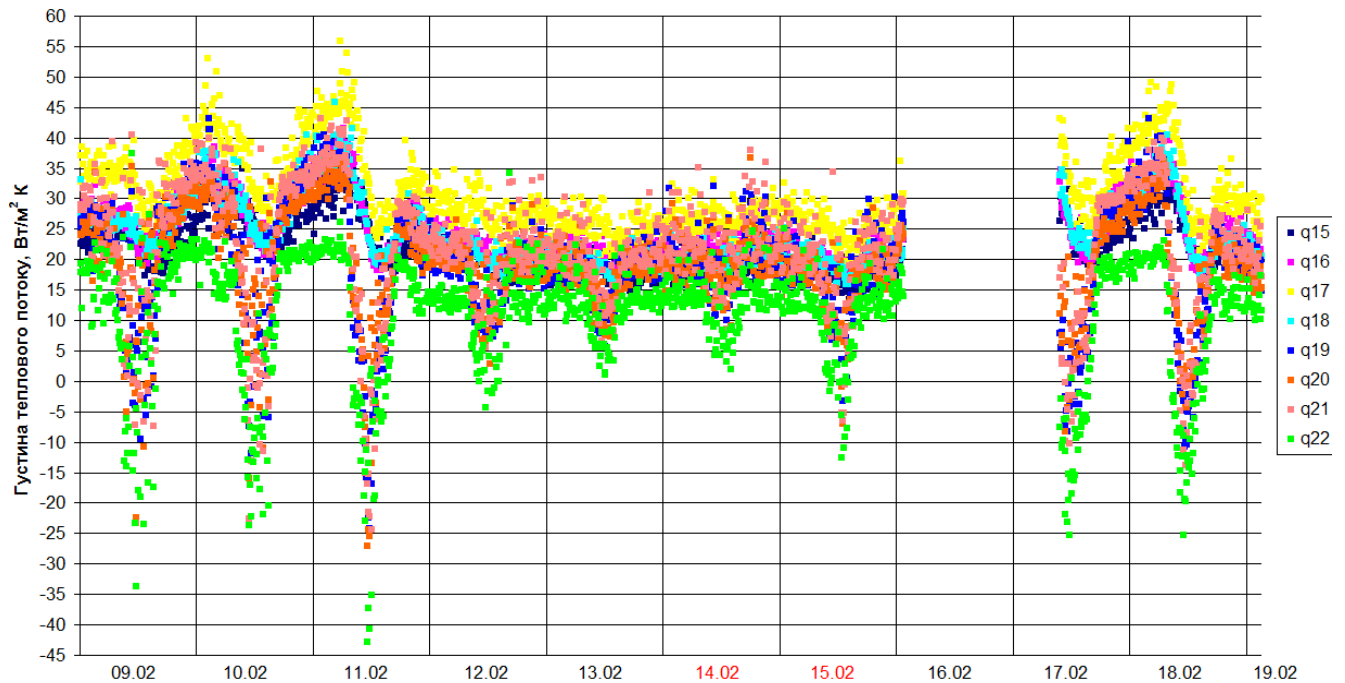


Рис. 4.1.3. Значення густини теплового потоку на поверхні трикамерного профілю, датчики встановлені всередині приміщення і зовні, період вимірювання - 09.02.2015 з 00:00 до 19.02.2015 - 06:50.

В середині дня, як і у випадку експериментальних досліджень теплопередачі через склопакети, теж можемо спостерігати від'ємні значення густини теплового потоку, що вказує на проявлення явища обернення теплового потоку. Як і для склопакетів, на основі отриманих даних, було розраховано значення опору теплопередачі. Так як в нині діючих ДБН значення опору теплопередачі для віконних профілів не приведені, то будемо їх порівнювати з тими, які вказав виробник в паспорті або в сертифікаті на виріб. Основні вимоги до них - взагалі вони повинні бути не нижчими, ніж значення опору теплопередачі склопакетів, навіть вищими. Скористаємося формулою (4.1) для визначення опору теплопередачі профілю:

$$R = \frac{1}{\alpha_{\text{внутр.}}} + \frac{\bar{t}_{\text{пр.внутр.}} - \bar{t}_{\text{пр.зовн.}}}{\bar{q}_{\text{пр.внутр.}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{зовн.}}} \quad (4.1)$$



Виробник вказав у паспорті на виріб -  $R_{n.з.} = 0,62 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ , експериментально отримано значення  $R_{o,експ} = 0,62 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ . На рис. 4.1.4. приведено значення опору теплопередачі в досліджуваних точках.

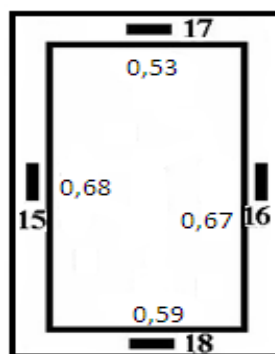


Рис. 4.1.4. Значення опору теплопередачі на поверхні трикамерного профілю.

#### 4.2. Експериментальні дослідження теплопередачі через п'ятикамерний профіль.

Також були проведені дослідження п'ятикамерного віконного профілю. Схема розміщення датчиків приведена на рис. 4.2.1.

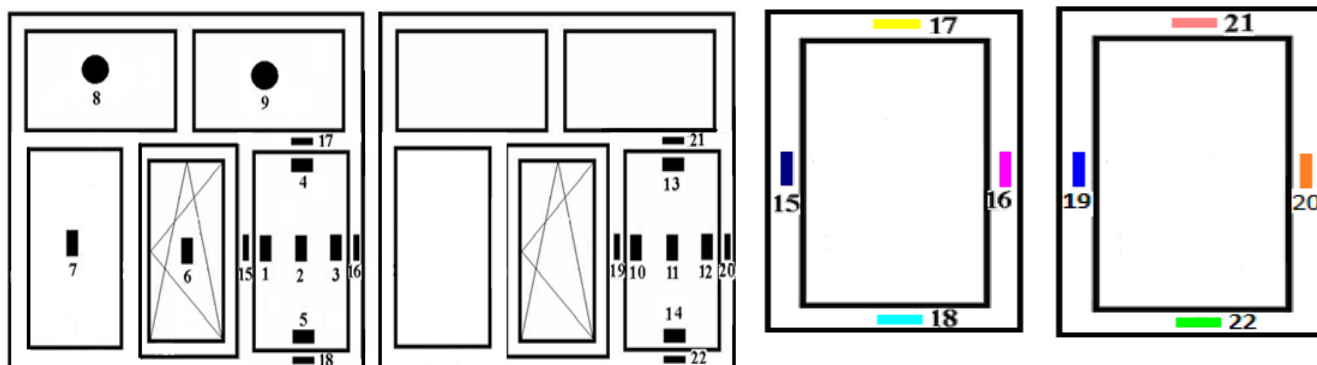


Рис. 4.2.1. Схема розміщення датчиків; а) розміщення датчиків на поверхні профілю всередині приміщення; б) розміщення датчиків на поверхні профілю зовні.

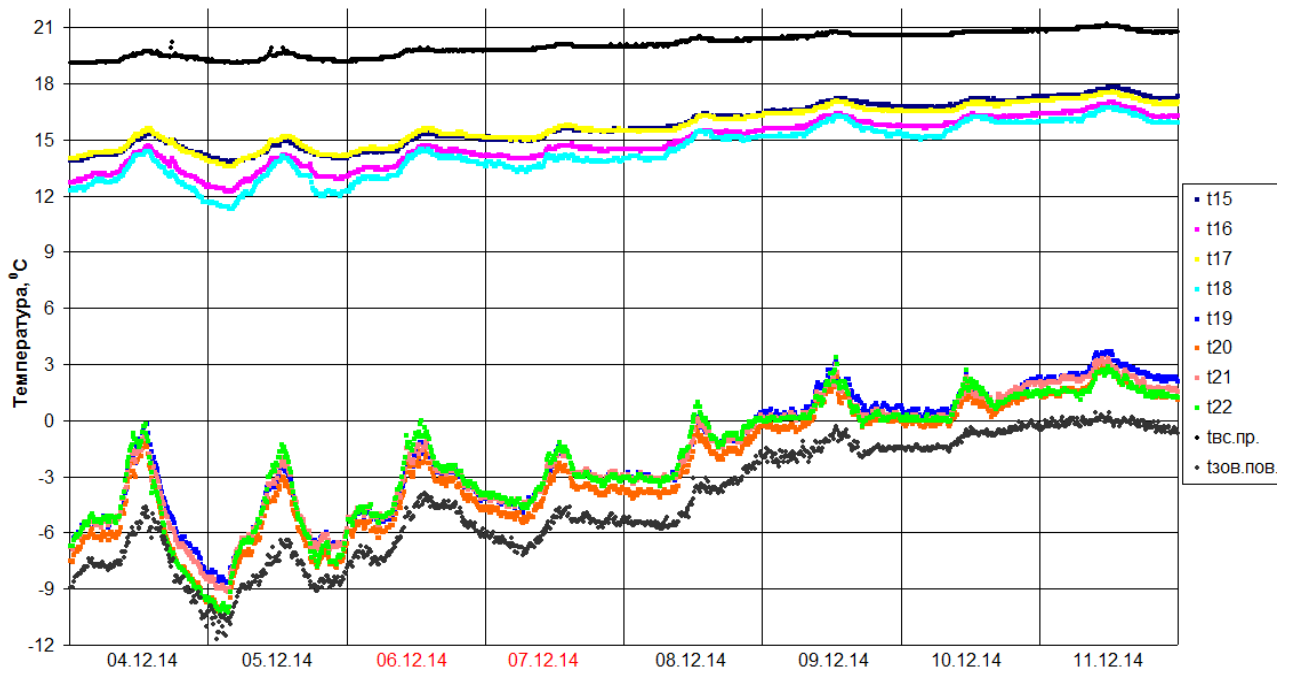


Рис. 4.2.2. Значення температури на внутрішній і зовнішній поверхні п'ятикамерного профілю та температури зовнішнього та внутрішнього повітря. Період вимірювання - 04.12.2014 з 00:00 до 11.12.2014 - 23:50.

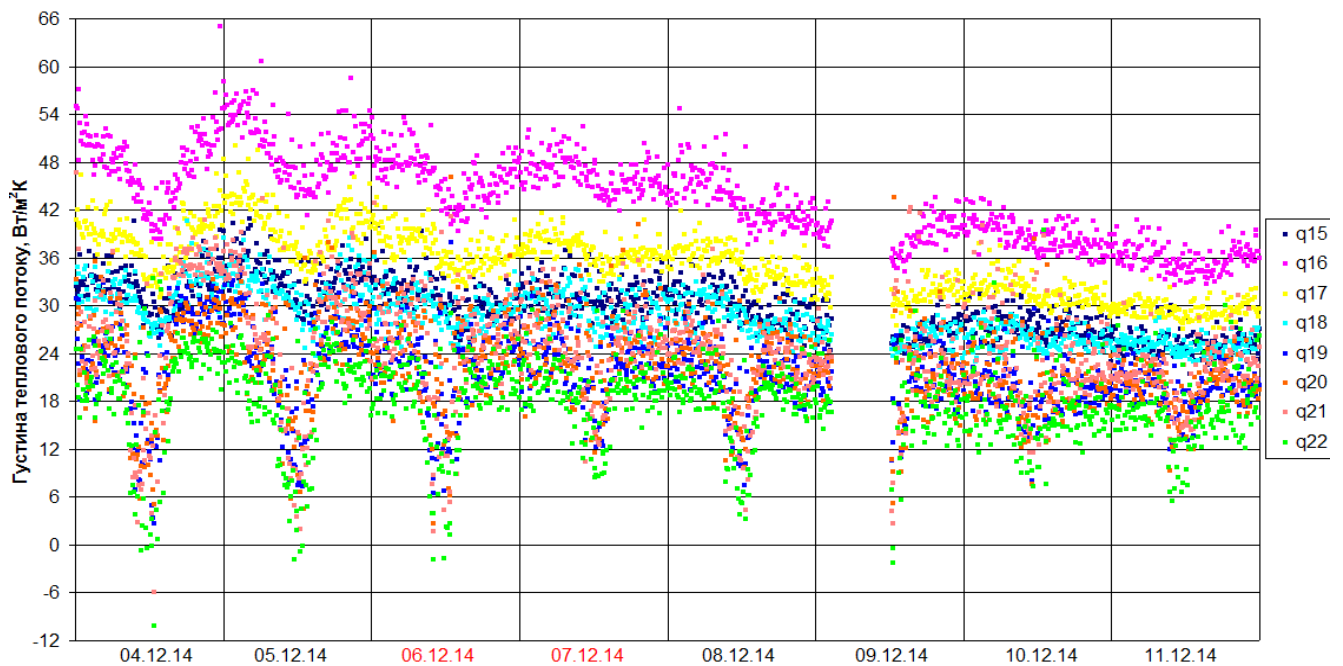


Рис.4.2.3. Значення густини теплового потоку на поверхні п'ятикамерного профілю, датчики встановлені всередині приміщення і зовні, період вимірювання - 04.12.2014 з 00:00 до 11.12.2014 - 23:50.

На рис. 4.2.2. наведені експериментальні дослідження температури на внутрішніх і зовнішніх поверхнях профілю, а також значення температури всередині приміщення та зовні. Теж можемо спостерігати, що значення температури найнижчі біля підвіконня та біля стіни, найвищі значення - біля склопакету і зверху над склопакетом. З рис. 4.2.3 бачимо, що теж проявляється явище обернення теплого потоку всередині дня, це і пояснює від'ємні значення густини теплого потоку.

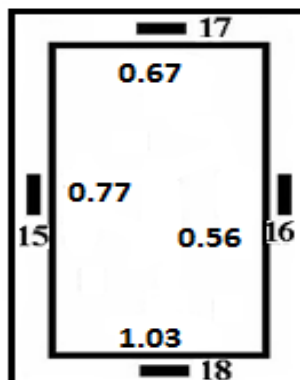


Рис. 4.2.3. Значення опору теплопередачі на поверхні п'ятикамерного профілю.

Було визначено значення опору теплопередачі для цього профілю.  $R_{o,експ}=0,76 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ . Виробник вказав -  $R_{л.з.}= 0,77 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ .

### 4.3. Експериментальні дослідження теплопередачі через шестикамерний профіль.

Також проводилися дослідження шестикамерного віконного профілю. Схема розміщення датчиків представлена на рис. 4.3.1.

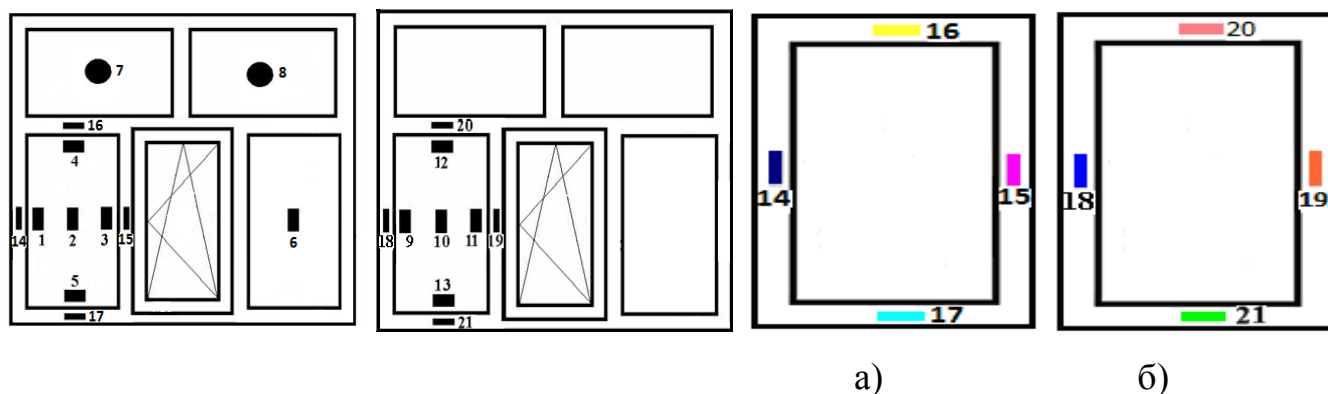


Рис. 4.3.1. Схема розміщення датчиків, вид зсередини приміщення; а) розміщення датчиків на поверхні профілю всередині приміщення; б) розміщення датчиків на поверхні профілю зовні.

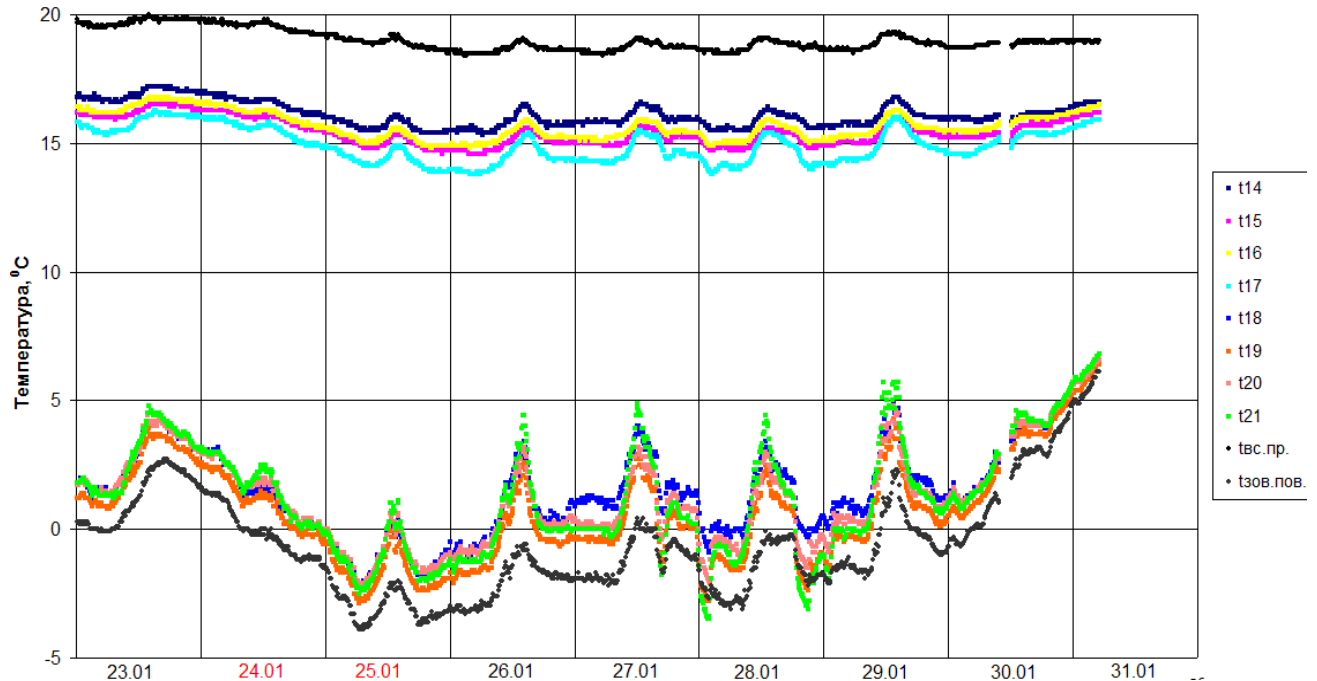


Рис. 4.3.2. Значення температури на внутрішній і зовнішній поверхні шестикамерного профілю та температури зовнішнього та внутрішнього повітря. Період вимірювання - 23.01.2015 з 00:00 до 31.01.2015 - 04:50.

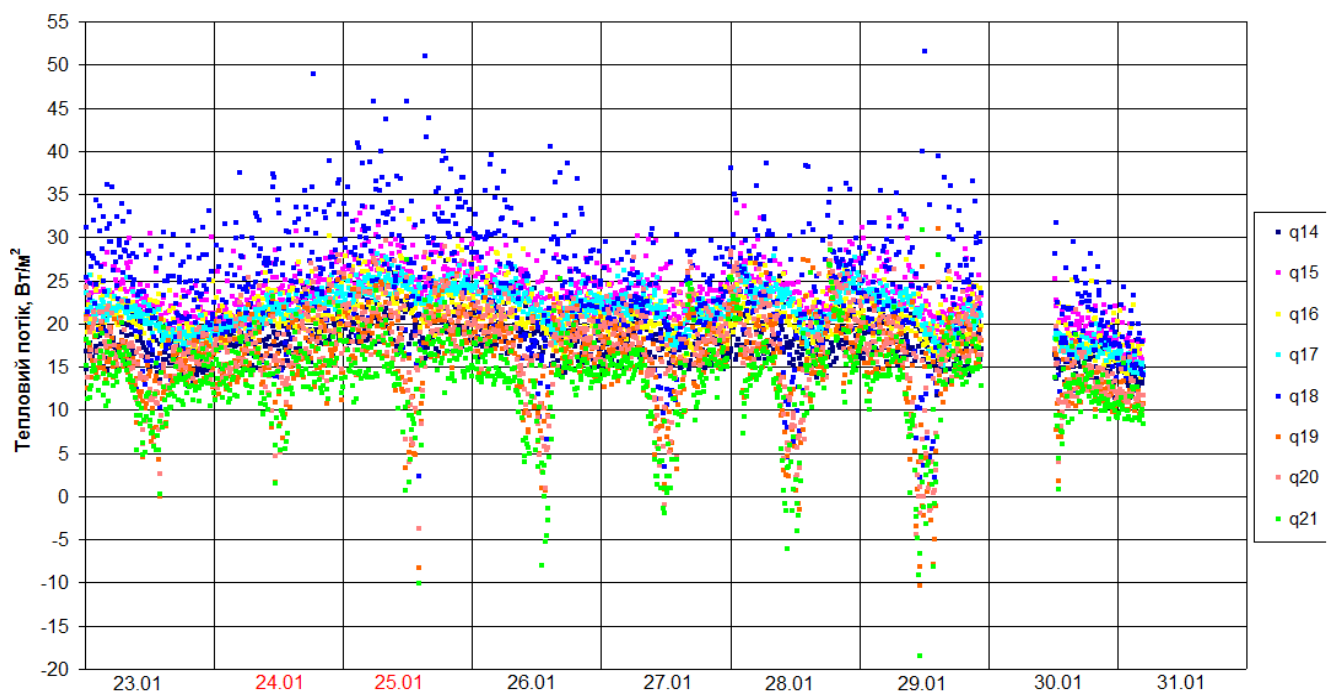


Рис. 4.3.3. Значення густини теплового потоку на поверхні шестикамерного профілю, датчики встановлені всередині приміщення і ззовні, період вимірювання - 23.01.2015 з 00:00 до 31.01.2015 - 04:50.

На рис. 4.3.4. Представлено значення опору теплопередачі визначено в досліджуваних точках.

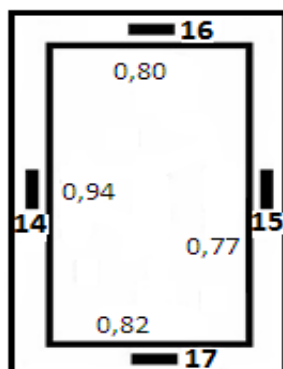


Рис. 4.3.4. Значення опору теплопередачі на поверхні шестикамерного профілю.

Експериментально визначене значення опору теплопередачі становить  $R_{o,експ}=0,83 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ . Виробник вказав -  $R_{н.з.}= 0,91 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ . Така розбіжність у значеннях опору теплопередачі змусила нас повторно провести експериментальні дослідження шестикамерного профілю. Вдруге нами було отримано теж саме значення опору теплопередачі. Тобто, виробники, з ціллю реклами і збільшення кількості продажу дорожчих моделей профілю, дещо завищують значення опору теплопередачі.

Характеристика експериментально встановленого опору теплопередачі та вказаної виробником показана на діаграмі рис. 4.3.5.

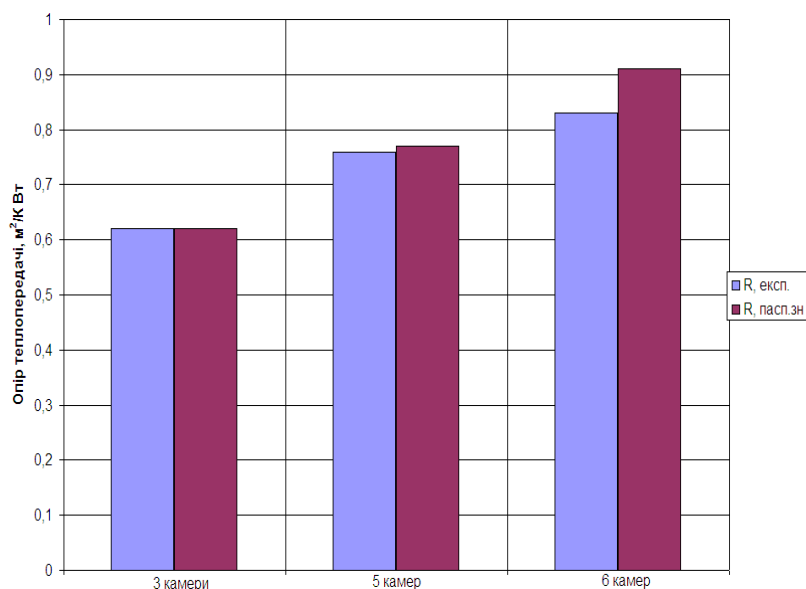


Рис. 4.3.5. Залежність опору теплопередачі від кількості камер у віконному профілі.

Виходячи з отриманих результатів експериментальних досліджень теплопередачі через віконні профілі, можна зробити висновок, що оптимальним варіантом для вибору і встановлення являється п'ятикамерний віконний профіль.

### **Висновки по 4 розділу та рекомендації щодо вибору та встановлення профілів віконних рам.**

Результати експериментальних досліджень опору теплопередачі, а також результати комп'ютерного CFD моделювання, вказують на наявність місточків холоду в конструкціях віконних профілів, що спричиняє суттєві тепловтрати. Збільшення кількості камер у профілі призводить до зменшення тепловтрат через профіль та через склопакет вцілому.

Шляхом збільшення кількості камер у профілі, що заповнені повітрям з низькою теплопровідністю, досягається високе значення опору теплопередачі.

Можливе додаткове утеплення віконного прорізу коробом для зменшення тепловтрат через віконну конструкцію. Передбачається, що короб має бути виготовлений з матеріалу із теплофізичними властивостями близькими до

пінобетону або деревних плит -  $\lambda = 0,095 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ,  $\rho = 0,36 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $c = 0,80 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ .

З ціллю зменшення радіаційного випромінювання, можливий варіант заповнення камер профілю заповненням полівінілхлоридом.

## **РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНОК ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ЧЕРЕЗ ФАСАДНІ СТІНИ З ВІКОННИМ СКЛОПАКЕТОМ.**

### **5.1. Методика системного врахування безперервної дії всієї сукупності кліматичних параметрів. Алгоритм опрацювання експериментальних даних.**

Розроблена методика системного врахування безперервної дії всіх проявів сонячної радіації (температури повітря і швидкості вітру) на теплопередачу в елементах зовнішніх огорожень будівель. «Слабкою ланкою» зовнішнього огороження будівель являються віконні прорізи. У зв'язку з цим, важливо оцінити вплив всіх факторів на теплопередачу через віконні елементи огороження. Звісно, необхідна експериментальна перевірка теоретичних моделей. Тому була поставлена задача експериментального дослідження тепловтрат через склопакети з врахуванням безперервної дії всієї сукупності кліматичних параметрів. В якості об'єкта обрані двокамерні віконні конструкції, встановлені замість звичайних вікон на північно-орієнтованій стіні адміністративного корпусу ІТТФ НАН України в м. Києві по вул. Булаховського, 2.

За допомогою створеного експериментального комплексу, який був представлений на рис.2.1.3 і 2.1.5 в 2 розділі, проводилися експериментальні дослідження теплопередачі через двокамерний склопакет  $4M_1-10-4M_1-10-4M_1$ . Дослідження проводилися протягом 18 діб з 30.12.2014 по 16.01.2015. Нижче представлені результати вимірювань і розрахунків для початкових (31.12.2014), серединних (7.01.2015) і кінцевих (15.01.2015) діб цього періоду.



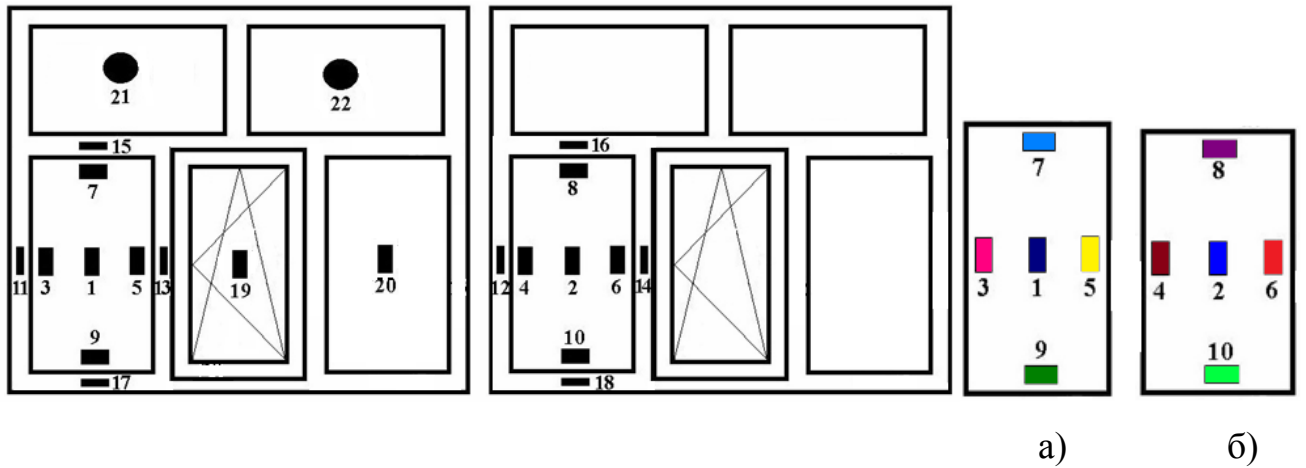


Рис. 5.1.1. Схема розміщення датчиків на двокамерному склопакеті, вигляд зсередини приміщення; а) датчики розміщені на склопакеті всередині приміщення; б) датчики розміщені на зовнішній поверхні склопакету.

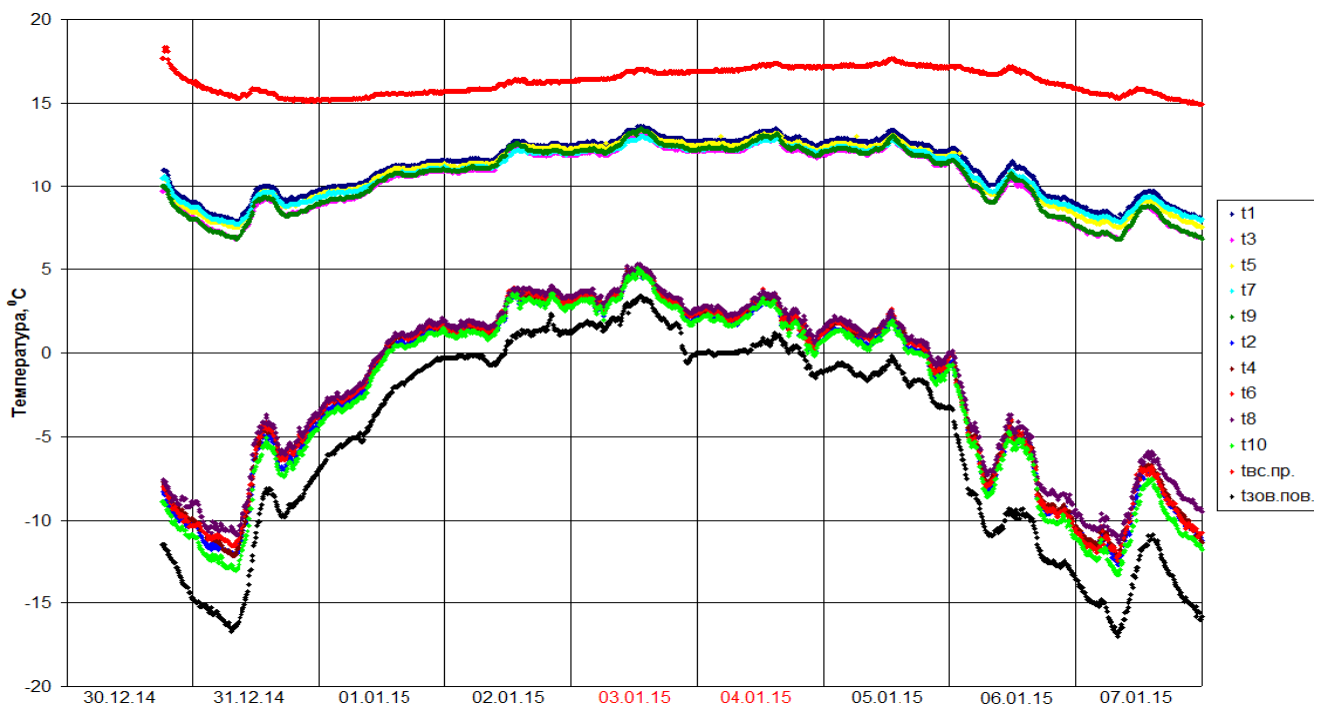


Рис. 5.1.2. Значення температури на внутрішній і зовнішній поверхні двокамерного склопакету 4M<sub>1</sub>-10-4 M<sub>1</sub>-10-4M<sub>1</sub>, та температури зовнішнього і внутрішнього повітря. Період вимірювання - 30.12.2014 з 00:00 до 07.01.2015 до 23:50.

На рис. 5.1.2. представлена частина експериментальних досліджень температурних характеристик двокамерного склопакету. Верхні криві це значення температури на датчиках на склопакеті всередині приміщення і температура всередині приміщення, а нижні – відповідно значення на датчиках зовні на склопакеті та зовнішнього повітря. Також наведено результати вимірювань густини теплового потоку за цей період. Характерними є від'ємні значення густини теплового потоку, що говорить про обернення теплового потоку.

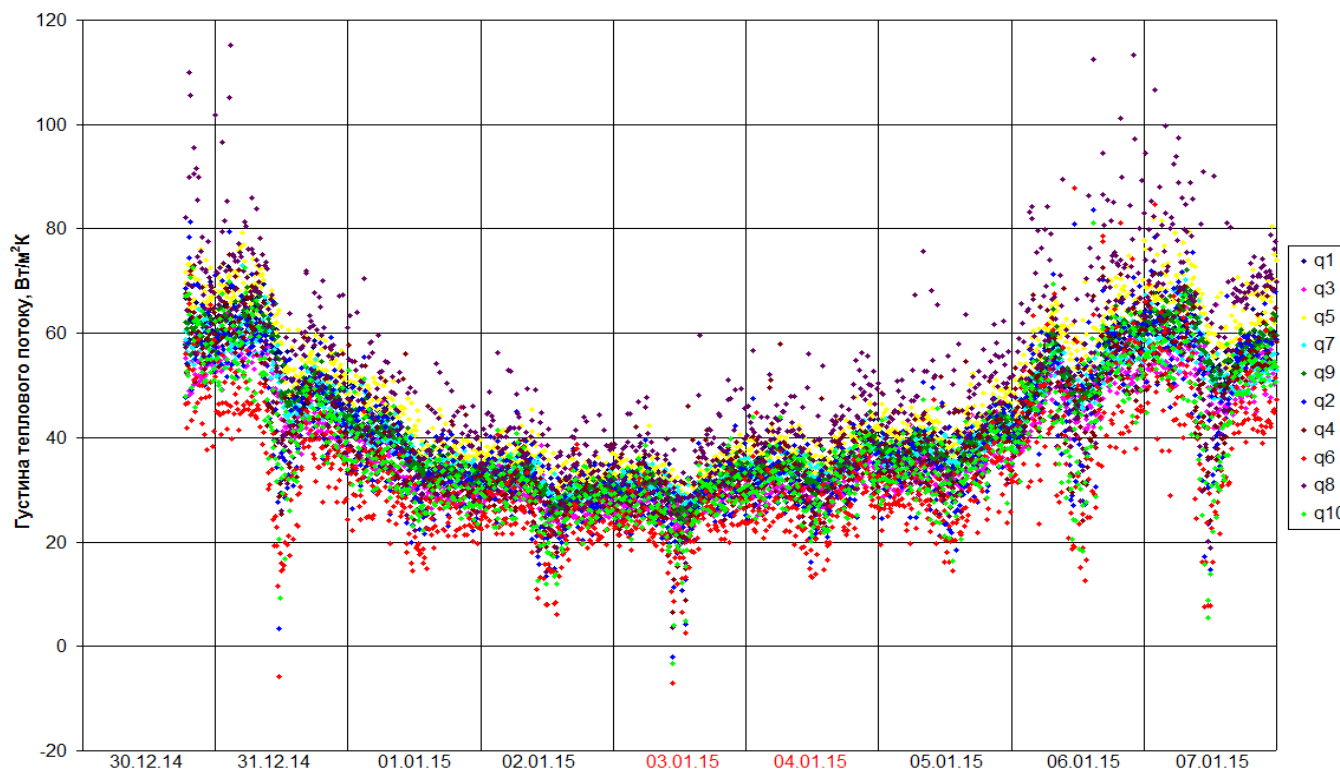


Рис. 5.1.3. Значення густини теплового потоку на поверхні двокамерного склопакету 4M<sub>1</sub>-10-4M<sub>1</sub>-10-4M<sub>1</sub>, датчики встановлені всередині приміщення і зовні, період вимірювання - 31.01.2015 з 13:50 до 08.02.2015 - 23:50.

Основні розміри віконної конструкції представлені на рис. 5.1.4 ( $H_1 = 0,376$  м,  $H_2 = 1,06$  м,  $L_1 = L_2 = 1,02$  м,  $L_3 = L_5 = 0,643$  м,  $L_4 = 0,563$  м). В якості детально досліджуваного об'єкту обраний нижній кутовий склопакет. На рисунку цифрами і буквами показані точки знаходження первинних вимірювальних засобів – температури  $T_i$  і густини теплового потоку  $q_i$  - на внутрішній (а) і зовнішній (б) поверхнях склопакета ( $i = 1, \dots, 6, a, \dots, y$ ).

Оскільки склопакети відносяться до комбінованих конструкцій, що виготовлені з матеріалів з різними теплофізичними властивостями, то звичайно, слід очікувати нерівномірність розподілу теплових потоків по поверхні склопакетів. Було порівняно густини теплових потоків на внутрішній поверхні вікна в точках a, b, c, d зі значенням в центральній точці l:  $q^{\circ}_{i,l} = q_i/q_l$ , де  $i = a, b, c, d$ . Результати підрахунків для діб початку, середини і кінця експериментального циклу представлені на рис. 9.4 - 9.6. Там же наведені лінії тренду та їх рівняння в формі -  $y = \langle q^{\circ}_{i,l} \rangle(t); x = t$ .

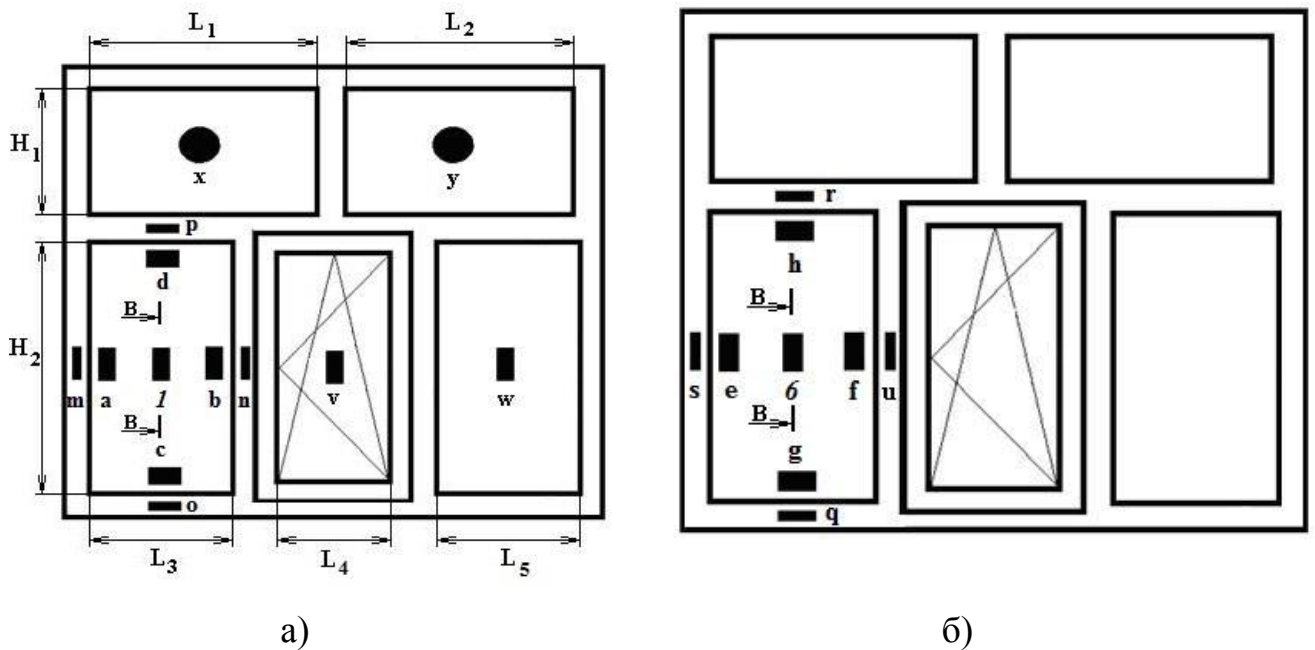


Рис. 5.1.4. Схема установки датчиків на внутрішній (а) та зовнішній (б) поверхнях. Вид зсередини приміщення.

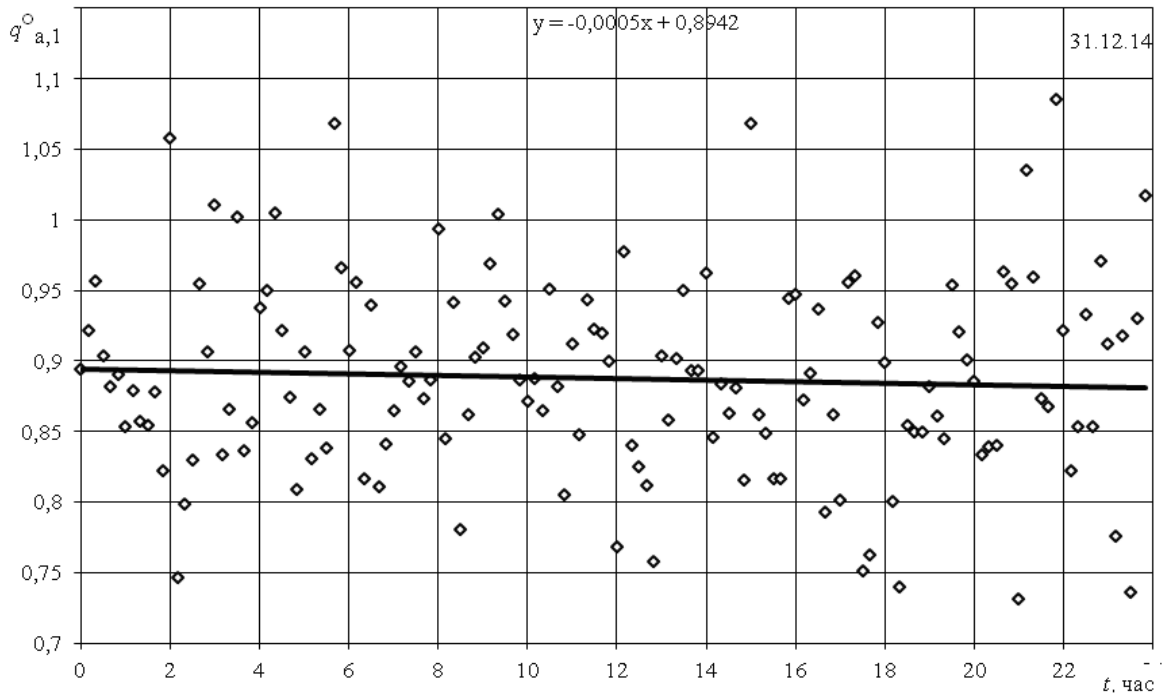


Рис.5.1.3. Вплив периферійної області бокового фрагмента (а) склопакета на тепловий потік в центральній його частині протягом доби 31.12.14.

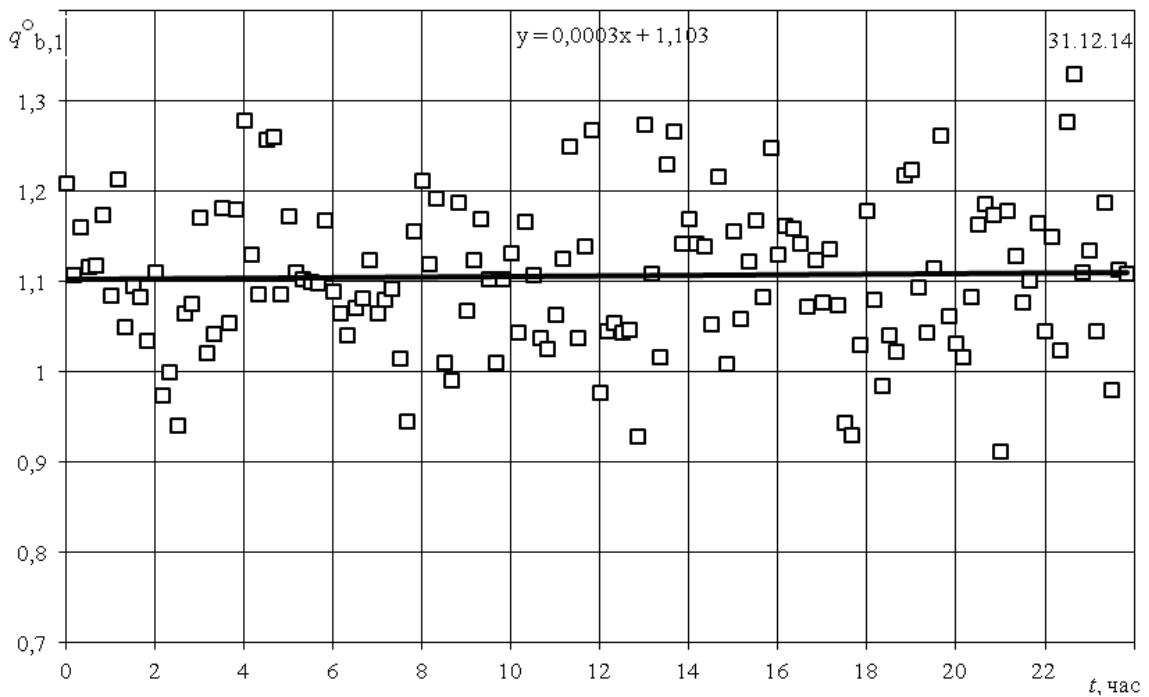


Рис.5.1.4. Вплив периферійної області бокового фрагмента (b) склопакета на тепловий потік в центральній його частині протягом доби 31.12.14.

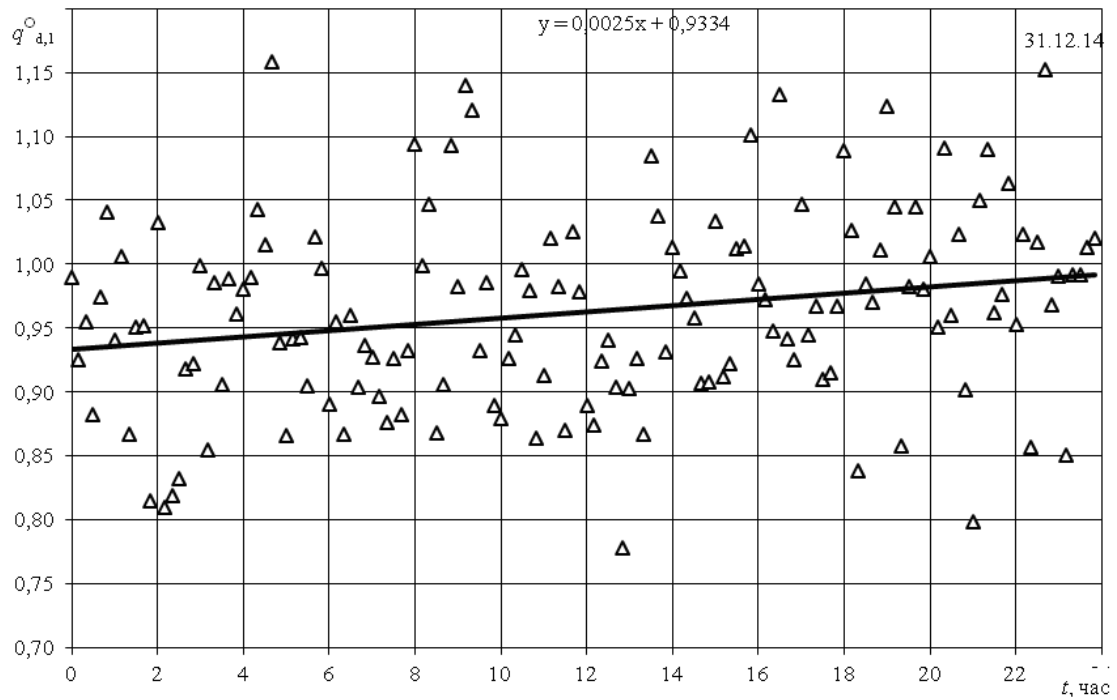


Рис.5.1.5. Вплив периферійної області бокового фрагмента (d) склопакета на тепловий потік в центральній його частині протягом доби 31.12.14.

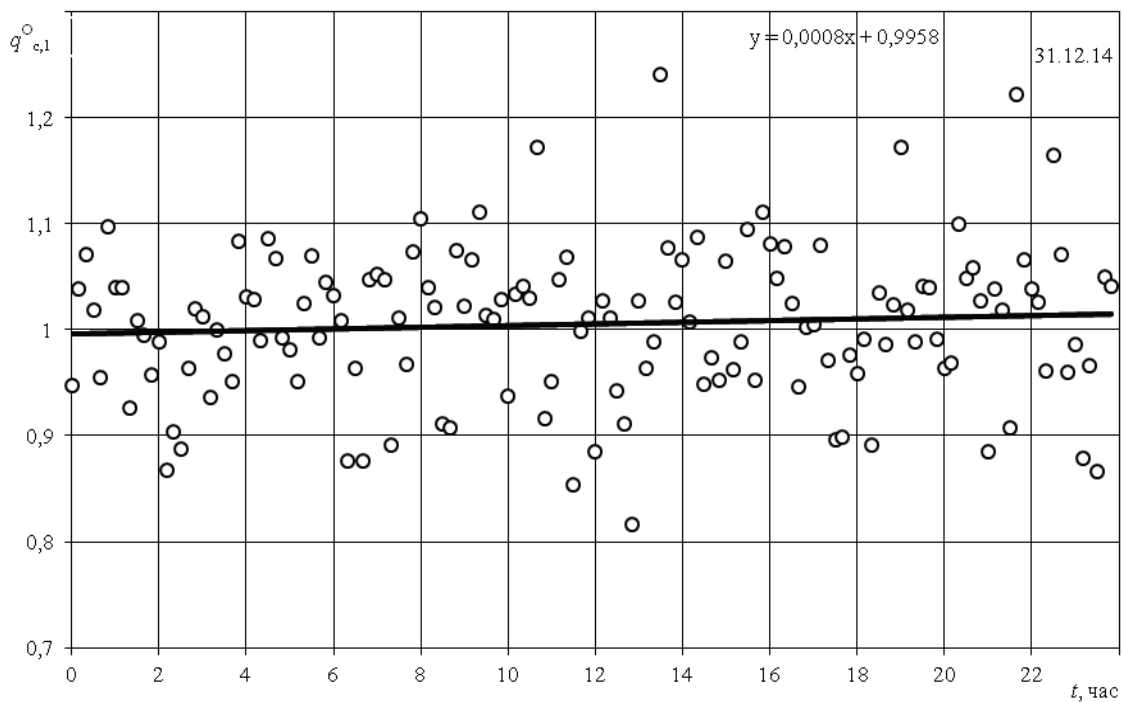


Рис.5.1.6. Вплив периферійної області бокового фрагмента (c) склопакета на тепловий потік в центральній його частині протягом доби 31.12.14.

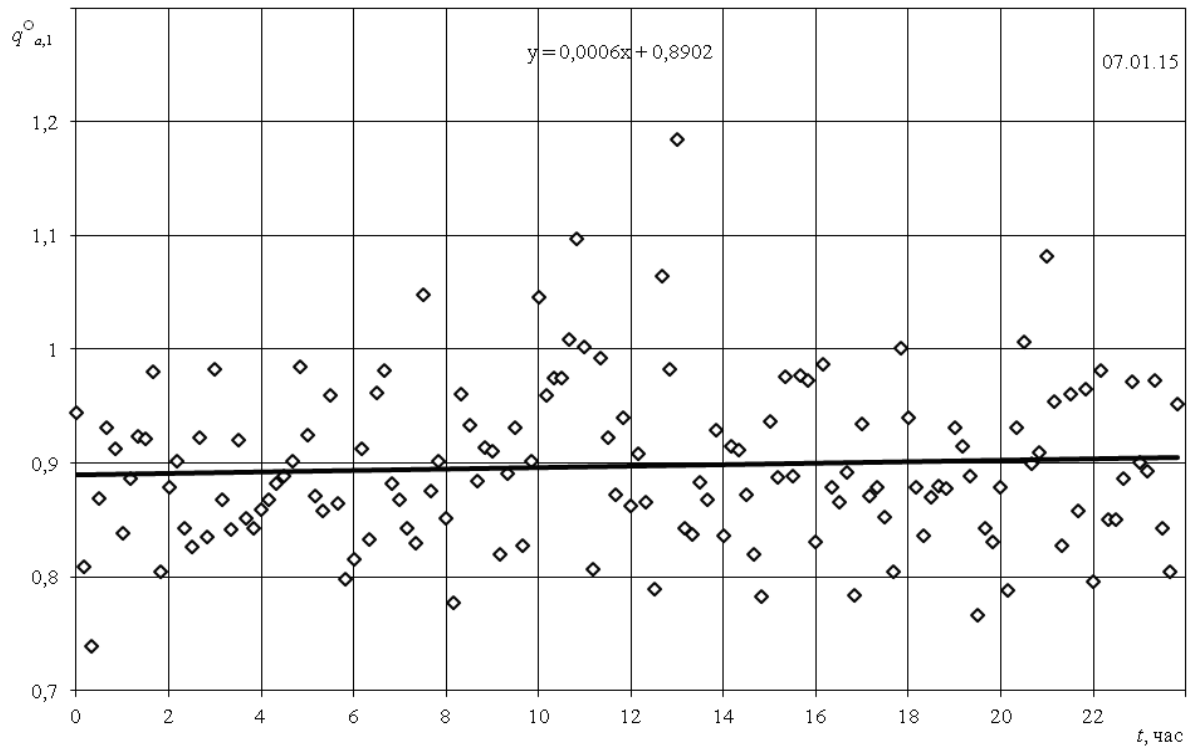


Рис.5.1.7. Вплив периферійної області бокового фрагмента (а) склопакета на тепловий потік в центральній його частині протягом доби 07.01.15.

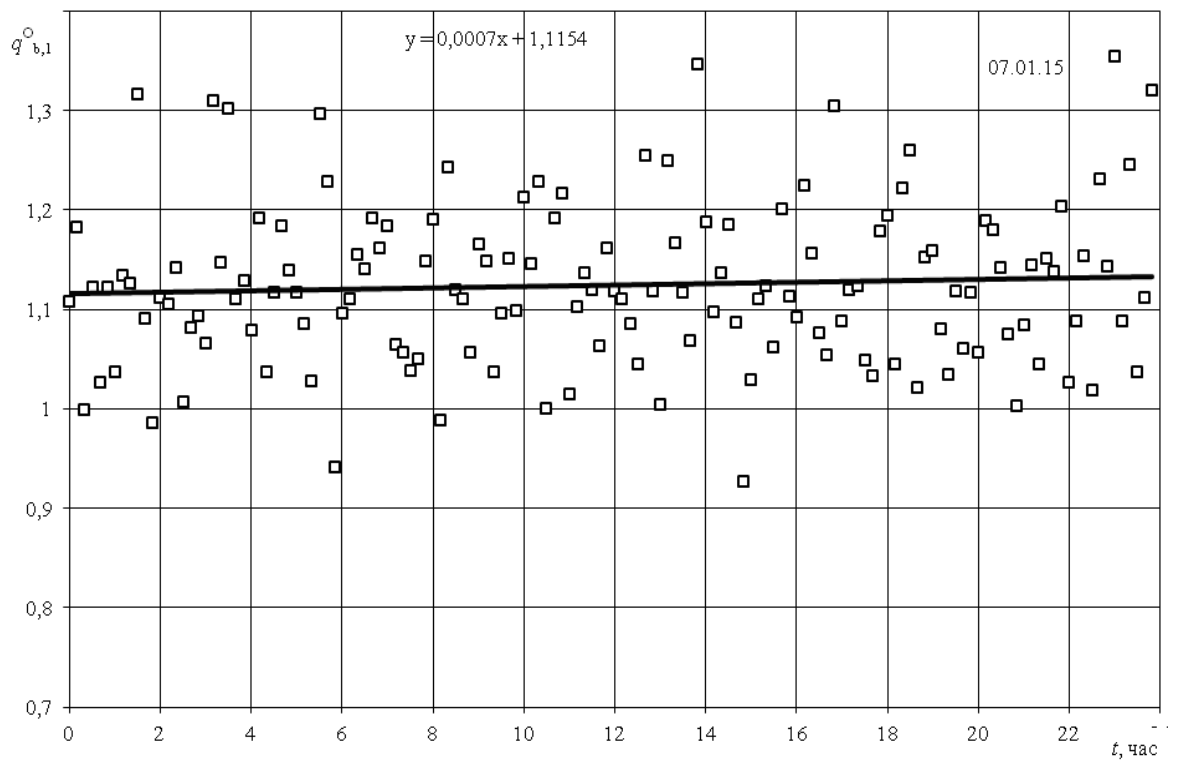


Рис.5.1.8. Вплив периферійної області бокового фрагмента (b) склопакета на тепловий потік в центральній його частині протягом доби 07.01.15.

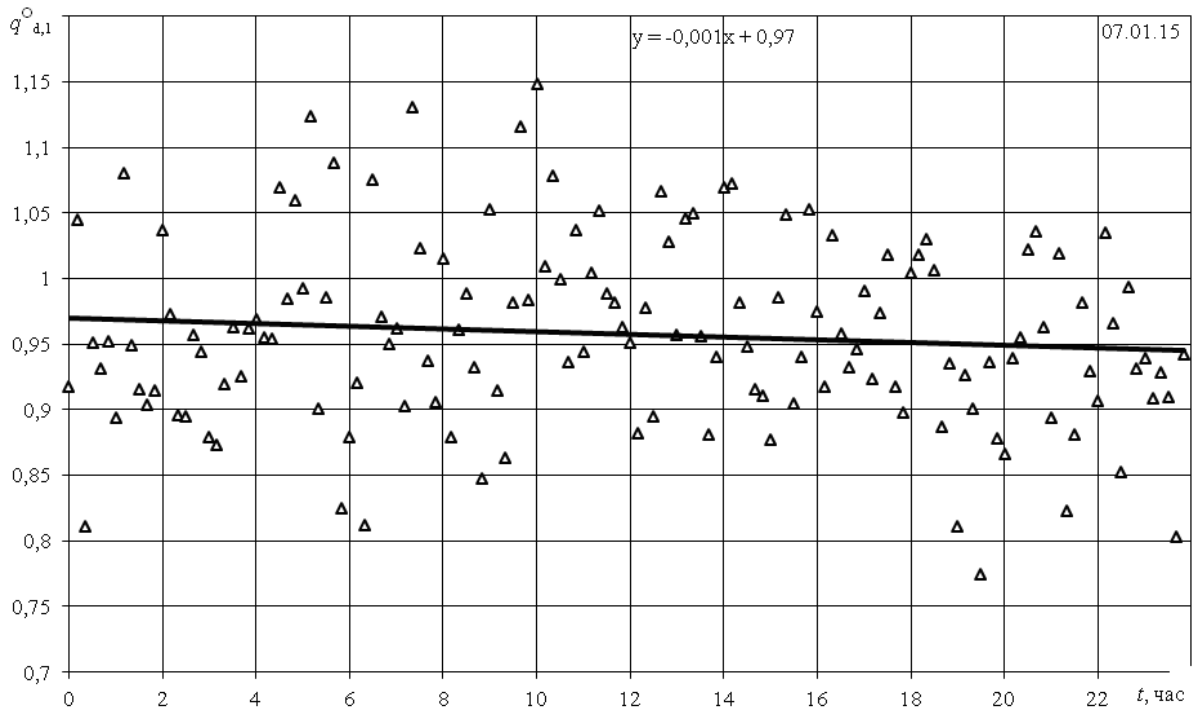


Рис.5.1.9. Вплив периферійної області бокового фрагмента (d) склопакета на тепловий потік в центральній його частині протягом доби 07.01.15.

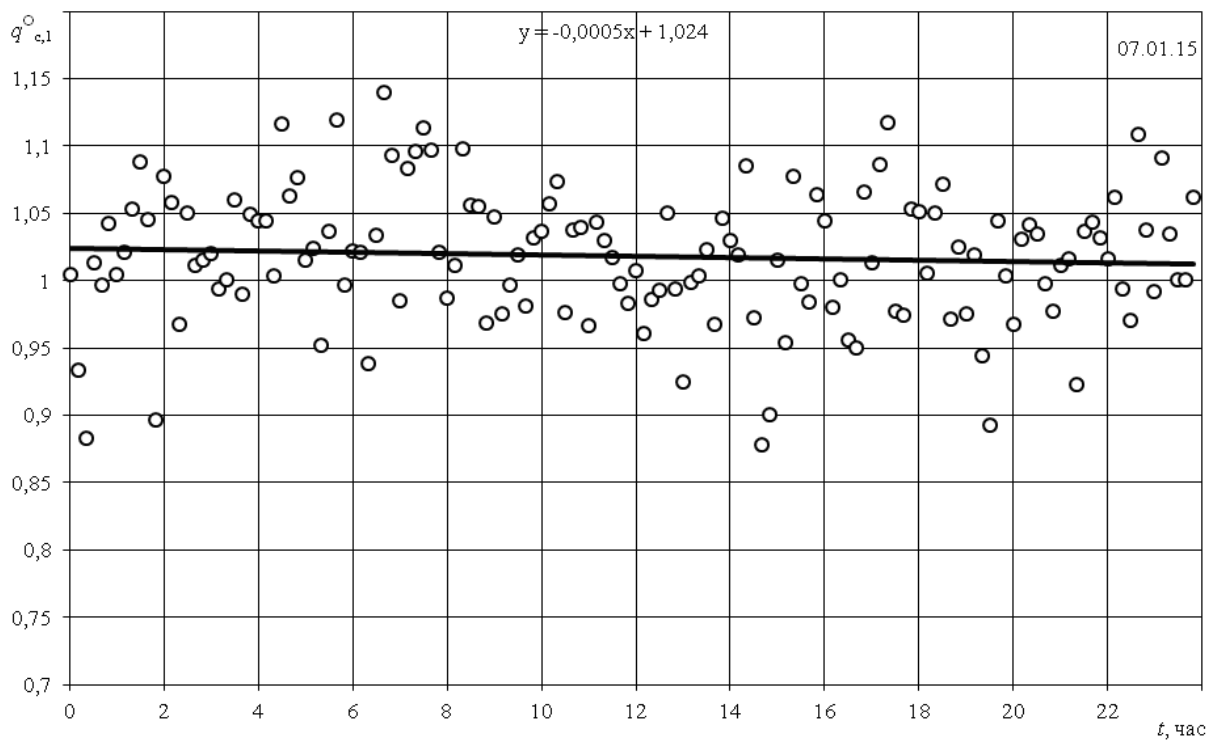


Рис.5.1.10. Вплив периферійної області бокового фрагмента (c) склопакета на тепловий потік в центральній його частині протягом доби 07.01.15.

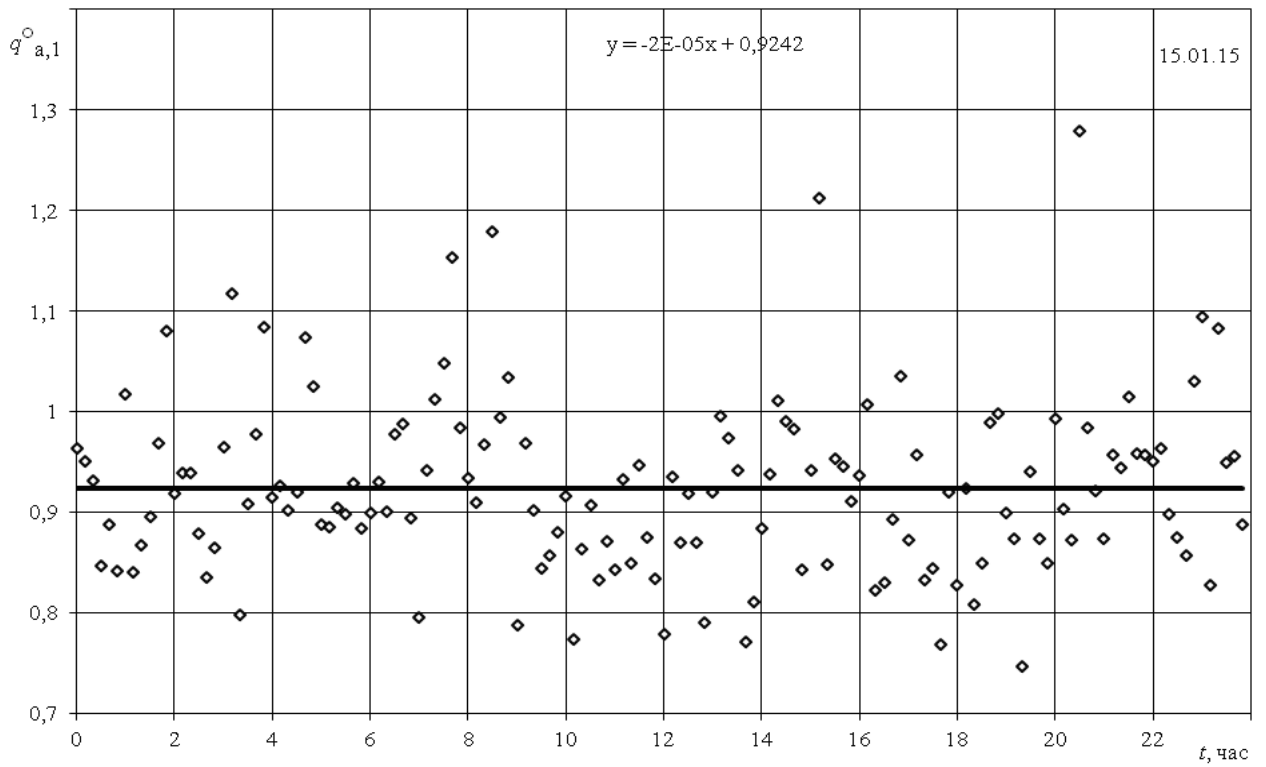


Рис.5.1.11. Вплив периферійної області бокового фрагмента (а) склопакета на тепловий потік в центральній його частині протягом доби 15.01.15.

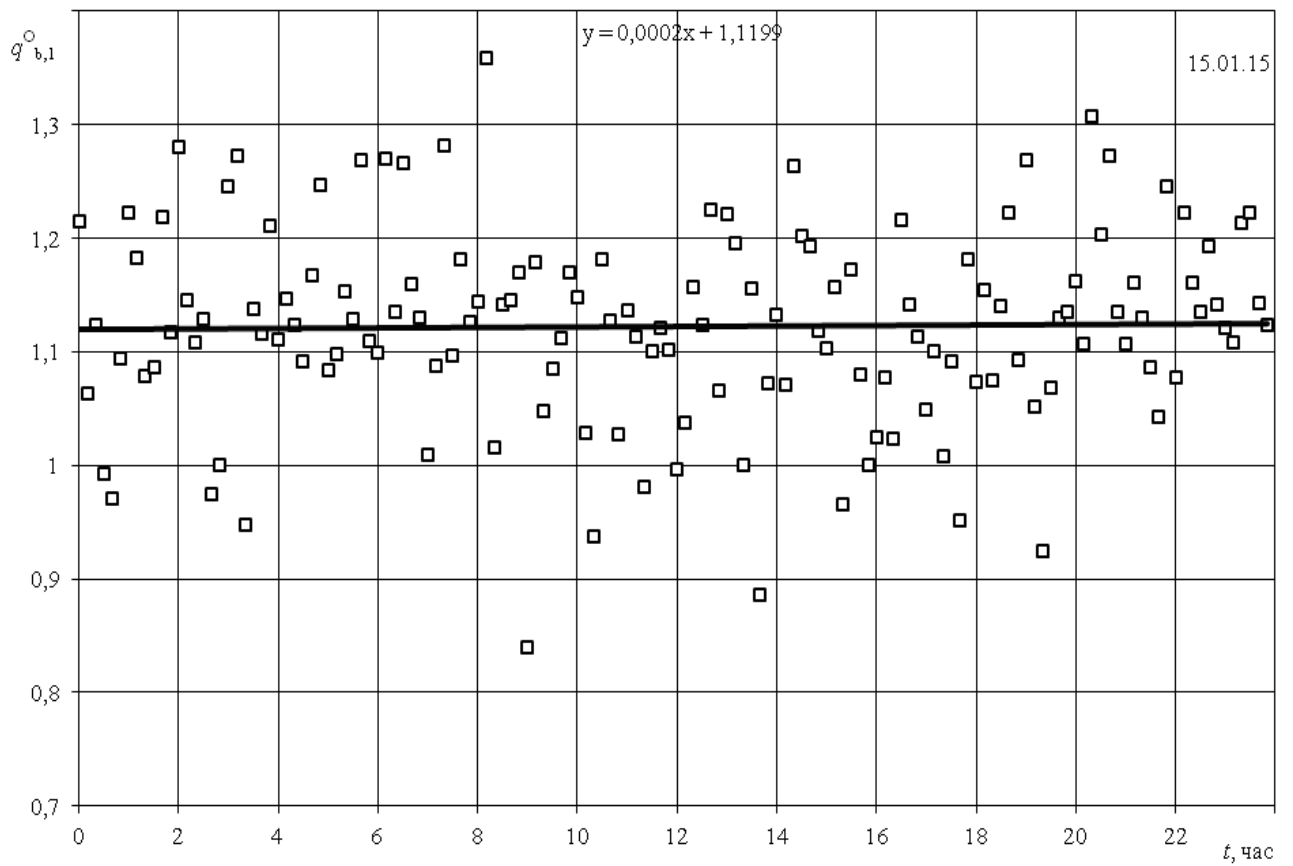




Рис.5.1.12. Вплив периферійної області бокового фрагмента (b) склопакета на тепловий потік в центральній його частині протягом доби 15.01.15.

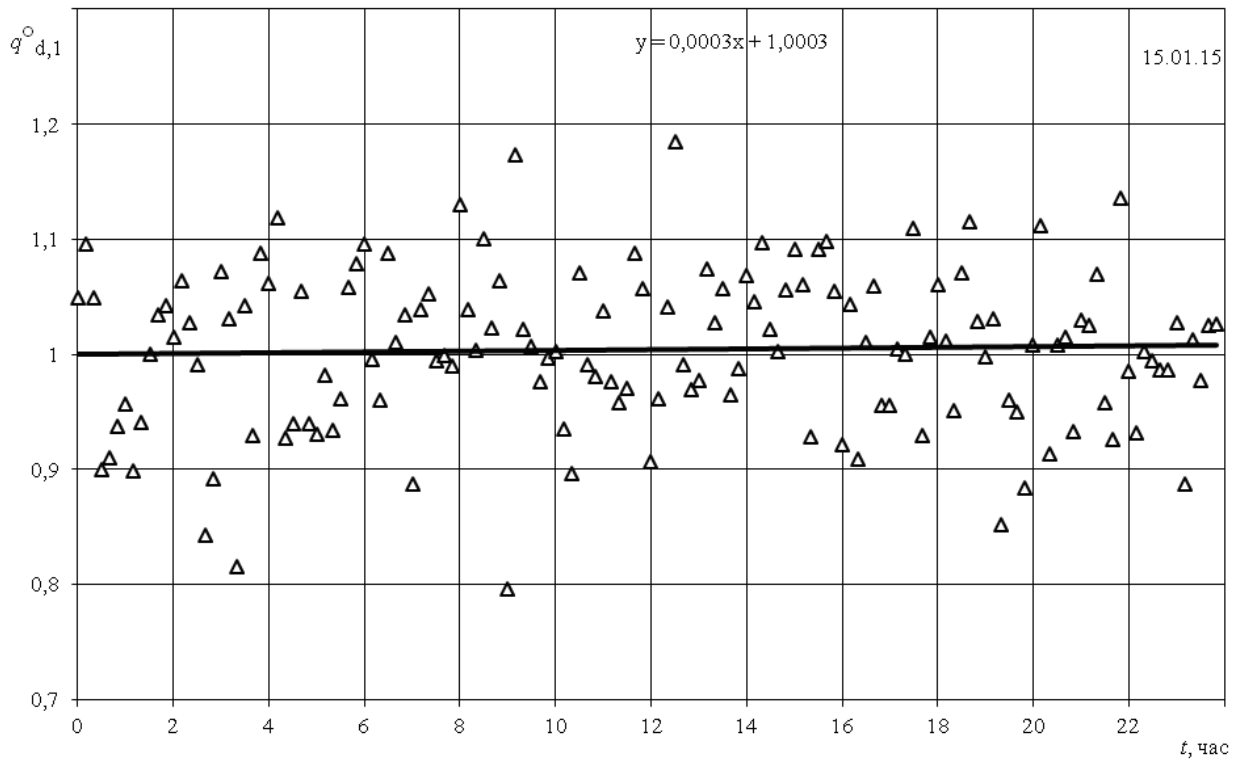


Рис.5.1.13. Вплив периферійної області бокового фрагмента (d) склопакета на тепловий потік в центральній його частині протягом доби 15.01.15.

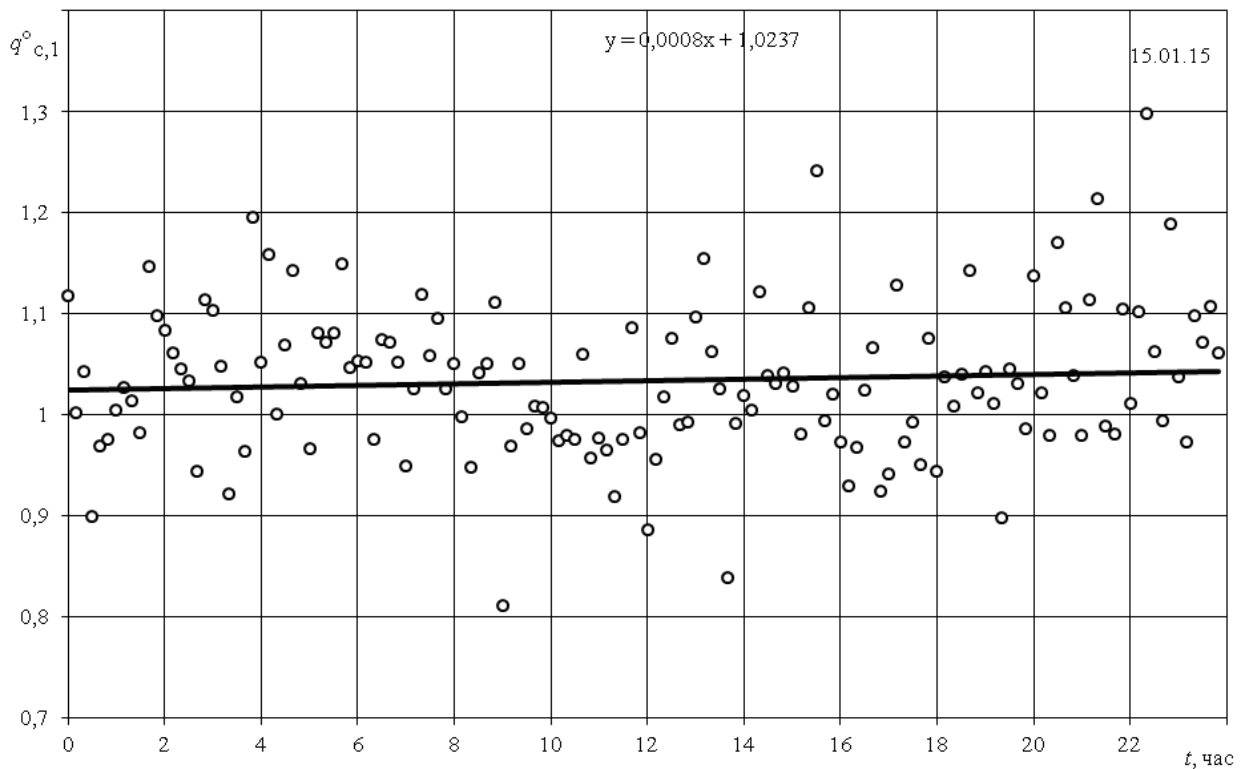


Рис.5.1.14. Вплив периферійної області бокового фрагмента (с) склопакета на тепловий потік в центральній його частині протягом доби 15.01.15.

Очевидно, що на зону з точкою (а) впливає стіна з більшим тепловим опором, ніж склопакет ( $\langle q_{a,l}^{\circ} \rangle \sim 0,9$ ), а на область з точкою (b) – профіль з меншим тепловим опором ( $\langle q_{b,l}^{\circ} \rangle \sim 1,1$ ). По вертикалі (точки с і d) відхилення від  $q_l$  менше, що обумовлено, дією вертикальної конвекції ( $\langle q_{c,l}^{\circ} \rangle \sim 1,0$ ;  $\langle q_{d,l}^{\circ} \rangle \sim 0,95 \div 1,0$ ). Незважаючи на відмінності зовнішніх кліматичних умов протягом 31.12.14, 7.01.15, 15.01.15, трендові значення безрозмірних величин  $\langle q_{i,l}^{\circ} \rangle$  достатньо стабільні (рис. 5.1.3 – 5.1.14).

Наведені тут дані дозволяють зробити висновок, що в якості представницьких значень величин для склопакета в цілому можна орієнтуватися на значення величин в центральних точках склопакета, що і було реалізовано нижче.

## 5.2. Верифікація моделі по експериментальних даних для двокамерного склопакету на північній стороні будівлі (30.12.2014 до 16.01.2015).

Результати експерименту вважалися достовірними (як мінімум несуперечливими), якщо густини теплових потоків  $q(t)$  в центральних точках, підрахованих по експериментальних даних  $T_1(t)$  і  $T_6(t)$ , корелюються з експериментальними даними  $q_e(t)$  в цих точках. Оскільки число Релея для повітряних камер склопакетів не перевищувало  $1,2 \cdot 10^3$ , то впливом конвективної складової теплопереносу в міжскляних камерах можна знехтувати [24, 25] і допустимо користуватися формулою

$$Ra = \frac{g\beta\delta_{i,i+1}\Delta T_{i,i+1}}{\nu\alpha} \quad (i = 2,4), \quad (5.2.1)$$

$$q(t) = \frac{T_1(t) - T_6(t)}{\frac{\delta_{1,2}}{\lambda_{1,2}} + \frac{1}{\frac{\lambda_{2,3}}{\delta_{2,3}} + C_{2,3}^+(t)} + \frac{\delta_{3,4}}{\lambda_{3,4}} + \frac{1}{\frac{\lambda_{4,5}}{\delta_{4,5}} + C_{4,5}^+(t)} + \frac{\delta_{5,6}}{\lambda_{5,6}}}, \quad (5.2.2)$$

Коефіцієнти радіаційної тепловіддачі між  $i$  і  $i+1$  скляними поверхнями знаходились згідно з [17]:

$$C_{i,i+1}^+ = \frac{1,163}{\left(\frac{1}{4,65} + \frac{1}{4,65} - \frac{1}{4,96}\right)(T_i - T_{i+1})} \left[ \left(\frac{T_i + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{i+1} + 273}{100}\right)^4 \right]. \quad (5.2.3)$$

Емпіричні дані  $T_1(t)$  і  $T_6(t)$  апроксимувалися сукупністю степеневих поліномів на добовому інтервалі при достовірності не менше 92 – 95 %.

При задоволенні умов несуперечності експериментальних даних наступним етапом було встановлення залежностей, що коректно відображають дію внутрішніх і зовнішніх факторів на теплопередачу через склопакет. А саме – вплив внутрішньої температури приміщення  $T_{\text{вн}}$  і сукупності зовнішніх параметрів (температури зовнішнього повітря  $T_{\text{зов}}$ , швидкості вітру  $v$ , дії сонячної радіації з густиною теплового потоку  $q_s$ ).

Нижче при виборі розрахункових залежностей орієнтувались на рекомендовані в будівельній теплотехніці залежності для конвективного теплообміну по обох сторонах зовнішніх огорожень [16, 17]:

$$\alpha_{\text{вн},l} = 1,163 \cdot 1,43 \sqrt{(T_{\text{вн}} - T_l)}, \quad \alpha_{6,\text{зов}} = 1,163 \cdot (6,35v^{0,656} + 3,25e^{-1,91v}), \quad (5.2.4)$$

а також на загальноприйняті формули для коефіцієнтів радіаційної тепловіддачі:

$$C_{\text{вн},l}^+ = \frac{1,163}{\left(\frac{1}{4,50} + \frac{1}{4,65} - \frac{1}{4,96}\right)(T_{\text{вн}} - T_l)} \left[ \left(\frac{T_{\text{вн}} + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_l + 273}{100}\right)^4 \right],$$

$$C_{6,\text{зов}}^+ = \frac{1,163}{\left(\frac{1}{4,65} + \frac{1}{4,96} - \frac{1}{4,96}\right)(T_6 - T_{\text{зов}})} \left[ \left(\frac{T_6 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{зов}} + 273}{100}\right)^4 \right]. \quad (5.2.5)$$

При визначенні коефіцієнтів, що характеризують ступінь чорноти поверхонь, вважалося, що внутрішні поверхні приміщень оштукатурені, а зовнішні мають сірий колір. Поява коефіцієнта 1,163 в формулах (5.2.3) – (5.2.5) викликано перерахунком параметрів ккал/годин в Ватти.

Густина інсоляції визначається залежностями, що впливають із даних, наведених в [19, 68 - 70]:

$$q_s = \frac{\pi U_{\pi/2}}{2(t_{3x} - t_{bx})} \sin\left(\pi \frac{t - t_{bx}}{t_{3x} - t_{bx}}\right) \quad t \in [t_{bx}, t_{3x}], \quad q_s = 0 \quad t \in [t_{3x}, t_{bx}], \quad (5.2.6)$$

де  $U_{\pi/2} = U_{s\uparrow} + 0,5U_{d\leftrightarrow} + 0,5A(U_{s\leftrightarrow} + U_{d\leftrightarrow})$ .

Підкреслимо, що величина (5.2.6) істотно залежить від орієнтації вертикальної поверхні відносно сторін світу.

Температура всередині приміщення повинна відповідати співвідношенню:

$$T_{\text{вн}} = \frac{q}{\alpha_{\text{вн}} + C_{\text{вн},l}^+} + T_l, \quad (5.2.7)$$

а температура зовнішнього повітря співвідношенню:

$$T_{\text{зов}} = T_6 - \frac{q + q_s}{\alpha_{\text{зов}} + C_{6,\text{зов}}^+}. \quad (5.2.8)$$

Зіставлення розрахункових і експериментальних значень  $T_{\text{вн}}(t)$  і  $T_{\text{зов}}(t)$  визначає міру коректності використання залежностей (5.2.4). Якщо співставлення виявиться незадовільним, то слід вносити корективи в (5.2.4).

Необхідно брати до уваги наступне. Зафіксовані в експериментах значення  $T_{\text{вн}}(t)$  і  $T_{\text{зов}}(t)$  в певному сенсі є «маркерами», до яких повинні наближатися однойменні розрахункові функції. Термін «маркер» тут вибрано, щоб підкреслити, що експериментальні величини  $T_{\text{вн}}(t)$  і  $T_{\text{зов}}(t)$  через знаходження датчиків поблизу склопакета неповністю адекватні температурі всередині приміщення і метеорологічній температурі повітря в даній місцевості. Особливо це стосується останнього параметра. Тому слід очікувати деяких розбіжностей розрахункових і експериментальних значень, особливо для  $T_{\text{зов}}$ .

Цілорічні дані про зміну швидкості вітру  $v(t)$ , часу сходу  $t_{\text{сх}}(t)$  і заходу  $t_{\text{зх}}(t)$  Сонця, прямої  $U_c(t)$  і розсіяної  $U_d(t)$  радіації встановлюються за даними гідрометеослужби для даної місцевості з врахуванням орієнтації вертикальної поверхні будівлі. В роботі використовувалися значення зазначених параметрів для м. Києва [69, 70] шляхом рівномірного розподілу відповідних середньомісячних значень на кожен добу місяця.

Система рівнянь (5.2.2) – (5.2.8) дозволяє визначити функції  $q(t)$ ,  $q_s(t)$ ,  $T_b(t)$ ,  $T_n(t)$ ,  $T_i(t)$   $i = 2, \dots, 5$ . Вирішення здійснювалося чисельно з малим часовим кроком (5 с), що дозволило відмовитися від ітерацій, які слідує із структури рівнянь (5.2.3) і (5.2.5).

Як вже зазначалося, безперервна фіксація експериментальних даних з кроком 10 хвилин була здійснена з 30.12.2014 г. по 16.01.2015 р. Результати обробки їх по зазначеній вище методиці представлені на рис. 5.3.1 – 5.3.3 для початку, середини і кінця періоду вимірювань.

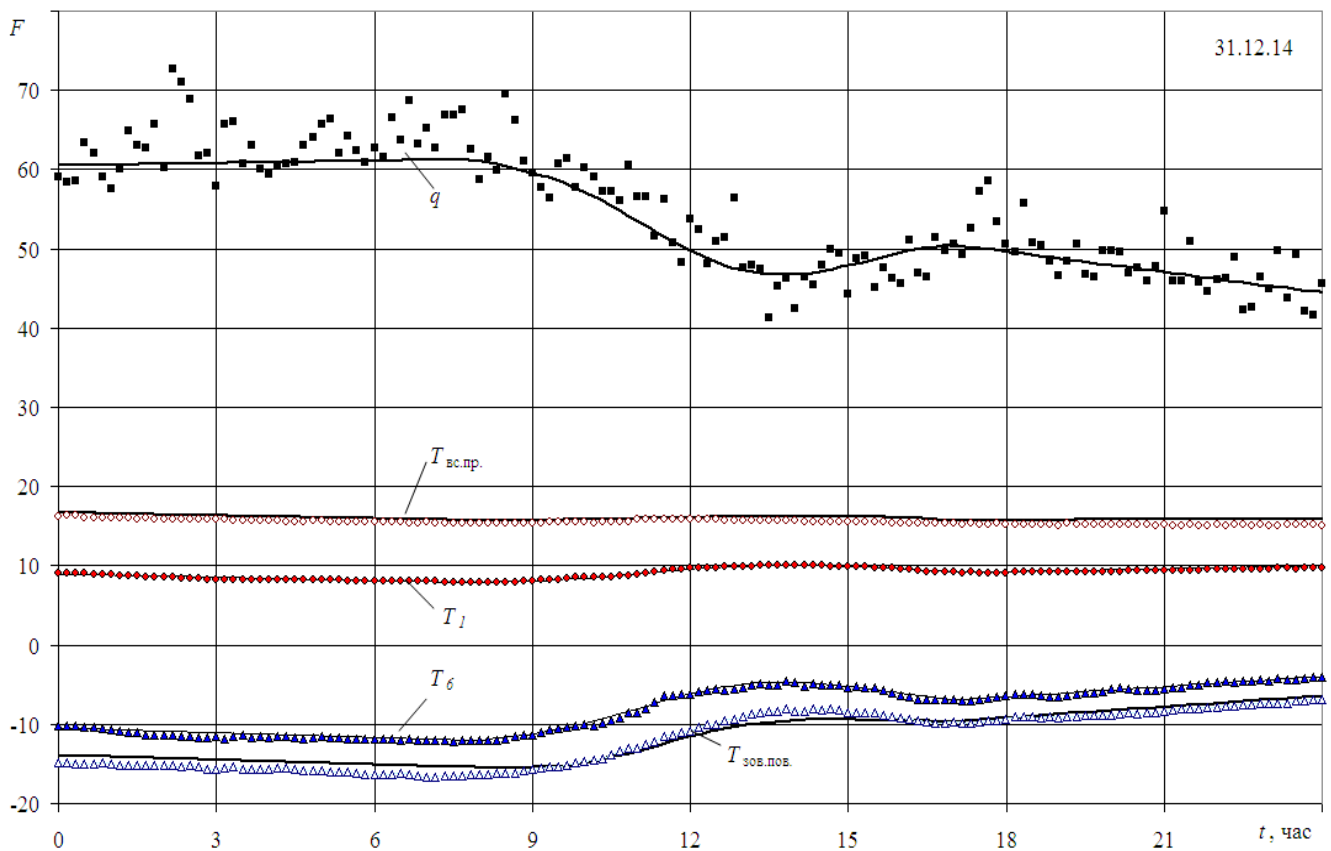


Рис. 5.3.1. Реалізація методики по даних за 31.12.14.

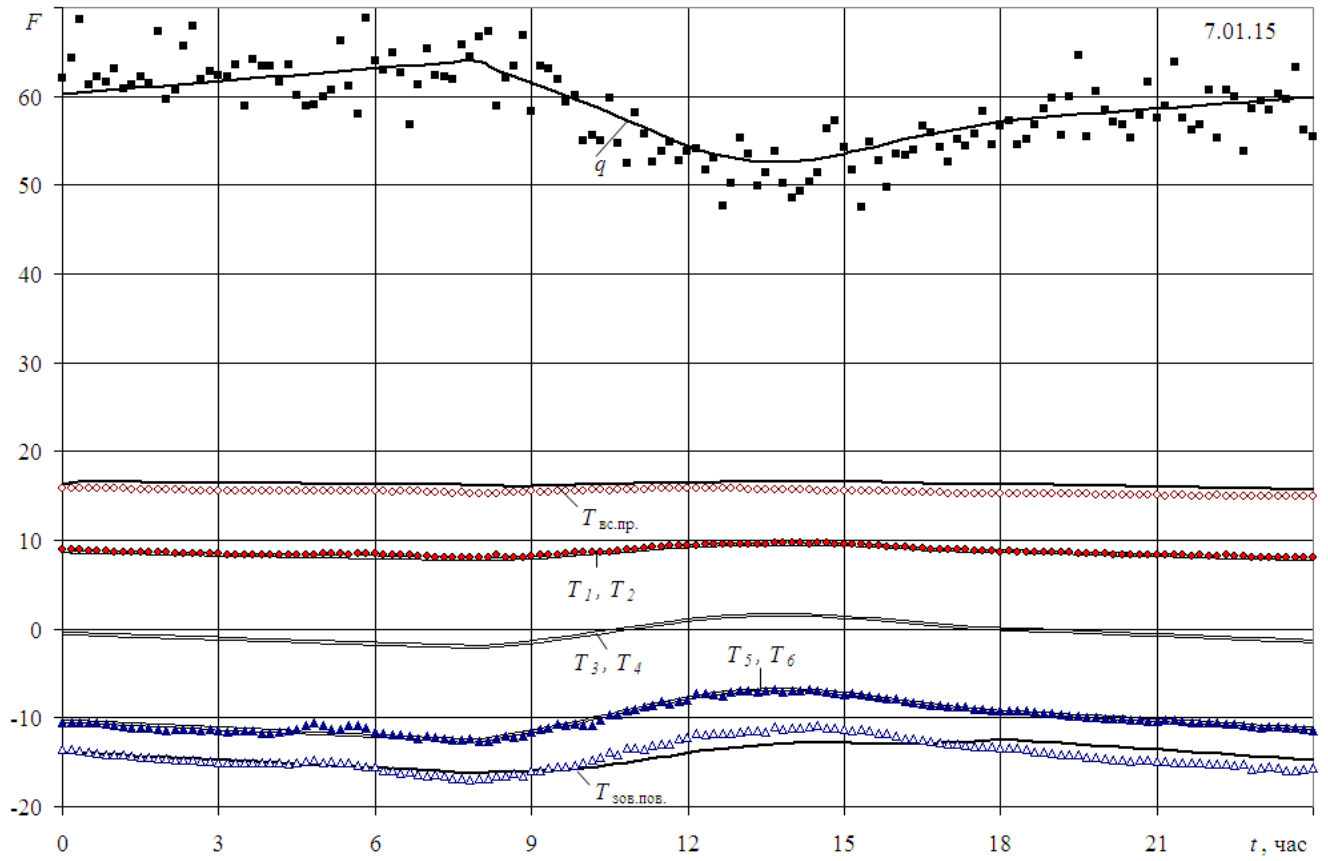


Рис. 5.3.2. Реалізація методики по даних за 7.01.15.

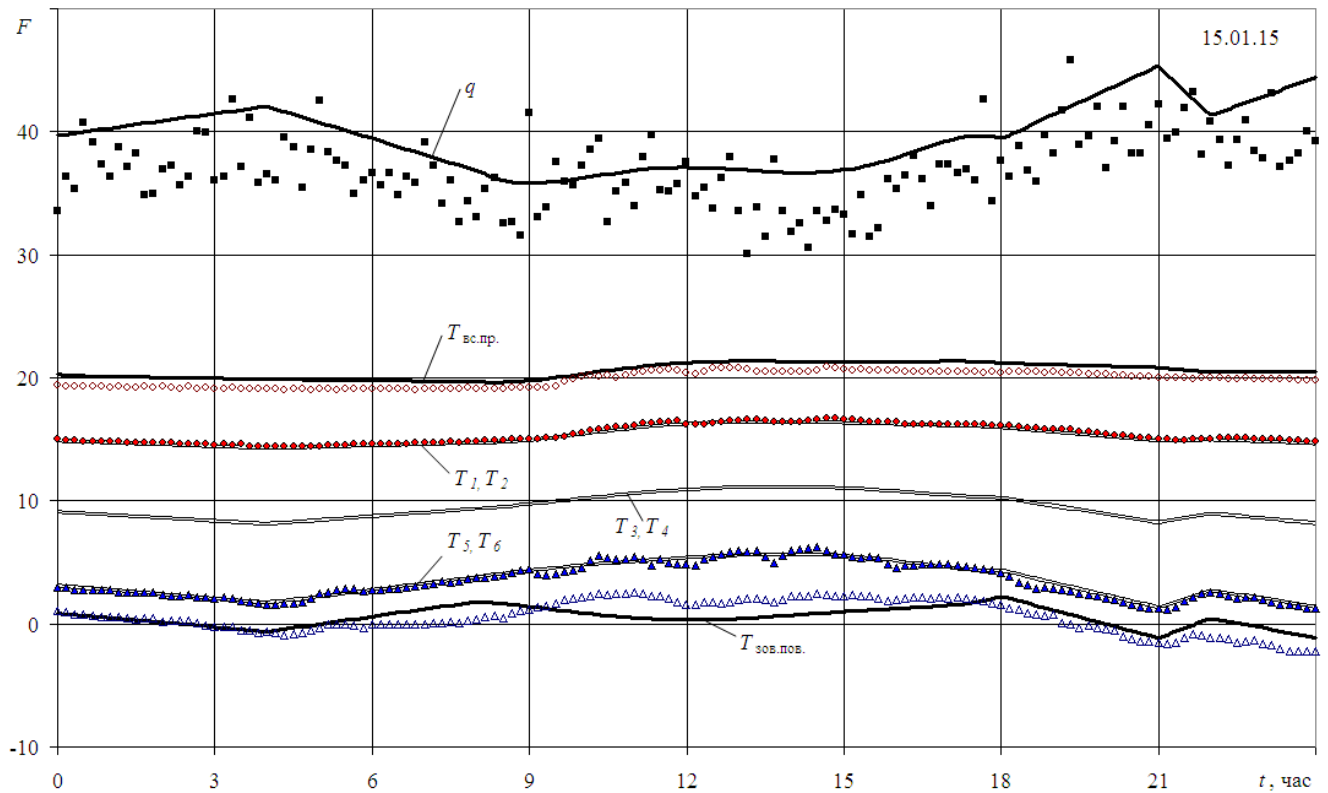


Рис. 5.3.3. Реалізація методики по даних за 15.01.15

Незважаючи на північну орієнтацію склопакета, чітко простежується дія сонячної радіації з 8 до 18 годин. Це виражається у формі зниження значень густини теплового потоку  $q$  на цьому інтервалі. Узгодження розрахункових і експериментальних даних по  $q$ ,  $T_{\text{вн}}$  і  $T_{\text{зов}}$  задовільне. Поведінка функцій 15.01.15 дещо відрізняється від характеру, виявленого раніше - 31.12.14 і 07.01.15. На нашу думку, це пов'язано з істотним потеплінням в цей день, коли температура зовнішнього повітря була близько 0 °С. Характерно для цього дня і незвичайне підвищення температури  $T_6$  як в передсвітанкові години доби, так і після 21 години. Це призвело до необхідності підвищення числа апроксимаційних ділянок для  $T_1(t)$  і  $T_6(t)$  до 6 на добовому інтервалі. На рис. 5.3.1 і 5.3.3 нанесені розрахункові значення температур  $T_3$  і  $T_4$ . Можна констатувати допустимість використання співвідношень (5.2.4) для розрахунку конвективного теплопереносу на обох поверхнях склопакета і коректність розрахункового алгоритму [56, 58, 59, 61, 78].

Запропонований алгоритм опрацювання безперервно зафіксованих експериментальних даних по теплопередачі через склопакети з врахуванням впливу всієї сукупності кліматичних факторів дозволяє більш обґрунтовано визначити річні тепловтрати через склопакети. Він враховує всі природні фактори: альбедо, час сходу і заходу сонця, швидкість вітру, добову густину енергії, коефіцієнт тепловіддачі, температурний коефіцієнт об'ємного розширення, коефіцієнти теплопровідності і кінематичної в'язкості, коефіцієнт температуропровідності і променевої тепловіддачі, а також всі отримані експериментальні дані в кожній точці вимірювання.

### **5.3. Теплофізична модель розрахунку тепловтрат через двокамерний вентиляований склопакет.**

Як було встановлено в попередніх розділах, тепловтрати крізь вікна в зовнішніх огороженнях будівлі значно більше тепловтрат через суцільну стінову частину огороження. Так, для стіни з тепловим опором, еквівалентним опору

огороження товщиною в дві цеглини, питома річна витрата теплоти в середніх широтах північної півкулі Землі складе біля 190 МДж/м<sup>2</sup>. Це б дозволило орієнтуватися на витрату енергії на опалення близько 24 кВт·годин на кв. м площі приміщення. Якщо використовувати багатошарові стінові конструкції з підвищеним тепловим опором, то можна домогтися і більш низьких значень - відповідно 30 МДж/м<sup>2</sup> і 4 кВт·годин на кв. м площі. Перешкодою на шляху досягнення таких показників для всього огороження виявилися вікна. Для однокамерного склопакета питомі тепловтрати складуть 990 МДж/м<sup>2</sup>, для двокамерного – 660 МДж/м<sup>2</sup>, для трикамерного – 480 МДж/м<sup>2</sup>. Таким чином, подальше збільшення числа камер виявиться малоефективним. Тому слід обмежитися двокамерними склопакетами і шукати способи підвищення їх теплового опору.

В наш час є багато сучасних розробок, в яких є різні підходи щодо зменшення тепловтрат через ВК:

- за рахунок підігріву внутрішньої камери склопакетів,
- із застосування вентилязованого склопакету,
- із застосуванням вакуумного склопакету,
- із застосуванням теплового розширення стекол  $GexAs_{40-x}Se_{60}$ ,
- із застосуванням екранів і жалюзі з відбивними покриттями,
- із застосування абсорбуючого скла [10, 34, 79 – 83].

Але, на превеликий жаль, не кожна з цих пропозицій доступна за вартістю для пересічного споживача.

В 70-х роках минулого століття було запропоновано використовувати теплоту повітря, що видаляється з приміщення, шляхом прокачування його через, прошарки багатокамерних вікон - своєрідних аналогів багатокамерних склопакетів. [26]. До теперішнього часу виконано ряд досліджень таких рішень [27 – 34]. Однак більшість досліджень направлено на сталий режим роботи, коли граничні умови є незмінними. Насправді ж температура зовнішнього повітря, швидкість вітру, сонячна радіація змінюються не тільки залежно від пори року, але й протягом доби. Нижче наводиться методика розрахунку теплових процесів у



вентильованих двокамерних склопакетах з врахуванням змінних кліматичних факторів, що дозволяє прогнозувати близькі до реальних значення інтегральних характеристик таких технічних конструкцій.

Нами було реалізовано повітряно-теплову завісу в експериментальному будинку пасивного типу та досліджено її роботу експериментально і теоретично [84, 85]. Це стало поштовхом для розгляду повітряної завіси у двокамерному склопакеті, що забезпечується теплотою повітря з кімнати. У склопакеті внизу виймається нижня планка і повітря під дією природної конвекції піднімається до міжскляного прошарку, віддаючи теплоту, опускається і виходить в кімнату.

Складено рівняння для трансформованого двокамерного склопакета, внутрішня камера якого продувається повітрям, що видаляється з приміщення (рис. 5.4.1).

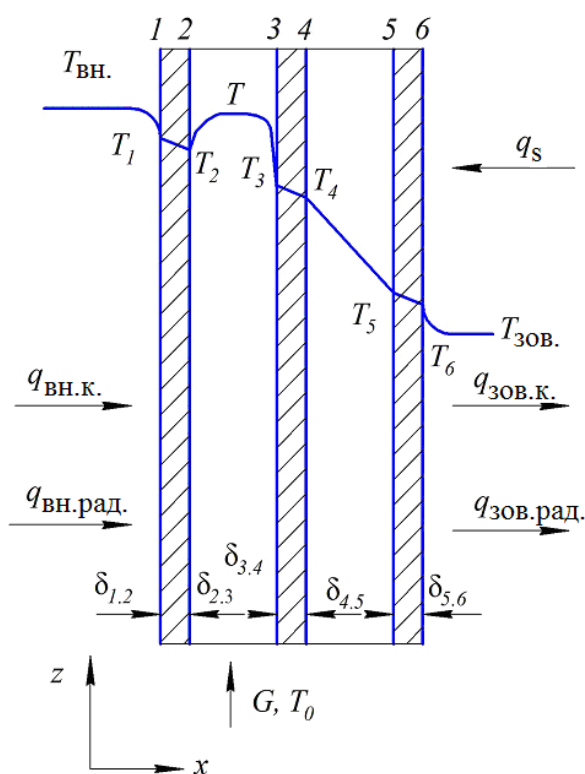


Рис. 5.4.1. Схема перерізу двокамерного вентильованого склопакету.

На двокамерний склопакет з боку приміщення діють радіаційний і конвективний теплові потоки, а також теплопровідність, із зовнішнього боку - такі ж теплові впливи, до яких додається ще інсоляція. Теплота сонячної інсоляції сприймається зовнішнім склінням і передається всередину приміщення

кондукцією, конвекцією і теплопередачею. Таким чином, для внутрішньої частини вікна маємо:

$$\begin{aligned} q_1 &= (\alpha_{\text{вн.к}} + C_{\text{в.1}}^+)(T_{\text{вн}} - T_1), \\ q_{1.2} &= \frac{\lambda_{1.2}}{\delta_{1.2}}(T_1 - T_2), \\ q_2 &= C_{2.3}^+(T_2 - T_3) - \alpha_2(T - T_2), \\ q_1 &= q_{1.2} = q_2. \end{aligned} \quad (5.4.1)$$

На іншу частину вікна діють теплові потоки:

$$\begin{aligned} q_3 &= C_{2.3}^+(T_2 - T_3) + \alpha_3(T - T_3), \\ q_{3.4} &= \frac{\lambda_{3.4}}{\delta_{3.4}}(T_3 - T_4), \\ q_{4.5} &= \left( \frac{\lambda_{4.5}}{\delta_{4.5}} + C_{4.5}^+ \right) (T_4 - T_5), \\ q_{5.6} &= \frac{\lambda_{5.6}}{\delta_{5.6}}(T_5 - T_6), \\ q_6 &= (\alpha_{\text{зов.к}} + C_{6.зов}^+)(T_6 - T_{\text{зов}}) - q_s, \\ q_3 &= q_{3.4} = q_{4.5} = q_{5.6} = q_6. \end{aligned} \quad (5.4.2)$$

Рівняння для середньої температури повітря  $T$ , що продувається крізь внутрішню камеру між стеклами, що працює в режимі, близькому до «повного змішування», буде:

$$\rho_{2.3} c_{2.3} \delta_{2.3} \frac{dT}{dt} = \frac{G}{H \cdot B} c_{2.3} (T_0 - T) - \alpha_2 (T - T_2) - \alpha_3 (T - T_3). \quad (5.4.3)$$

де  $T_0$  – температура на вході в камеру.

Останні співвідношення в (5.4.1) і (5.4.2) при заданих  $T_{\text{вн}}(t)$ ,  $T_{\text{зов}}(t)$ ,  $q_s(t)$ , відомих  $\alpha_{\text{вн.к}}$ ,  $\alpha_{\text{зов.к}}$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  дозволяють скласти шість незалежних рівнянь і разом з (5.4.3) визначити зміни в часі семи температур  $T_1$ , ...,  $T_6$ ,  $T$ . Для конкретизації виразів для коефіцієнтів  $\alpha_{\text{вн.к}}$ ,  $\alpha_{\text{зов.к}}$ ,  $C_{\text{вн.1}}^+$ ,  $C_{2.3}^+$ ,  $C_{4.5}^+$ ,  $C_{6.зов}^+$  скористаємося загальноприйнятими в будівельній теплофізиці залежностями (5.4.4) і (5.4.5) [3].

Тут прийнято, що внутрішня поверхня приміщення кольору вапняної штукатурки, зовнішні стіни - цегляні. Поява коефіцієнтів 1.163 в формулах (5.4.4) і (5.4.5) викликане перерахунком розмірності ккал/год в Ватти.

$$\alpha_{\text{вн.к}} = 1.163 \cdot 1.43 \sqrt[3]{(T_{\text{в}} - T_1)}, \quad \alpha_{\text{зов.к}} = 1.163 \cdot (6.31 v_{\text{пов}}^{0.656} + 3.25 e^{-1.91 v_{\text{пов}}}), \quad (5.4.4)$$

$$C_{\text{вн.1}}^+ = \frac{1.163}{\left(\frac{1}{4.50} + \frac{1}{4.65} - \frac{1}{4.96}\right)(T_{\text{вн}} - T_1)} \left[ \left(\frac{T_{\text{вн}} + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_1 + 273}{100}\right)^4 \right],$$

$$C_{2,3}^+ = \frac{1.163}{\left(\frac{1}{4.65} + \frac{1}{4.65} - \frac{1}{4.96}\right)(T_2 - T_3)} \left[ \left(\frac{T_2 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_3 + 273}{100}\right)^4 \right],$$

$$C_{4,5}^+ = \frac{1.163}{\left(\frac{1}{4.65} + \frac{1}{4.65} - \frac{1}{4.96}\right)(T_4 - T_5)} \left[ \left(\frac{T_4 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_5 + 273}{100}\right)^4 \right], \quad (5.4.5)$$

$$C_{6,30\text{в}}^+ = \frac{1.163}{\left(\frac{1}{4.65} + \frac{1}{4.96} - \frac{1}{4.96}\right)(T_6 - T_{30\text{в}})} \left[ \left(\frac{T_6 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{30\text{в}} + 273}{100}\right)^4 \right],$$

Зміна густини потоку сонячної радіації протягом світлового дня ( $t_{\text{зх}} - t_{\text{cx}}$ ) задовільно описується синусоїдою:

$$q_s = \frac{\pi U_{\pi/2}}{2(t_{\text{зх}} - t_{\text{cx}})} \sin\left(\pi \frac{t - t_{\text{cx}}}{t_{\text{зх}} - t_{\text{cx}}}\right) \quad t \in [t_{\text{cx}}, t_{\text{зх}}]. \quad (5.4.6)$$

Дані для добових значень  $U_{\beta}$  в залежності від кута нахилу поверхні  $\beta$  (в нашому випадку  $\beta = \pi/2$ ), її орієнтації по сторонах світу, про часи сходу  $t_{\text{cx}}$  і заходу  $t_{\text{зх}}$  Сонця, швидкість вітру  $v_{\text{пов}}$ , температуру зовнішнього повітря  $T_{30\text{в}}$ , альbedo навколишньої поверхні  $A$ , наведені в кліматичних довідниках і посібниках, наприклад таких як [5 – 7, 9].

Слід враховувати, що в разі припинення продувки, рівняння для  $q_2$  і  $q_3$ , а також ланцюжок рівностей густини теплових потоків (формули (5.4.1) і (5.4.2)) трансформуються в вирази:

$$q_{2,3} = \left( \frac{\lambda_{2,3}}{\delta_{2,3}} + C_{2,3}^+ \right) (T_2 - T_3), \quad (5.4.7)$$

$$q_1 = q_{1,2} = q_{2,3} = q_{3,4} = q_{4,5} = q_{5,6} = q_6.$$

Співвідношення (5.4.7) дозволяє скласти шість незалежних рівнянь для знаходження  $T_1, \dots, T_6$ . Методика вирішення такої задачі викладена в розділі 3.

Було прийнято, що двокамерне вікно з розмірами  $H \times B = 1,5 \times 1,8 \text{ м}^2$ ,  $\delta_{1,2} = \delta_{3,4} = \delta_{5,6} = 0,003 \text{ м}$ ,  $\delta_{2,3} = \delta_{4,5} = 0,01 \text{ м}$ , встановлений в стінову панель шириною 3 м і висотою 3 м, в приміщенні  $6 \times 3 \times 3 \text{ м}^3$ , що знаходиться в місцевості  $50.5^\circ \text{ с. ш.}$  (м. Київ). В приміщенні підтримується температура  $T_{\text{вн}} = 20 \text{ }^\circ\text{C} = \text{const}$ . При кратності повітрообміну близько 1,5 витрата повітря складатиме  $G = 0,027 \text{ кг/с}$ , що визначає його швидкість у внутрішній камері вікна  $1,25 \text{ м/с}$  та ламінарний режим руху ( $Re = 1,7 \cdot 10^3$ ,  $Pe = 1,2 \cdot 10^3$ ). Тоді для щілини, що обігрівається з двох сторін, число  $Nu = 7,5$  [15], що дає  $\alpha_2 = \alpha_3 = 9,38 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ .

Подібні задачі, зазвичай, вирішуються чисельно. Вихідні дані, що циклічно повторюються з року в рік, приводять до вирішення, що також повторюється і не залежить від початкових умов, починаючи з другого року. На рис. 5.4.2 і 5.4.3 представлена динаміка зміни питомих теплових потоків через двокамерний склопакет, що продувається, протягом року для південо-орієнтованої сторони фасаду і північно-орієнтованої сторони фасаду відповідно:

$$e_i = \int_0^t q_i dt \quad (i=1,6), \quad t \in [0, t^*]. \quad (5.4.8)$$

Подача теплого повітря до внутрішньої камери привела до істотного (більш ніж в 2 рази) скорочення тепловтрат з приміщення в порівнянні із зовнішнім тепловим потоком.

Для середин чотирьох пір року (15, 105, 196, 289 доби) наведені погодинний розподіл основних енергетичних характеристик (рис. 5.4.4 – 5.4.11). З трьох основних кліматичних факторів – температури зовнішнього повітря, швидкості вітру, сонячної радіації – найбільш дієвим виявився останній фактор.

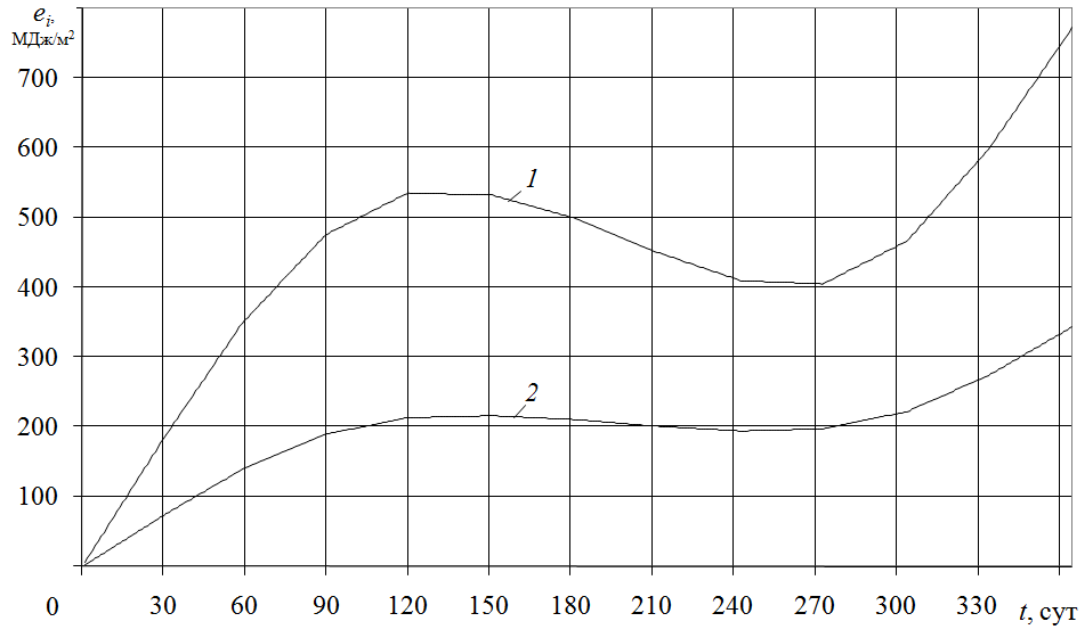


Рис.5.4.2. Інтегральні енергетичні характеристики двокамерного склопакету, що продувається, на південній орієнтації фасаду. Цифри відповідно: 1 –  $e_6$ , 2 –  $e_1$ .

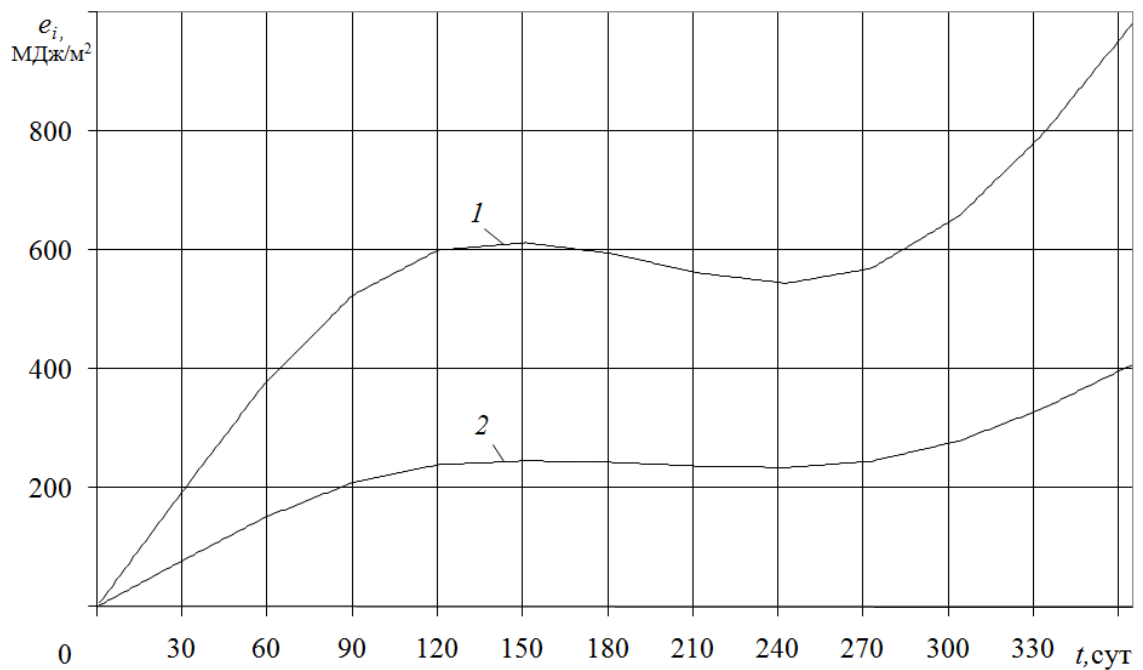


Рис. 5.4.3. Інтегральні енергетичні характеристики двокамерного склопакету, що продувається, на північній орієнтації фасаду. Цифри відповідно: 1 –  $e_6$ , 2 –  $e_1$ .

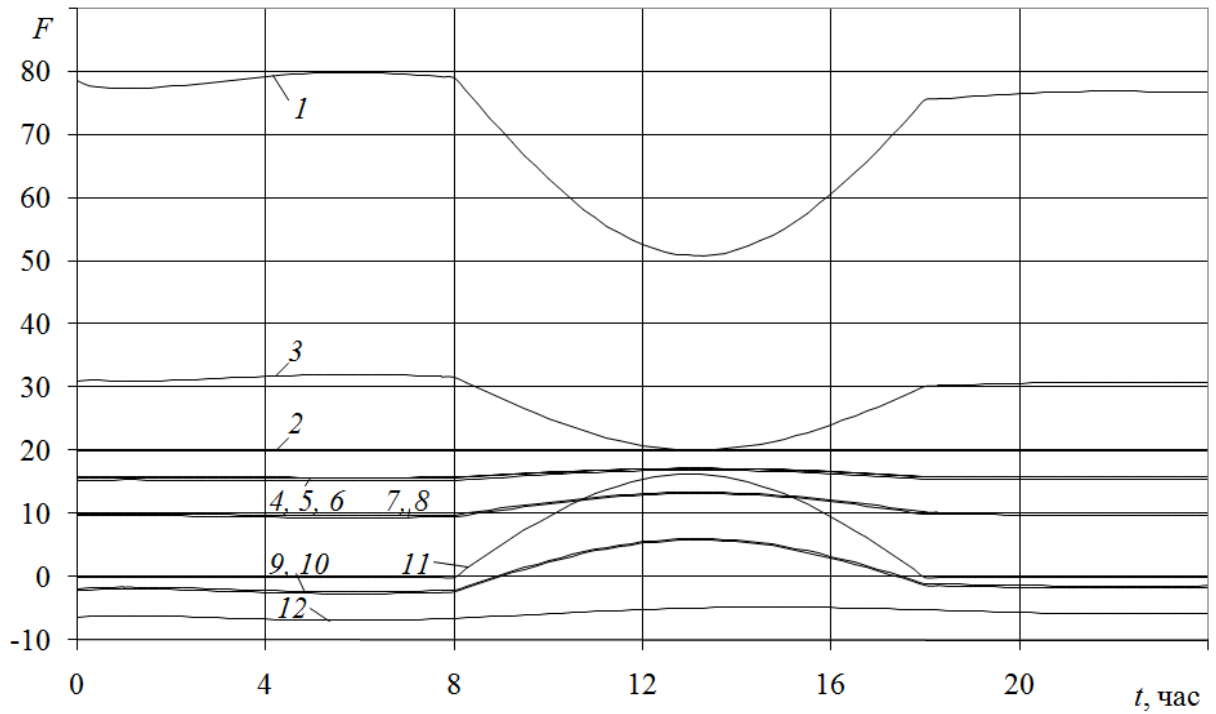


Рис. 5.4.4. Зміна теплових характеристик двокамерного склопакету, що продувається, на південній орієнтації фасаду, протягом 15 доби (середина зими) року. Цифри ліній відповідають величинам  $F$ : 1 –  $q_6$ , 2 –  $T_{вн}$ , 3 –  $q_1$ , 4 –  $T$ , 5 –  $T_1$ , 6 –  $T_2$ , 7 –  $T_3$ , 8 –  $T_4$ , 9 –  $T_5$ , 10 –  $T_6$ , 11 –  $0.1 q_s$ , 12 –  $T_{зов}$

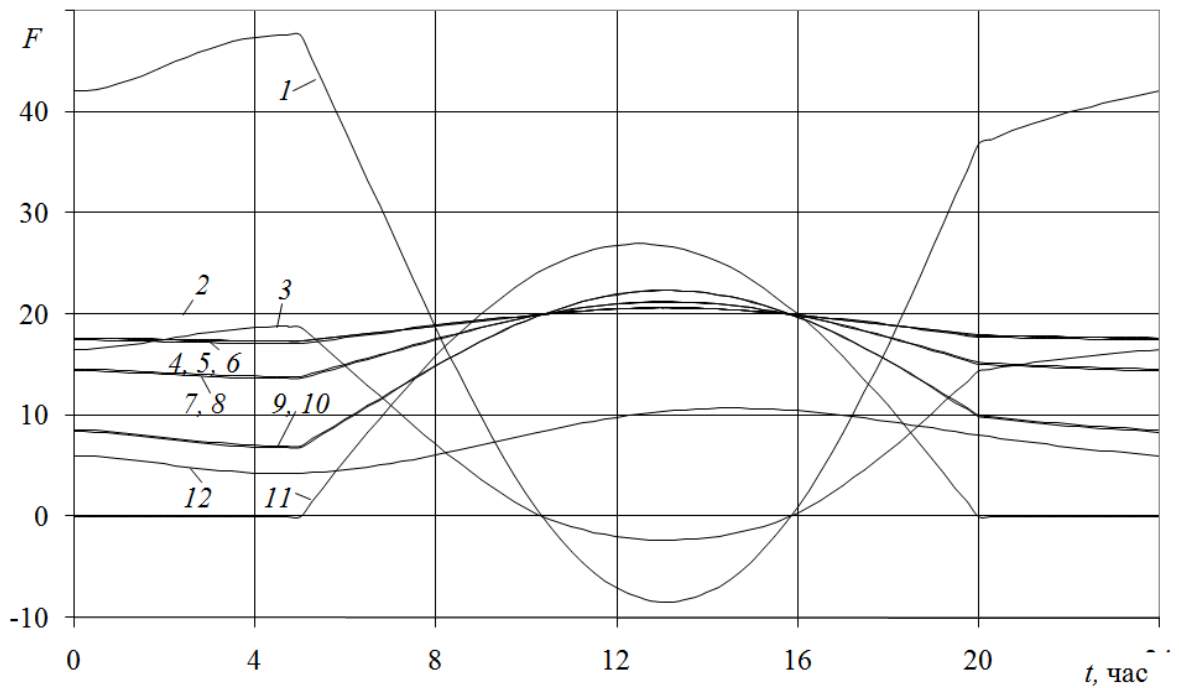


Рис. 5.4.5. Зміна теплових характеристик двокамерного склопакету, що продувається, на південній орієнтації фасаду, протягом 105 (середина весни) доби року. Цифри ліній відповідають величинам  $F$ : 1 –  $q_6$ , 2 –  $T_{вн}$ , 3 –  $q_1$ , 4 –  $T$ , 5 –  $T_1$ , 6 –  $T_2$ , 7 –  $T_3$ , 8 –  $T_4$ , 9 –  $T_5$ , 10 –  $T_6$ , 11 –  $0.1 q_s$ , 12 –  $T_{зов}$

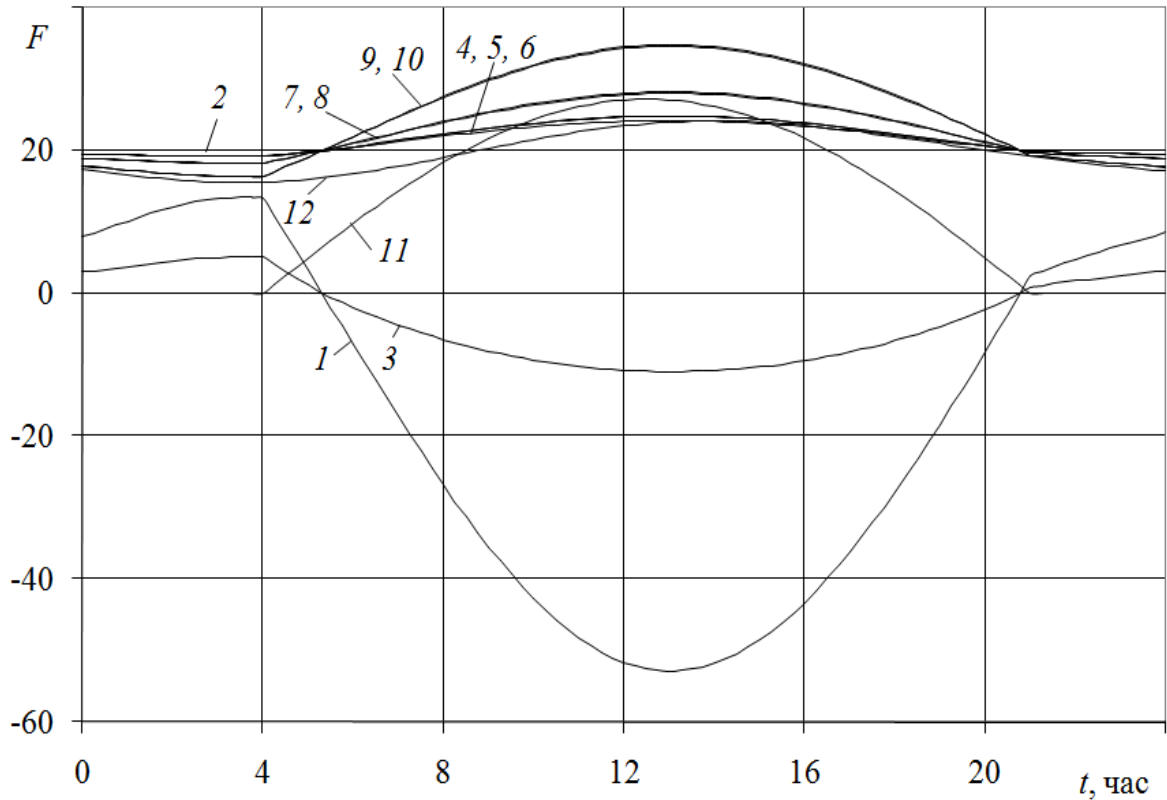


Рис. 5.4.6. Зміна теплових характеристик двокамерного склопакету, що продувається, на південній орієнтації фасаду, протягом 196 доби (середина літа) року. Цифри ліній відповідають величинам  $F$ : 1 –  $q_6$ , 2 –  $T_{вн}$ , 3 –  $q_1$ , 4 –  $T$ , 5 –  $T_1$ , 6 –  $T_2$ , 7 –  $T_3$ , 8 –  $T_4$ , 9 –  $T_5$ , 10 –  $T_6$ , 11 –  $0.1 q_s$ , 12 –  $T_{зов}$

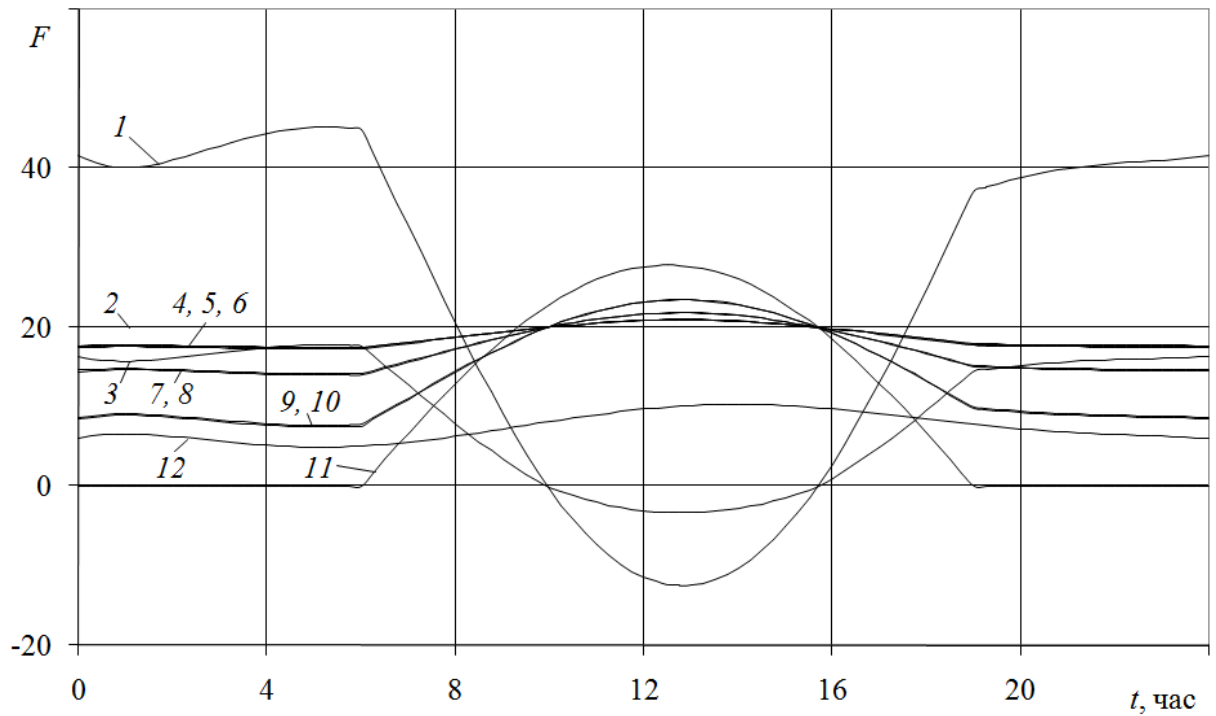


Рис. 5.4.7. Зміна теплових характеристик двокамерного склопакету, що продувається, на південній орієнтації фасаду, протягом 289 доби (середина осені) року. Цифри ліній відповідають величинам  $F$ : 1 –  $q_6$ , 2 –  $T_{вн}$ , 3 –  $q_1$ , 4 –  $T$ , 5 –  $T_1$ , 6 –  $T_2$ , 7 –  $T_3$ , 8 –  $T_4$ , 9 –  $T_5$ , 10 –  $T_6$ , 11 –  $0.1 q_s$ , 12 –  $T_{зов}$

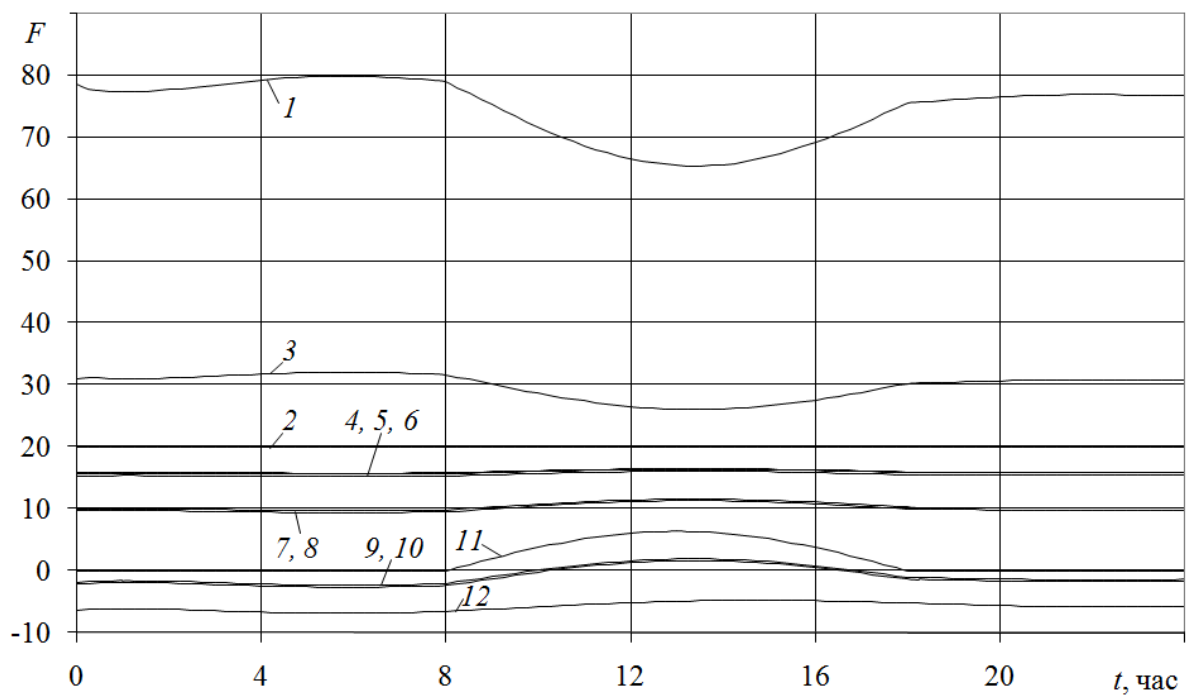




Рис. 5.4.8. Зміна теплових характеристик двокамерного склопакету, що продувається, на північній орієнтації фасаду протягом 15 доби року. Цифри ліній відповідають величинам  $F$ : 1 –  $q_6$ , 2 –  $T_{вн}$ , 3 –  $q_1$ , 4 –  $T$ , 5 –  $T_1$ , 6 –  $T_2$ , 7 –  $T_3$ , 8 –  $T_4$ , 9 –  $T_5$ , 10 –  $T_6$ , 11 –  $0.1 q_s$ , 12 –  $T_{зов}$

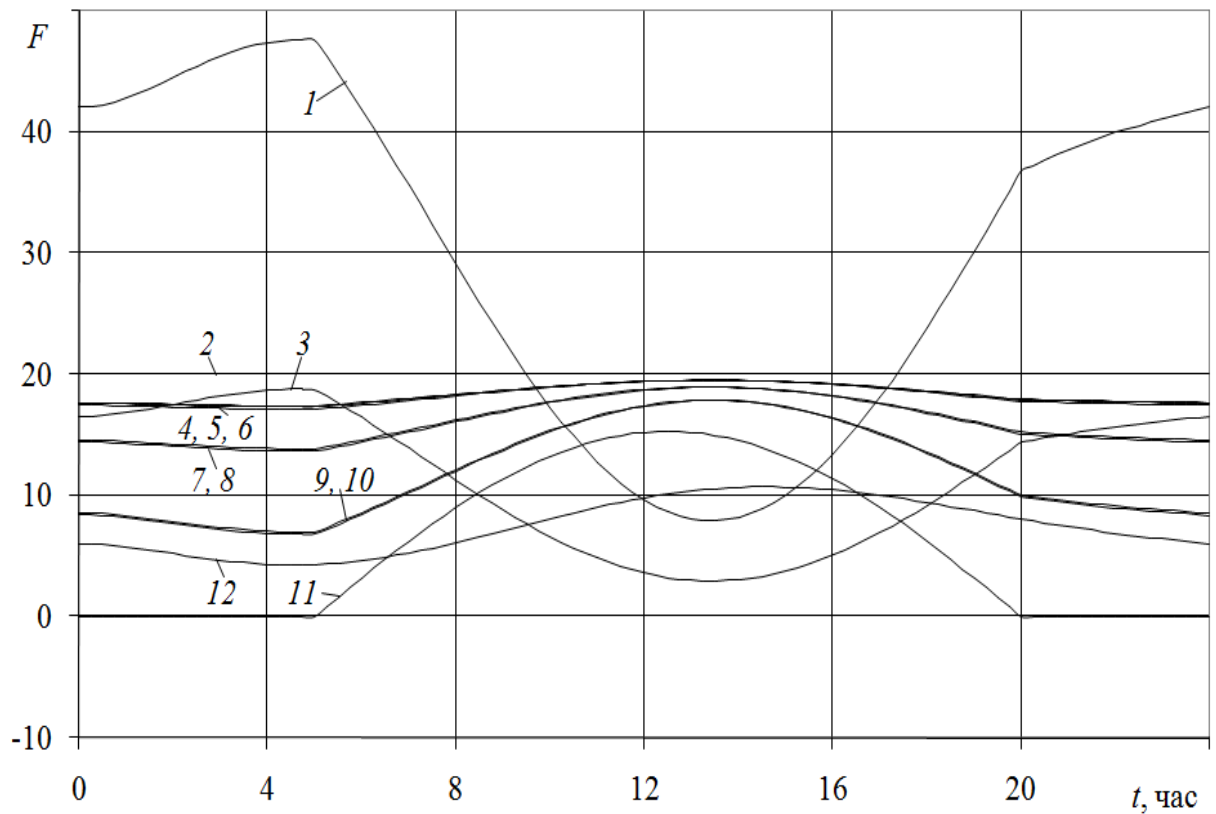


Рис. 5.4.9. Зміна теплових характеристик двокамерного склопакету, що продувається, на північній орієнтації фасаду протягом 105 доби року. Цифри ліній відповідають величинам  $F$ : 1 –  $q_6$ , 2 –  $T_{вн}$ , 3 –  $q_1$ , 4 –  $T$ , 5 –  $T_1$ , 6 –  $T_2$ , 7 –  $T_3$ , 8 –  $T_4$ , 9 –  $T_5$ , 10 –  $T_6$ , 11 –  $0.1 q_s$ , 12 –  $T_{зов}$

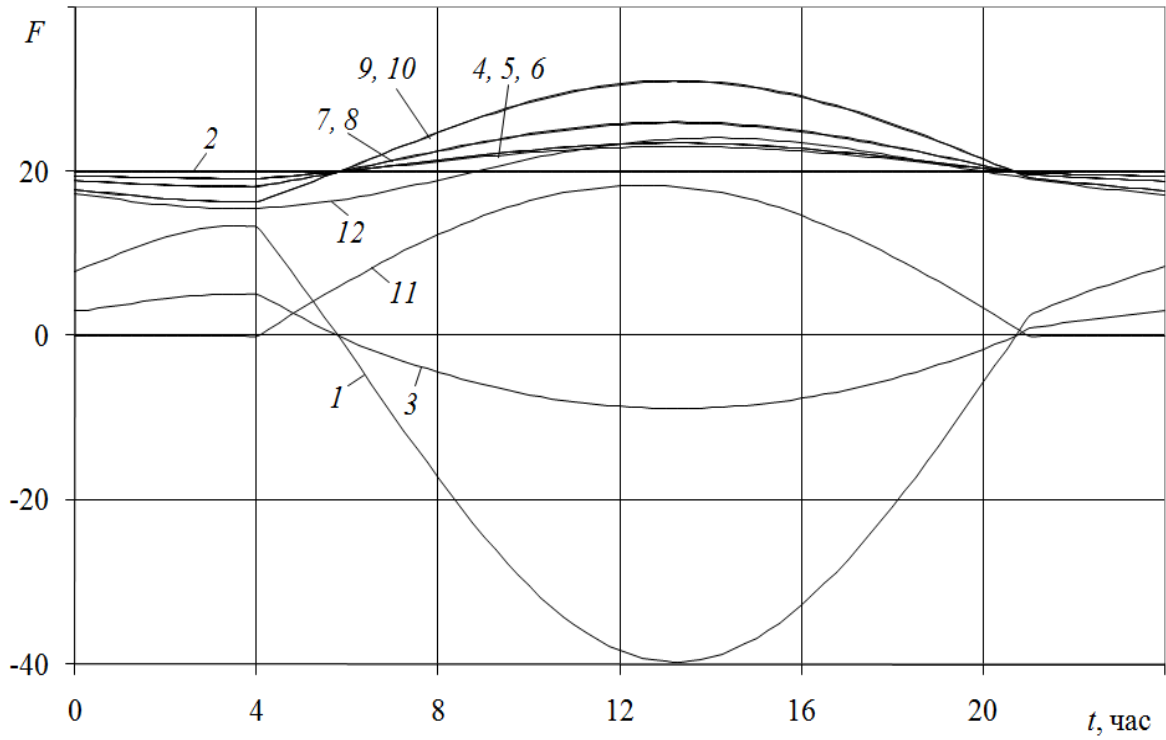


Рис. 5.4.10. Зміна теплових характеристик двокамерного склопакету, що продувається, на північній орієнтації фасаду протягом 196 доби року. Цифри ліній відповідають величинам  $F$ : 1 –  $q_6$ , 2 –  $T_{вн}$ , 3 –  $q_1$ , 4 –  $T$ , 5 –  $T_1$ , 6 –  $T_2$ , 7 –  $T_3$ , 8 –  $T_4$ , 9 –  $T_5$ , 10 –  $T_6$ , 11 –  $0.1 q_s$ , 12 –  $T_{зов}$

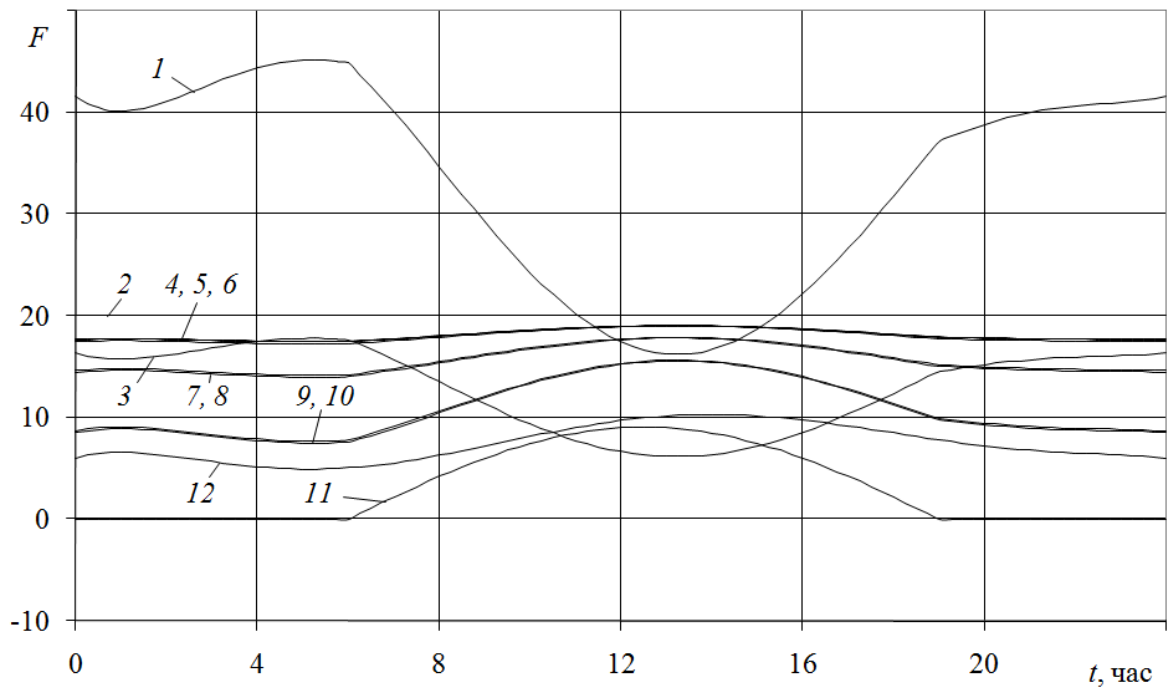


Рис. 5.4.11. Зміна теплових характеристик двокамерного склопакету, що продувається, на північній орієнтації фасаду протягом 289 доби року. Цифри ліній відповідають величинам  $F$ : 1 –  $q_6$ , 2 –  $T_{\text{вн}}$ , 3 –  $q_1$ , 4 –  $T$ , 5 –  $T_1$ , 6 –  $T_2$ , 7 –  $T_3$ , 8 –  $T_4$ , 9 –  $T_5$ , 10 –  $T_6$ , 11 –  $0.1 q_s$ , 12 –  $T_{\text{зов}}$

Чітко видно, що, починаючи зі сходом Сонця, незалежно від пори року, різко змінюється поведінка всіх характеристик протягом усього світлового дня. Особливо це дія позначається на густинах теплового потоку на внутрішній і зовнішній поверхнях вікна. Що стосується температур  $T_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ), то їх значення попарно близькі. Зрозуміло, що температура повітря, що продувається,  $T$  мало відрізняється від  $T_1$  і  $T_2$ . Треба відзначити, що, на відміну від стінової частини огороження, невелика енергоємність всіх елементів вікна призводить до дуже швидкого реагування на зміну зовнішніх кліматичних умов. Тому моменти початку і кінця інверсій  $T_i$ , що виявляються, головним чином, влітку (див., наприклад, графіки для 196 діб), співпадають для всіх  $i = 1, 2, \dots, 6$ . Причому, ці моменти відповідають асам настання рівностей  $q_1 = q_6$  і їх нульовим значенням. Вплив продувки внутрішньої камери склопакета можна оцінити, співставляючи значення  $q_1(t)$  і  $q_6(t)$ .

Повертаючись до інтегральних характеристик (рис. 5.4.2 - 5.4.3), констатуємо, що для середніх широт північної півкулі Землі під час продування через трансформований склопакет повітря, що видаляється з приміщення, допустимо орієнтуватися на річні тепловтрати через вікна близько  $(344 + 408)/2 = 376$  МДж/м<sup>2</sup>. Це значення майже в 2 рази більше бажаного (198 МДж/м<sup>2</sup>), але разом з тим в 2 рази менше, ніж при відсутності продувки (660 МДж/м<sup>2</sup>). Оскільки поверхня вікна становить майже 30 % огороження, то таке вирішення дозволяє орієнтуватися на річні втрати 30 кВт·год на кв.м площі приміщення (при тепловому опорі стінової частини еквівалентному опорі стіни товщиною в дві цеглини).

Повітря, що продувається, не повинно містити надмірної вологи і твердих частинок. Для задоволення цих вимог можливе використання фільтра, встановленого в підвіконній дошці.

В принципі реальним є підігрів відведеного з приміщення повітря, що приведе до зниження значень  $q_1(t)$ . Однак при цьому збільшаться  $q_i(t)$  ( $i = 3, \dots, 6$ ) і зростуть річні витрати теплоти на опалення. Тому, навіть у разі появи додаткового нетрадиційного джерела енергії, його нерационально використовувати таким чином і слід обмежитися випадком  $T_0 = T_{нов}$ .

Розроблена методика безперервного врахування сукупності кліматичних факторів, що діють на двокамерні склопакети, внутрішня камера яких продувається вилученим з приміщення повітрям, дозволяє постійно відстежувати теплові процеси через подібні пристрої і встановлювати ефективність прийнятих рішень. Розрахунки показали, що при 1,5 кратності повітрообміну в приміщенні, продування повітрям, що видаляється через внутрішню камеру двокамерного склопакета подібної конструкції, призводить до зниження річних тепловтрат вдвічі.

### **Висновки до розділу 5.**

Запропоновано алгоритм опрацювання експериментальних даних, що враховує всі природні фактори: альbedo, час сходу і заходу сонця, швидкість вітру, добову густину енергії, коефіцієнт тепловіддачі, температурний коефіцієнт об'ємного розширення, коефіцієнти теплопровідності і кінематичної в'язкості, коефіцієнт температуропровідності і променевої тепловіддачі, а також всі отримані експериментальні дані в кожній точці вимірювання.

Проведена верифікація інженерної теплофізичної моделі розрахунку тепловтрат через склопакети показала повноту моделі та адекватність отриманих розрахункових даних. Діапазон відхилення розрахункових даних від експериментальних знаходиться в межах 4%.

Розроблена методика безперервного врахування сукупності кліматичних факторів, що діють на двокамерні склопакети, внутрішня камера яких продувається вилученим з приміщення повітрям, дозволяє постійно відстежувати теплові процеси через подібні пристрої і встановлювати ефективність прийнятих рішень. Розрахунки показали, що при 1,5 кратності повітрообміну в приміщенні, продування повітрям, що видалається через внутрішню камеру двокамерного склопакета подібної конструкції, призводить до зниження річних тепловтрат вдвічі.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ РОБОТИ

У дисертаційній роботі здійснено чисельні і експериментальні дослідження аеродинаміки та теплопередачі через віконні склопакети та профілі в реальних умовах їх експлуатації. Встановлені закономірності теплопередачі та розроблені рекомендації щодо зменшення тепловтрат будівлі через світлопрозорі елементи фасадів. Основні наукові результати полягають у наступному:

1. Розроблено теплофізичні (одно- та двовимірну) моделі для дослідження теплопередачі через одно- та двокамерний склопакет, з використанням яких визначено закономірності радіаційно-конвективних складових теплового потоку, що проходять через склопакет. Теоретично встановлено, що радіаційний тепловий потік складає до 70% в однокамерному та до 65% в двокамерному склопакеті. Центральне скло в двокамерному склопакеті сприяє зменшенню конвективного теплопереносу через газове середовище за рахунок зниження швидкості вільноконвективних течій в камерах. Більш впливово центральне скло сприяє зменшенню радіаційного теплопереносу, виконуючи функцію термозахисного екрану. Завдяки нанесенню низькоемісійних покриттів на поверхні склопакету зменшується радіаційна складова теплопереносу. Конвективний теплоперенос зменшується за рахунок збільшення кількості камер в склопакеті, а теплопровідність – за рахунок заповнення камер інертним газом.

2. Розроблено теплофізичну модель для розрахунку теплопередачі через вентиляований двокамерний склопакет, яка включає в себе всі кліматичні фактори, такі як – інсоляцію, альбедо земної поверхні, час сходу і заходу сонця, швидкість вітру, добову густину енергії, коефіцієнт тепловіддачі, температурний коефіцієнт об'ємного розширення, коефіцієнти теплопровідності і кінематичної в'язкості, коефіцієнт температуропровідності і променевої тепловіддачі. Розрахунками підтверджено, що для двокамерного вентиляованого склопакету, при 1,5 кратному повітрообміні в приміщенні, продування повітря, яке

видаляється через внутрішню камеру двокамерного склопакета, призводить до зниження річних тепловтрат через подібну конструкцію в 2 рази.

3. Отримані розрахункові результати щодо теплопередачі через одно- чи двокамерний склопакет в межах випадкової похибки співпадають з експериментальними даними, що незалежно отримані із застосуванням розробленого переносного блоку теплової реєстрації.

4. Запропоновано заходи із зменшення теплоспоживання досліджуваної адміністративної будівлі в частині встановлення енергоефективних вікон. Заходи увійшли до проекту термомодернізації корпусів №1 і 2 по вул. Булаховського, 2.

5. Розроблені рекомендації стосовно ефективного застосування енергоефективних віконних конструкцій. В результаті запропонованих інноваційних заходів можна досягти значення опору теплопередачі через одинарні віконні конструкції  $1 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$ .

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Енергоефективність у регіональному вимірі. Проблеми та перспективи. Аналітична доповідь. URL: <http://www.niss.gov.ua/content/articles/files/energoefekt-b40dc.pdf>
2. Національний план дій з енергоефективності на період до 2020 року: постанова Каб. Міністрів України від 11.09.2015 р. № 1228-р. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/1228-2015-p>
3. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель. [На заміну ДБН В.2.6-31:2006 (СНиП II-3-79), чинний від 08.07.2016]. Вид. офіц. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2016. 30 с.
4. ДСТУ Б В.2.6-23:2009. Конструкції будинків і споруд. Блоки віконні та дверні. [На заміну ДСТУ Б В.2.6-23-2001 (ГОСТ 23166-99); чинний від 01.08.2009]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 32 с.
5. ДСТУ Б В.2.7-107:2008. Будівельні матеріали. Склопакети клеєні будівельного призначення. [На заміну ДСТУ Б В.2.7-107-2001 (ГОСТ 24866-99); чинний від 01.01.2010]. Вид. офіц. Київ: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2009. 38 с.
6. М. Мурадян, М. Саркисов, А. Спиридонов, А. Морозов Некоторые новые тенденции развития производства современных стеклопакетов. *Окна и двери*. 2001. № 3 (48). С. 32-36.
7. Фаренюк Є.Г. Тепловий режим світлопрозорих огорожувальних конструкцій сучасних багатоповерхових будівель: дисертація канд. техн. наук: 05.23.01 / Нац. унів. водного господарства та природокористування. Рівне. 2015. 172 с.
8. Г. Г. Фаренюк, Е. Г. Фаренюк. Конструктивные принципы повышения теплозащитных качеств оконных систем. *Окон. технологии*. 1999. № 1. С. 46-49.
9. J. Carmody, S. Selkowitz, E. Lee, D. Arastch, T. Willmert. Window System for High-Performance Buildings. *W.W.Norton&Company*: New York – London. 2004. 400 p.



10. О.В.Приймак, І.С.Кріпак. Аналіз конструкцій та теплових процесів у “енергетичному вікні”. *Енергоефективність в будівництві та архітектурі*. Випуск №9. 2017. С. 115-118.
11. О. Л. Підгорний, І. М. Шепетова, О. В. Сергейчук та ін. Світлопрозорі огороження будинків: навчальний посібник. Київ: КНУБА, 2005. 281 с.
12. ДСТУ Б.В.2.6-15:2011. Блоки віконні та дверні полівінілхлоридні. [На заміну ДСТУ Б В.2.6-15-99; чинний від 1.10.2012]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2012. 38 с.
13. Недостатки деревянных оконных профилей. URL: <https://niks-m.com/news/nedostatki-derevyannykh-okon>
14. Власов О. Е. Основы строительной теплотехники. М.: Изд. ВИА РККА, 1938. 94 с.
15. Ильинский В. М. Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимат зданий). М.: Высшая школа, 1974. 320 с.
16. Богословский В. Н. Отопление: учебник для вузов. М.: Стройиздат, 1991. 735 с.
17. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. 200 с.
18. Шкловер А. М. Теплопередача при периодических тепловых воздействиях. М.: Стройиздат, 1961. 161 с.
19. Кондратьев К. Я., Пивоварова З. И., Федорова М. П. Радиационный режим наклонных поверхностей: монографія / под. ред. К.Я. Кондратьева. Ленинград: Гидрометеиздат, 1978. 216 с.
20. Batchelor G. K. On steady laminar flow with closed streamlines at large Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*. 1956. V.1, N 2. P. 177-190.
21. Batchelor G. K. An introduction to Fluid dynamics. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1970. 631 p. Рус. пер. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. М.: Мир, 1973. 792 с.
22. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 488 с.

23. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973. 320 с.
24. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
25. Карпис Е. Е. Теплотехнический эффект применения вентилируемых окон. *Водоснабжение и санитарная техника*. 1976. №1, 32 с.
26. Э. Р. Эккерт, Р. М. Дрейк. Теория тепло- и массообмена. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. 681 с.
27. Rheault S., Bilgen E. Heat transfer analysis in an automated venetian blind window system. *J. Sol. Energy Eng.*, 1989. vol.111. P. 89-95.
28. Wright J. I. A correlation to quantify convective heat transfer between vertical window glazings. *ASHRAE Trans*. 1996. vol. 102. P. 940-946.
29. Диомидов М. В., Низовцев М. И., Терехов В. И. Влияние расхода воздуха на тепловые характеристики вентилируемого окна. *Изв. ВУЗов. Строительство*. 2001. №1. С. 66-69.
30. Грищенко В. В., Низовцев М. И., Терехов В. В., Терехов В. И. Математическое моделирование теплообмена в межстекольном промежутке. *Изв. ВУЗов. Строительство*. 2002. №2. С. 120-127.
31. Терехов В. И., Низовцев М. И. Светопрозрачные конструкции с регулируемыми тепловыми характеристиками. *Problemele enrgeticii regionale*. 2011. № 1(15), С. 60-76.
32. Низовцев М. И. Тепло- и массоперенос в энергоэффективных ограждающих конструкциях и климатическом оборудовании зданий : автор. диссертации д-ра техн. наук / Новосибирский госуд. техн. унив. Новосибирск, 2011. 39 с.
33. Кривобок Э. Н. Метод теплотехнического расчета вентилируемых окон. *Водоснабжение и санитар. техника*. 1981. № 7. С. 13-16.
34. М. В. Диомидов, М. И. Низовцев, В. В. Терехов, В. И. Терехов. Исследование теплообмена вентилируемом окне. *Пром. теплотехника*. 2002. № 2–3. С. 40-44.

35. Рыбаков М. М. Факторы, влияющие на теплопередачу через узел оконного откоса. *Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ»*. 2016. Том 8, №2. <http://naukovedenie.ru/PDF/55TVN216.pdf>

36. Рыбаков М. М. Влияние конструкций навесной фасадной системы на величину дополнительной мощности теплового потока через оконный откос. *Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ»*. 2016. Том 8, №3. <http://naukovedenie.ru/PDF/136TVN316.pdf>

37. А. Д. Кривошеин, Д. А. Харламов Об оценке приведённого сопротивления теплопередаче оконных и дверных балконных блоков на основе расчётных методов. *Светопрозрач. конструкции*. 2007. № 4 (54). С. 9-13.

38. Е. В. Петров. Исследование процессов теплопередачи через наружные ограждающие конструкции. *Инновационные технологии и экономика в машиностроении*: сборник трудов V Междун. научно-практич. конф. (Юрга, 23-23 мая, 2014 год). Юргинский технологический институт. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. Т. 2. С. 227-230.

39. С. В. Гувернюк, В. Г. Гагарин. Компьютерное моделирование аэродинамических воздействий на элементы ограждений высотных зданий. [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=3426](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3426)

40. С. В. Корниенко. Комплексная оценка энергоэффективности и тепловой защиты зданий. *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2014. № 11 (26). С. 33-48.

41. В.М. Захаров, Е.Г. Авдюнин, Н.Н. Смирнов, А.А. Яблоков, Д.А. Лапатеев. Разработка, программная реализация и проверка адекватности математической модели процесса теплопередачи через окно с теплоотражающими экранами. *Вестник ИГЭУ*. 2016. № 3. С. 13-26. <http://vestnik.ispu.ru/ru/node/48>

42. Басок Б.І., Давиденко Б.В., Гончарук С.М., Кужель Л.М. Експериментальні дослідження теплопереносу через сучасні віконні конструкції в реальних умовах їх експлуатації. *Оконные технологии*. 2015. №60(2), С. 24-26. URL: <http://wt.com.ua/biblioteka/arkhiv-nomerov/488-60-2-2015.html>

43. Басок Б.И., Давиденко Б.В., Новицкая М.П., Гончарук С.М., Недбайло А.Н. Влияние толщины газовой прослойки на термическое сопротивление однокамерного стеклопакета. *Пром. Теплотехника*. 2012. т.34, №1. С. 100-107.

44. Гончарук С.М. Особливості теплопереносу в адміністративній будівлі з конвекторною системою опалення: дисертація канд.техн. наук: 05.14.06. / Інст. технічної теплофізики НАН України. Київ. 2014. 197 с.

45. ДСТУ Б EN ISO 13790:2011. Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики (EN 15251, IDT). [Чинний від 01.01.2013]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2012. 71 с.

46. ДСТУ Б EN 13187:2011. Теплові характеристики будівель. Якісне виявлення теплових відмов в огорожувальних конструкціях. Інфрачервоний метод (EN 13187:1998, IDT). [Чинний з 01.01.2013]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2012. 37 с.

47. Давиденко Б.В., Гончарук С.М., Новицька М.П., Кужель Л.М., Красота Д.О. Експериментальні дослідження теплопереносу через сучасні віконні конструкції в реальних умовах експлуатації. *Енергоефективність у будівництві та архітектурі*. 2015. №7, С. 65-71.

48. Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, Т. Г. Грищенко, Т. В. Менделеева, С. И. Ковтун. Современное состояние метрологического обеспечения теплоточных измерений с помощью первичных преобразователей теплового потока. *Метрология та вимірювальна техніка "Метрологія-2004"*: наук.праці IV міжн.наук.-техн. конф. (Харків, 12-14 жовтня 2004 р.). Держ. ком. України з питань техн. регулювання та спожив. політики. Харків: Вид-во ННЦ "Інститут метрології, 2004. Т. 2. С. 26-31.

49. ДСТУ 3756-98 (ГОСТ 30619-98). Енергозбереження. Перетворювачі теплового потоку термоелектричні загального призначення. Загальні технічні умови. [Чинний з 01.07.2000]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України. 2000. 21 с.

50. МВВ № 081/24-0778-11. Метрологія. Опір теплопередаванню крізь огороджувальні конструкції будівель і споруд різного призначення. Методика виконання вимірювань комбінованим тепловізійно-пірометричним методом. ІТТФ НАНУ. 2011.

51. Басок Б. І., Давиденко Б. В., Кужель Л. М., Гончарук С. М., Беляєва Т. Г. Експериментальні дослідження теплопередачі через енергоефективні склопакети з низькоемісійним м'яким покриттям. *Пром. Теплотехніка*. 2017. Т. 39. №1. С. 41-48.

52. Гончарук С.М., Калініна М.Ф., Божко І.К., Кужель Л.М., Лисенко О.М. Створення експериментального енергоефективного будинку пасивного типу «нуль енергії». *Пром. Теплотехніка*. 2014. Т. 36, №3. С. 88-95.

53. О.М. Лисенко, Л.М. Кужель, І.К. Божко. Управління теплопостачанням будівлі на основі використання індивідуального теплового пункту оригінальної конструкції. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2015. Т. 1, N 8(73). С. 61-67. – Режим доступу: DOI : 10.15587/1729-4061.2015.37917.

54. А.Н. Недбайло, М.Ф. Калинина, И.К. Божко, М.П. Новицкая, С.М. Гончарук, Л.Н. Кужель, О.Н. Лысенко. Математическая модель нестационарного процесса теплопереноса в многослойной ограждающей конструкции. *Керамика: наука и жизнь*. 2014. № 2 (23). С. 14-29.

55. Басок Б.І., Давиденко Б.В., Гончарук С.М., Кужель Л.М. Експериментальні дослідження теплопереносу через сучасні віконні конструкції в реальних умовах їх експлуатації. *Оконные технологии*. 2015. №60(2), С. 24-26. URL: <http://wt.com.ua/biblioteka/arkhiv-nomerov/488-60-2-2015.html>

56. Б.І. Басок, А.І. Накорчевський, Л.М. Кужель, С.М. Гончарук, М.П. Новіцька. Експериментальні дослідження теплопередачі через склопакети з врахуванням зовнішніх кліматичних факторів. Методика опрацювання даних. *Енергоефективність в будівництві та архітектурі*. 2016. Вип. 8. С. 15-20.

57. Л.М. Кужель. Енергоефективні світлопрозорі конструкції. *II Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених. Відновлювальна*

енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК: тези доповідей. ( м. Київ, 16 - 17 жовтня 2014). Київ. 2014. С. 38-40.

58. Басок Б.І., Накорчевський А.І., Гончарук С.М., Кужель Л.М., Нежута В.П. Експериментальні дослідження теплопередачі через склопакети з врахуванням зовнішніх кліматичних факторів. *IX Міжнародна конференція “Проблеми промислової теплотехніки”*: тези доповідей. (м. Київ, 20 – 23 жовтня 2015). Київ. 2015. С. 105.

59. Basok B., Nakorchevskiy A., Kuzhel L., Goncharuk S., Novitska M. Experimental study heat transfer trough glass with including external climatic factors. Method of data processing. *Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві: «ЕНЕРГОІНТЕГРАЦІЯ-2016»*: матеріали робочої програми та тези доповідей шостої міжнародної науково-практичної конференції. (м. Київ 13 - 15 квітня 2016). Київ. 2016. С. 20-21.

60. Б.И. Басок, Б.В. Давыденко, С.М. Гончарук, О.Н. Лысенко, Л.Н. Кужель. Экспериментальные и теоретические исследования теплопереноса через двухкамерный стеклопакет оконной конструкции. *XV Минский международный форум по тепло- и массообмену*: тезисы докладов и сообщений. (г. Минск 23 - 26 мая 2016). Минск, ИТМ им. А.В. Лыкова НАН Беларуси. 2016. Том 3. С. 269-273.

61. Б.И. Басок, А.И. Накорчевский, Л.Н. Кужель, С.М. Гончарук, О.Н. Лысенко. Экспериментальные исследования теплопередачи через стеклопакеты с учетом климатических факторов. *XV Минский международный форум по тепло- и массообмену*: тезисы докладов и сообщений (г. Минск 23 - 26 мая 2016). Минск, ИТМ им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2016. Том 3. С. 280-283.

62. Л.М. Кужель. Підвищення енергоефективності будівель шляхом зменшення тепловтрат через світлопрозорі віконні конструкції. *Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція. Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – Rems'2016*: збірник матеріалів конфер. (м. Київ 30 травня - 01 червня 2016). Київ, НТУУ «КПІ». 2016. С. 40.

63. Басок Б. І., Давиденко Б. В., Кужель Л. М. Енергоефективні віконні конструкції – запорука підвищення енергоефективності будівель. *XVII*

міжнародна науково-практичної конференції “Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті”: матеріали конф. (Київ 29 – 30 вересня 2016). Київ. НТУУ «КПІ». 2016. С. 349-352.

64. Басок Б.І., Гончарук С.М., Кужель Л.М. Покращення енергетичної ефективності будівель шляхом застосування сучасних енергоефективних віконних конструкцій. *XVI Всеукраїнська науково-технічна конференція “Актуальні проблеми енергетики та екології”*: матеріали науково-практичної конференції ОНАХТ, (Одеса, 5 - 8 жовтня 2016). Одеса. 2016. С. 148-149.

65. Басок Б.І., Давиденко Б.В., Кужель Л.М., Новіков В.Г. Експериментальні та чисельні дослідження радіаційно-конвективного теплопереносу через віконні конструкції. *Міжнародна науково-практична та навчально-методична конференція Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – Rems'2017*: збірник матеріалів конфер. (м. Київ 25 – 27 квітня 2017). Київ, НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського. 2017. С. 16.

66. Басок Б., Давиденко Б, Кужель Л., Новіков В. Вплив радіаційного та конвективного теплопереносу на теплоізоляційну спроможність двокамерних склопакетів. *Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві: «ЕНЕРГОІНТЕГРАЦІЯ-2017»*: матеріали робочої програми та тези доповідей сьомої міжнародної науково-практичної конференції. (м. Київ 26 - 28 квітня 2017). Київ. 2017. С. 37-38.

67. Накорчевский А. И. К минимизации тепловпотерь через наружное ограждение здания с оконным проемом. *Инженерно-физический журнал*. 2015. Т.88. № 3. С. 681-689.

68. Справочник по климату СССР. Вып. 10, ч. I. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. Л.: Гидрометеиздат. 1966. 124 с.

69. Справочник по климату СССР. Вып. 10, ч. II. Температура воздуха и почвы. Л.: Гидрометеиздат. 1967. 608 с.

70. Справочник по климату СССР. Вып. 10, ч. III. Ветер. Л.: Гидрометеиздат. 1967. 682 с.

71. Корепанов Е. В. Численное моделирование процесса теплопередачи через стеклопакеты с газовым наполнением. *Вестник Ижевского государственного технического университета*. 2004. №3. С. 29-32.
72. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат. 1984. 152 с.
73. Р. Пейре, Т. Д. Тейлор. Вычислительные методы в задачах механики жидкости. Л.: Гидрометеиздат. 1986. 352 с.
74. Давыденко Б. В. Метод матричной прогонки для решения сеточных уравнений гидродинамики. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2008. №5/5(35). С. 7-11.
75. Б.И. Басок, Б.В. Давыденко, С.А. Исаев, С.М. Гончарук, Л.Н. Кужель. Численное моделирование теплопереноса через двухкамерный стеклопакет. *Инженерно-физический журнал*. 2016. Т.89. №5. С. 1288-1295.
76. Basok B., Davydenko B., Zhelykh V., Goncharuk S., Kugel L. Influence of low-emissivity coating on heat transfer through the double-glazing windows. *Building physics in theory and practice. Scientific Journal*. 2016. Vol. VIII. No. 4. P. 5-8.
77. Басок Б.І., Давиденко Б.В., Кужель Л.М., Новіков В.Г., Калініна М.Ф. Чисельні дослідження впливу радіаційного та конвективного теплопереносу на теплоізоляційну спроможність двокамерних склопакетів. *Пром. теплотехніка*. 2017. Т.39. №3. С. 60-65.
78. Басок Б.И., Накорчевский А.И., Гончарук С.М., Кужель Л.Н. Экспериментальные исследования теплопередачи через оконные стеклопакеты с учетом действия внешних факторов. *Инженерно-физический журнал*. 2017. Т.90. №1. С. 94-101.
79. В. С. Біланич, І. В. Боднар, В. Б. Онищак, І. М. Різак, В. М. Різак. Теплове розширення стекол  $GexAs_{40-x}Se_{60}$ . *Наук. вісн. Ужгород. ун-ту*. 2010. Вип. 28. С. 52-56.
80. М.И. Низовцев, В.И. Терехов, И.К. Хайритдинов и др. Экраны и жалюзи с теплоотражающими покрытиями. *Соврем. окна Сибири и Дальн. Востока*. 2005. № 2. С. 28-29.



81. М. И. Низовцев, В. И. Терехов, И. К. Хайритдинов. Межрамные экраны и жалюзи с теплоотражающими покрытиями. *Светопрозрач. конструкции*. 2005. № 2. С. 32-33.

82. Y. Etzion, E. Erell. Controlling the transmission of radiant energy through windows: a novel ventilated reversible glazing system. *Build. & Envir.* 2000. № 35. P. 433.

83. М.И. Низовцев, В.И. Терехов, И.К. Хайритдинов и др. Экраны и жалюзи с теплоотражающими покрытиями. *Соврем. окна Сибири и Дальн. Востока*. 2005. № 2. С. 28-29.

84. Спосіб забезпечення повітряно-теплової завіси теплотою ґрунту: пат. № 88791 Україна: № u 201314599; заявл. 25.03.2014, Бюл. № 6. 4 с.

85. Басок Б.І., Новіцька М.П., Кужель Л.М. Теплофізичне моделювання експериментального енергоефективного будинку, обладнаного тепловою завісою фасадних стін. *IX Міжнародна конференція “Проблеми промислової теплотехніки”*: тези доповідей. (м. Київ, 20 – 23 жовтня 2015). Київ. 2015. С. 107.

## **ДОДАТКИ**

### **Додаток А**

Основні технічні характеристики деяких вимірювальних приладів та датчиків,  
що використовувались при експериментальних дослідженнях.

Таблиця А 1.

## Основні технічні характеристики тепловізору «Fluke Ti 50»

| Основна характеристика   | Значення основної характеристики   |
|--|--|
| Детектор (Матриця)   | 60 Гц антенна решітка в фокальній площині<br>Ванадій оксид (VOX) Неохолоджений Мікробалометр                             |
| Спектральна полоса   | 8-14 мкм   |
| Теплочутливість  | $\leq 0,070$ °C при 30 °C  |
| Цифровий дисплей   | 320 x 240  |
| Стандартна оптика  | 20mm f/0.8<br>германієва<br>Зона обзору 23° горизонтально x 17° Вертикально<br>(доступні додаткові (нестандартні) лінзи) |
| Градуйована температура<br>Діапазони   | Діапазон 1 = -20 °C до 100 °C<br>Діапазон 2 = -20 °C до 350 °C   |
| Похибка  | $\pm 2$ °C чи $\pm 2$ %  |
| Поправка на похибку відносно абсолютно чорного тіла (повного випромінювання) | Основа на даних, що вводяться користувачем. Змінюється від 0,01 до 1,0   |
| Тип батареї живлення   | Літієва іонна батарея, перезаряджаюча, замінюється користувачем  |
| Час дії батареї  | 3 години   |
| Маса   | 4,4 фунти разом з батареєю   |
| Розміри  | 71 мм x 262 мм x 196 мм  |
| Робоча температура   | -10 °C до +50 °C   |
| Температура зберігання   | -40 °C до +70 °C   |
| Вологість  | Робота та зберігання при вологості від 10 % до 95 %  |
| Відстань фокусу  | 50 см до безкінечності   |

Таблиця А 2.

## Основні технічні характеристики восьмиканального аналого-цифрового пристрою «Експерт»

| № п/п | Основна технічна характеристика | Значення  |
|-------|---------------------------------|---|
| 1     | 2                               | 3   |
| 1.    | Тип модулю                      | АЦП   |
| 2.    | Частота дискретизації           | 10 Гц   |
| 3.    | Вхідний діапазон по напрузі     | +/- 15мВ; +/- 50мВ; +/- 100мВ;<br>+/- 500мВ; +/- 1В; +/- 2.5В |
| 4.    | Похибка виміру                  | $\pm 0,1\%$   |
| 5.    | Сила струму                     | $\pm 20$ мА   |
| 6.    | Потужність                      | 1 Вт  |
| 7.    | Робоча температура              | - 25...+75 °C   |

## Додаток А (продовження)

Таблиця 3.

Основні технічні характеристики багатофункціонального восьмиканального приладу вимірювання та контролю температури «УКТ-38»

| № п/п | Основна технічна характеристика                    | Значення  |
|-------|--|---|
| 1     | 2  | 3   |
| 1.    | Номінальна напруга живлення                        | 220 В, 50 Гц  |
| 2.    | Допустиме відхилення напруги живлення              | - 15...+10 %  |
| 3.    | Споживана потужність, не більше ніж                | 6 ВА  |
| 4.    | Кількість каналів контролю вхідних параметрів      | Від 2 до 8  |
| 5.    | Періодичність циклу запиту 8-ми датчиків           | не більше 3,6 с                                       |
| 6.    | Допустиме навантаження                             | 4 А при напрузі 220 В 50 Гц та $\cos\varphi \geq 0,4$ |
| 7.    | Інтерфейс зв'язку з комп'ютером                    | RS-232  |
| 8.    | Габаритні розміри приладу                          | 96×96×145 мм  |
| 9.    | Маса   | не більше 1 кг  |
| 10.   | Ступінь захисту приладу зі сторони лицьової панелі | IP54  |

Таблиця 4.

Основні технічні характеристики мідного термометру опору (ТСМ-205)

| № п/п | Основна технічна характеристика  | Значення              |
|-------|--|-----------------------|
| 1     | 2  | 3                     |
| 1.    | Робочий діапазон виміру температур, °С   | -40...100             |
| 2.    | Номінальна статична характеристика перетворювача (по ДСТУ 2858-94 Термоперетворювачі опору. Загальні технічні вимоги і методи випробувань) | 50М                   |
| 3.    | Клас допуску   | В                     |
| 4.    | Відносний опір   | 1,4280                |
| 5.    | Показник теплової інерції, не більше, с  | 15                    |
| 6.    | Опір ізоляції при (25±10) °С та відносній ізоляції до 80%, не менше, МОм   | 100                   |
| 7.    | Стійкість до впливу кліматичних умов (по ГОСТ 12997-84 Изделия ГСП. Общие технические условия)   | Відповідають групі С4 |
| 8.    | Стійкість до впливу механічних чинників (по ГОСТ 12997-84 Изделия ГСП. Общие технические условия)  | Відповідають групі N1 |
| 9.    | Вимірювальний струм, що рекомендується, не більше, мА  | 1                     |
| 10.   | Розміри, мм  | 30×5×5                |

## Додаток А (продовження)

Таблиця 5.

Основні технічні характеристики перетворювача теплового потоку з вмонтованим платиновим термометром опору (ПТП ПТО)

| № п/п | Основна технічна характеристика  | Значення                     |
|-------|--|------------------------------|
| 1     | 2  | 3                            |
| 1.    | Границя допустимої основної відносної похибки виміру густини теплового потоку, % | ±4                           |
| 2.    | Діапазон виміру температури, °С  | -30...90                     |
| 3.    | Границя допустимої основної абсолютної похибки виміру температури, К             | ±0,5                         |
| 4.    | Електричний опір ПТП, Ом   | 3889                         |
| 5.    | Номинальний опір термоперетворювача опору при 0 °С, Ом                           | 100                          |
| 6.    | Час реакції по рівню 0,63 не більше, с   | 30                           |
| 7.    | Термостійкість, °С   | До 100                       |
| 8.    | Коефіцієнт ефективної теплопровідності, Вт/(м·К)                                 | 1,0±0,05                     |
| 9.    | Ступінь чорноти поверхні ПТП ПТО   | 0,91±0,05                    |
| 10.   | Розміри, мм  | 100×40×2,0 (для прямокутних) |
|       |  | ∅100×2,0 (для круглих)       |
| 11.   | Маса, не більше ніж, кг  | 0,05                         |

Таблиця 6.

Технічні характеристики анімометра Testo 405.

|   |
|---|
| <p><b>Технические характеристики анемометра Testo 405:</b><br/>           Диапазон измерения, м/с: .....0 до 5 м/с при -20 до 0 °С;<br/>           .....0 до 10 м/с при 0 до +50 °С.<br/>           Диапазон измерения, м<sup>3</sup>/ч: .....0 до 99.990 м<sup>3</sup>/ч.<br/>           Диапазон измерения, °С: .....-20 до +50 °С.<br/>           Разрешение: .....0,01 м/с; 0,1 °С;<br/>           Погрешность: (погрешность системы при темп. калибровки +25 °С)<br/>           .....± (0,1 м/с +5 %) до 2 м/с;<br/>           .....± (0,3 м/с +5 %) более 2 м/с;<br/>           .....± 5 °С;<br/>           Температура окруж. среды.: .....0 до +50 °С;<br/>           Температура хранения: .....-20 до +70 °С;<br/>           Питание: .....3 × ААА;<br/>           Зонд: диаметр, мм .....12 мм, 16 мм;<br/>           .....длина, мм .....150 до 300 мм;<br/>           Вес, кг: .....0,1.</p> |
|---|

**Додаток Б.**  
Акт впровадження



Група компаній ТЕПЛОЕНЕРГО  
 ТОВ «ЕНЕРГО ТЕПЛО ІНЖИНІРИНГ»  
 08113, Київська обл., Києво-Святошинський р-н, с. Петрушки, вул. Миру, 25-в, оф. 1  
 ЄДРПОУ 40146770, р/р 26001595242100 в ПАТ «УкрСиббанк», МФО351005



ЗАТВЕРДЖУЮ  
 Директор ТОВ «ЕНЕРГО ТЕПЛО  
 ІНЖИНІРИНГ»  
  
 \_\_\_\_\_ Лелюк В.П.  
 /підпис/  
 «    » \_\_\_\_\_ 2017 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ  
 Директор ІТТФ НАН України  
 чл.-кор. НАН України  
  
 \_\_\_\_\_ Снежкін Ю.Ф.  
 /підпис/  
 «    » \_\_\_\_\_ 2017 р.

### АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Л.М. Кужель  
 Ми, що нижче підписалися, зав. відділом ТОЕТ, член-кор. НАН України Басок Б.І., наук. співр. відділу ТОЕТ Кужель Л.М. та директор ТОВ «ЕНЕРГО ТЕПЛО ІНЖИНІРИНГ» Лелюк В.П. склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи наукового співробітника Інституту технічної теплофізики НАН України Кужель Лілії Миколаївни впроваджено в ТОВ «ЕНЕРГО ТЕПЛО ІНЖИНІРИНГ» шляхом застосування методики розрахунку тепловтрат через віконні конструкції.

Комісія відзначає, що методика розрахунку тепловтрат через склопакети враховує вплив кліматичних факторів, до її складу входять величини, які характеризують всі природні умови, такі як альbedo земельної ділянки, час сходу і заходу сонця, швидкість вітру, добову густину енергії, коефіцієнт тепловіддачі, температурний коефіцієнт об'ємного розширення, коефіцієнти теплопровідності і кінематичної в'язкості, коефіцієнт температуропровідності і променевої тепловіддачі, а також всі отримані експериментальні дані в кожній точці вимірювання і має наступні переваги:

- методика розроблена на основі теплофізичного моделювання;
- проведено оцінювання впливу усіх чинників на теплопередачу через віконні елементи огорожі;
- проведено апробацію алгоритму на основі багатьох експериментальних досліджень.

Враховуючи вищезазначене, комісія рекомендує застосування даної методики для розрахунку тепловтрат будівлі при термомодернізації об'єктів житлово-комунального господарства.

Від ТОВ «ЕНЕРГО ТЕПЛО  
 ІНЖИНІРИНГ»:  
 Директор \_\_\_\_\_ Лелюк В.П.



Від ІТТФ НАН України :

Зав. відділом ТОЕТ, член-кор. НАН  
 України \_\_\_\_\_ Басок Б.І.

Наук. співр. відділу ТОЕТ  
 \_\_\_\_\_ Кужель Л.М.



**Додаток В.**  
Список публікацій здобувача.

### Список публікацій здобувача.

Статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних:

1. Басок Б.И., Накорчевский А.И., Гончарук С.М., Кужель Л.Н. Экспериментальные исследования теплопередачи через оконные стеклопакеты с учетом действия внешних факторов. *Инженерно-физический журнал*. 2017. Т.90. №1. С. 94-101. (SCOPUS, INSPEC, ADS, CAS, Google Scholar, EBSCO, CSA, Academic OneFile, Academic Search, CSA Environmental Sciences, Earthquake Engineering Abstracts, EI-Cjmpendex, Gale, INIS Atomindex, OCLC, SCImago, Summon by ProQuest).

2. Basok B., Davydenko B., Zhelykh V., Goncharuk S., Kugel L. Influence of low-emissivity coating on heat transfer through the double-glazing windows. *Building physics in theory and practice. Scientific Journal*. 2016. Vol. VIII. No. 4. P. 5-8. (ISSN 1734-4891).

3. Б.И. Басок, Б.В. Давыденко, С.А. Исаев, С.М. Гончарук, Л.Н. Кужель. Численное моделирование теплопереноса через двухкамерный стеклопакет. *Инженерно-физический журнал*. 2016. Т.89. №5. С. 1288-1295. (SCOPUS, INSPEC, ADS, CAS, Google Scholar, EBSCO, CSA, Academic OneFile, Academic Search, CSA Environmental Sciences, Earthquake Engineering Abstracts, EI-Cjmpendex, Gale, INIS Atomindex, OCLC, SCImago, Summon by ProQuest).

4. О.М. Лисенко, Л.М. Кужель, І.К. Божко. Управління теплопостачанням будівлі на основі використання індивідуального теплового пункту оригінальної конструкції. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2015. Т. 1, N 8(73). С. 61-67. – Режим доступу: DOI : 10.15587/1729-4061.2015.37917 (*Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus*).

Статті у наукових фахових виданнях:

5. Басок Б. І., Давиденко Б. В., Кужель Л. М., Гончарук С. М., Беляева Т. Г. Експериментальні дослідження теплопередачі через енергоефективні склопакети з низькоемісійним м'яким покриттям. *Пром. Теплотехніка*. 2017. Т. 39. №1. С. 41-48.

12. Басок Б.І., Давиденко Б.В., Кужель Л.М., Новіков В.Г., Калініна М.Ф. Чисельні дослідження впливу радіаційного та конвективного теплопереносу на теплоізоляційну спроможність двокамерних склопакетів. *Пром. Теплотехніка*. 2017. Т.39. №3. С. 60-65.

13. Гончарук С.М., Калініна М.Ф., Божко І.К., Кужель Л.М., Лисенко О.М. Створення експериментального енергоефективного будинку пасивного типу «нуль енергії». *Пром. Теплотехніка*. 2014. Т. 36, №3. С. 88-95.

14. А.Н. Недбайло, М.Ф. Калинина, И.К. Божко, М.П. Новицкая, С.М. Гончарук, Л.Н. Кужель, О.Н. Лысенко. Математическая модель нестационарного процесса теплопереноса в многослойной ограждающей конструкции. *Керамика: наука и жизнь*. 2014. № 2 (23). С. 14-29.

15. Давиденко Б.В., Гончарук С.М., Новіцька М.П., Кужель Л.М., Красота Д.О. Експериментальні дослідження теплопереносу через сучасні віконні конструкції в реальних умовах експлуатації. *Енергоефективність у будівництві та архітектурі*. 2015. №7, С. 65-71.

16. Басок Б.І., Давиденко Б.В., Гончарук С.М., Кужель Л.М. Експериментальні дослідження теплопереносу через сучасні віконні конструкції в реальних умовах їх експлуатації. *Оконные технологии*. 2015. №60(2), С. 24-26.  
URL: <http://wt.com.ua/biblioteka/arkhiv-nomerov/488-60-2-2015.html>

17. Б.І. Басок, А.І. Накорчевський, Л.М. Кужель, С.М. Гончарук, М.П. Новіцька. Експериментальні дослідження теплопередачі через склопакети з врахуванням зовнішніх кліматичних факторів. Методика опрацювання даних. *Енергоефективність в будівництві та архітектурі*. 2016. Вип. 8. С. 15-20.

Додатково відображає наукові результати дисертації патент України на винахід:

Спосіб забезпечення повітряно-теплової завіси теплотою ґрунту: пат. № 88791 Україна: № у 201314599; заявл. 25.03.2014, Бюл. № 6. 4 с.

### Апробація результатів дисертації

Основні положення роботи викладено та обговорено на науково-практичних конференціях різного рівня:

1. Л.М. Кужель. Енергоефективні світлопрозорі конструкції. *II Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених. Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК: тези доповідей.* (м. Київ, 16 - 17 жовтня 2014). Київ. 2014. С. 38-40. (форма участі - очна).

2. Басок Б.І., Накорчевський А.І., Гончарук С.М., Кужель Л.М., Нежута В.П. Експериментальні дослідження теплопередачі через склопакети з врахуванням зовнішніх кліматичних факторів. *IX Міжнародна конференція “Проблеми промислової теплотехніки”*: тези доповідей. (м. Київ, 20 – 23 жовтня 2015). Київ. 2015. С. 105. (форма участі - очна).

3. Басок Б.І., Новіцька М.П., Кужель Л.М. Теплофізичне моделювання експериментального енергоефективного будинку, обладнаного тепловою завісою фасадних стін. *IX Міжнародна конференція “Проблеми промислової теплотехніки”*: тези доповідей. (м. Київ, 20 – 23 жовтня 2015). Київ. 2015. С. 107. (форма участі - заочна).

4. Basok B., Nakorchevskiy A., Kuzhel L., Goncharuk S., Novitska M. Experimental study heat transfer trough glass with including external climatic factors. Method of data processing. *Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві: «ЕНЕРГОІНТЕГРАЦІЯ-2016»*: матеріали робочої програми та тези доповідей шостої міжнародної науково-практичної конференції. (м. Київ 13 - 15 квітня 2016). Київ. 2016. С. 20-21. (форма участі - очна).

5. Б.И. Басок, Б.В. Давыденко, С.М. Гончарук, О.Н. Лысенко, Л.Н. Кужель. Экспериментальные и теоретические исследования теплопереноса через двухкамерный стеклопакет оконной конструкции. *XV Минский международный форум по тепло- и массообмену*: тезисы докладов и сообщений. (г. Минск 23 - 26 мая 2016). Минск, ИТМ им. А.В. Лыкова НАН Беларуси. 2016. Том 3. С. 269-273. (форма участі - заочна).

6. Б.И. Басок, А.И. Накорчевский, Л.Н. Кужель, С.М. Гончарук, О.Н. Лысенко. Экспериментальные исследования теплопередачи через стеклопакеты с учетом климатических факторов. *XV Минский международный форум по тепло- и массообмену: тезисы докладов и сообщений* (г. Минск 23 - 26 мая 2016). Минск, ИТМ им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2016. Том 3. С. 280-283. (форма участі - заочна).

7 Л.М. Кужель. Підвищення енергоефективності будівель шляхом зменшення тепловтрат через світлопрозорі віконні конструкції. *Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція. Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – Rems'2016: збірник матеріалів конфер.* (м. Київ 30 травня - 01 червня 2016). Київ, НТУУ «КПІ». 2016. С. 40. (форма участі - очна)

8. Басок Б. І., Давиденко Б. В., Кужель Л. М. Енергоефективні віконні конструкції – запорука підвищення енергоефективності будівель. *XVII міжнародна науково-практичної конференції “Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті”*: матеріали конф. (Київ 29 – 30 вересня 2016). Київ. НТУУ «КПІ». 2016. С. 349-352. (форма участі - очна)

9. Басок Б.І., Гончарук С.М., Кужель Л.М. Покращення енергетичної ефективності будівель шляхом застосування сучасних енергоефективних віконних конструкцій. *XVI Всеукраїнська науково-технічна конференція “Актуальні проблеми енергетики та екології”*: матеріали науково-практичної конференції ОНАХТ, (Одеса, 5 - 8 жовтня 2016). Одеса. 2016. С. 148-149. (форма участі - заочна).

10. Басок Б.І., Давиденко Б.В., Кужель Л.М., Новіков В.Г. Експериментальні та чисельні дослідження радіаційно-конвективного теплопереносу через віконні конструкції. *Міжнародна науково-практична та навчально-методична конференція Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – Rems'2017: збірник матеріалів конфер.* (м. Київ 25 - 27 квітня 2017). Київ, НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського. 2017. С. 16. (форма участі - очна)

11. Басок Б., Давиденко Б, Кужель Л., Новіков В. Вплив радіаційного та конвективного теплопереносу на теплоізоляційну спроможність двокамерних склопакетів. *Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві: «ЕНЕРГОІНТЕГРАЦІЯ-2017»*: матеріали робочої програми та тези доповідей сьомої міжнародної науково-практичної конференції. (м. Київ 26 - 28 квітня 2017). Київ. 2017. С. 37-38. (форма участі - очна).