

TECHNICAL SCIENCES

NUMERICAL SIMULATION OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN GLASS UNITS

Denysenko O.

*Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor of National University "Zaporizhzhia Polytechnic"
Zaporizhzhia, Ukraine*

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМІНУ В СКЛОПАКЕТАХ

Денисенко О.

*Кандидат технічних наук, доцент
національного університету "Запорізька політехніка"
Запоріжжя, Україна
<https://doi.org/10.5281/zenodo.11390787>*

Abstract

The article is devoted to the study of convective heat exchange in two-chamber glass units. The mathematical model contains heat conduction equations for glass and convective heat transfer equations in approximate Boussinesq for double-glazed chambers. A two-dimensional problem in conjugate formulation was considered. Numerical implementation of the model was performed using the finite element method. As a result of numerical experiments, the thermophysical characteristics of double-glazed windows were calculated for different temperature regimes and geometric parameters. Visualization of the complex structure of convective flows and non-homogeneous temperature distribution in the double-glazed chambers was obtained. Calculations were carried out for different fillers of double-glazed chambers, namely air, argon, and krypton.

Анотація

Стаття присвячена дослідженню конвективного теплообміну в двокамерних склопакетах. Математична модель містить рівняння теплопровідності для скла та рівняння конвективного теплообміну в наближенні Бусінеска для камер склопакету. Розглядалась двовимірною задачею в спряженій постановці. Чисельна реалізація моделі виконувалась методом скінчених елементів. В результаті проведених чисельних експериментів обраховані теплофізичні характеристики склопакетів для різних температурних режимів та різних геометричних параметрів. Отримана візуалізація складної структури конвективних потоків та неоднорідного розподілу температури в камерах склопакету. Розрахунки проводились для різних наповнювачів камер склопакету, а саме – повітря, аргон, криптон.

Keywords: glass units, heat transfer, numerical simulation, finite element method.

Ключові слова: склопакет, теплообмін, чисельне моделювання, метод скінчених елементів.

Проблеми енергозбереження останнім часом набули особливого значення. Суттєва доля втрат теплової енергії в житлових приміщеннях відбувається через вікна. Зменшити втрати тепла можна завдяки використанню якісних склопакетів. На ринку представлено широкий вибір подібної продукції з різними конструктивними параметрами – однокамерні, двокамерні, з енергозберігаючим покриттям, з наповненням інертними газами або повітрям, з різними зазорами та товщиною скла. Теплопередача через склопакет відбувається за рахунок випромінювання, конвекції та теплопровідності. Впливати на теплоізоляційні властивості склопакета можуть також інші фактори, такі як конденсація вологи, прозорість скла та ін. Для оцінки енергозберігаючих властивостей склопакетів зазвичай використовують одновимірні математичні моделі, які не враховують фактори конвективного руху повітря або газу в камерах та неоднорідний розподіл температур. Використання чисельних методів дозволяє використовувати більш складні багатовимірні математичні моделі,

які враховують більшість факторів, що впливають на процес теплопередачі через склопакет. В роботі [1] представлені результати чисельного моделювання спряженої задачі теплообміну в однокамерному склопакеті з урахуванням його деформації під дією зовнішнього тиску. Подібні задачі розглядались в роботах [2-4]. В роботі [5] чисельно аналізується сполучена теплопередача через вікно з двокамерним склопакетом за допомогою методу кінцевих різниць. Метою дослідження є визначення оптимальної товщини повітряного прошарку між двома склопакетами для різних кліматичних умов. В роботі [6] проведено чисельне дослідження вільної конвекції у вікні з двокамерним склопакетом із плісированою тканинною шторкою. В роботі [7] чисельно досліджено двокамерний склопакет із вбудованими жалюзі, і для подальшої оцінки розглядається єдиний зимовий режим у приміщенні.

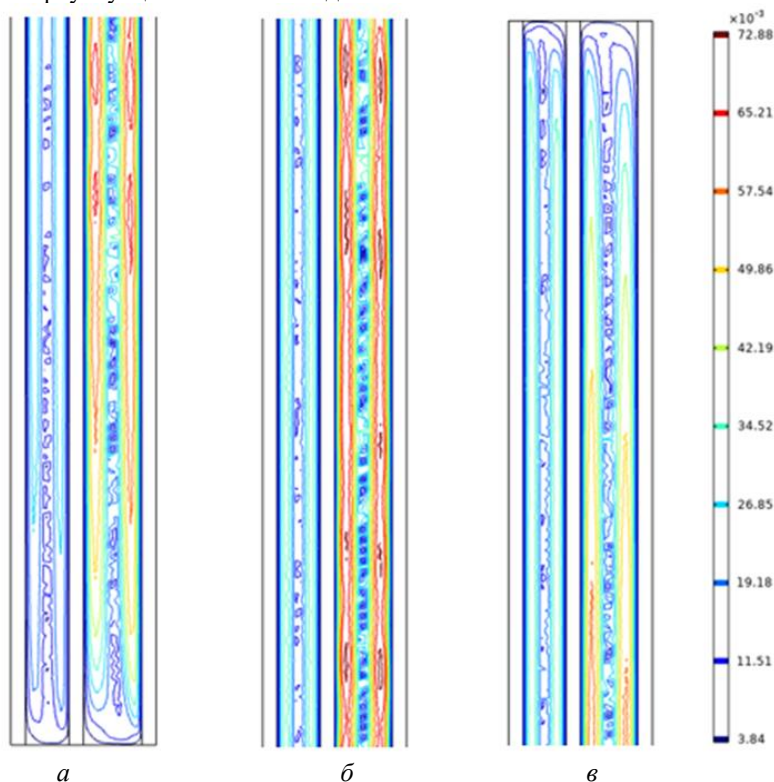
В роботі розглядається двовимірною мультифізична модель склопакету. Досліджується вплив фа-

кторів конвекції в камерах склопакету на теплоізоляційні властивості. Фактор випромінювання не розглядається. Процес теплообміну описується дво-вимірними диференційними рівняннями теплопровідності для скла та рівняннями конвективного теплообміну в камерах між шарами скла. Задача розглядається в спряженій постановці. Враховуючи нелінійний характер і складність рівнянь задача допускає лише чисельний розв'язок. Для чисельної реалізації моделі використовувався програмний комплекс COMSOL Multiphysics. Задача вирішувалась за допомогою метода скінчених елементів. Для зовнішніх поверхонь склопакету використовувались граничні умови конвективного теплообміну для вертикальних поверхонь, на торцевих поверхнях ставились умови теплоізоляції. Для опису конвективного руху в камерах склопакету використовувались рівняння вільної конвекції в наближенні Бусінеска. Побудова геометрії та тріангуляція розрахункової області виконувались за допомогою вбудованих в COMSOL Multiphysics інструментів. Задача вирішувалась в квазістаціонарній постановці. Ітерації проводились до повного установлення. В деяких режимах не вдавалось отримати повне установлення ітераційного процесу у зв'язку з наявністю конвективних флуктуацій. В таких випадках

розглядалась нестационарна постановка задачі, а час розрахунку визначався стабілізацією інтегральних характеристик процесу теплообміну.

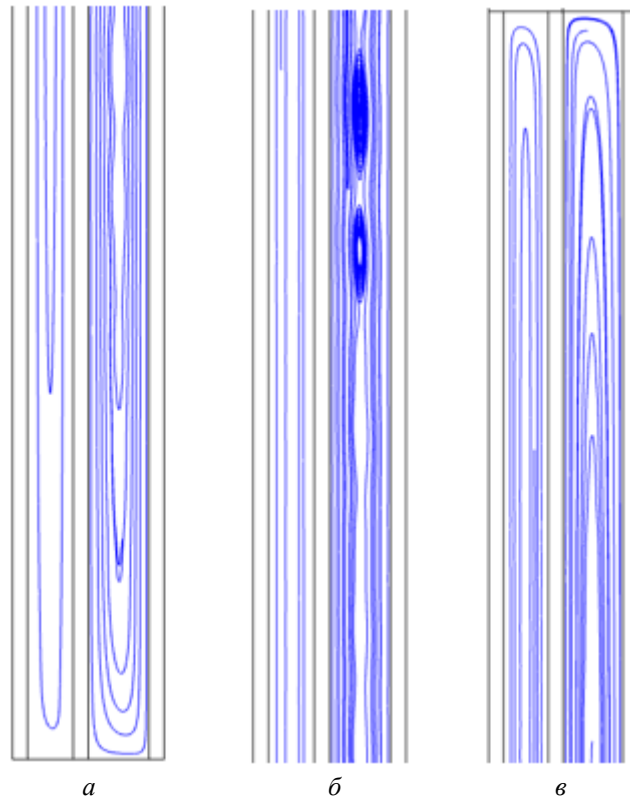
Проведена серія чисельних експериментів для різних геометричних параметрів склопакетів, різних зовнішніх умов (від -20°C до 0°C), різних наповнювачів (аргон, криптон, повітря), а також комбінації наповнювачів.

В якості прикладу наведено результати розрахунків для двокамерного склопакету товщиною 40 мм. Висота та ширина склопакету становлять відповідно 1.3 м та 1 м. Товщина скла 4 мм, а ширина камер, заповнених повітрям $h_1=12$ мм та $h_2=16$ мм (рис.1). Зовнішня температура -20°C , внутрішня $+20^{\circ}\text{C}$. Як бачимо, в камерах склопакета формується складна структура конвективних потоків. У внутрішній камері спостерігається більш інтенсивний конвективний рух в порівнянні з зовнішньою камерою. Максимальні швидкості локалізуються в центральному фрагменті склопакету. В приграничних шарах біля поверхні скла формуються висхідний та низхідний потоки, а в центральній області спостерігаються циркуляційні комірки (рис.2).



а – нижній фрагмент; б – середній фрагмент; в – верхній фрагмент.

Рис. 1 – Розподіл швидкостей (ізоахи) конвективних потоків в камерах склопакета.

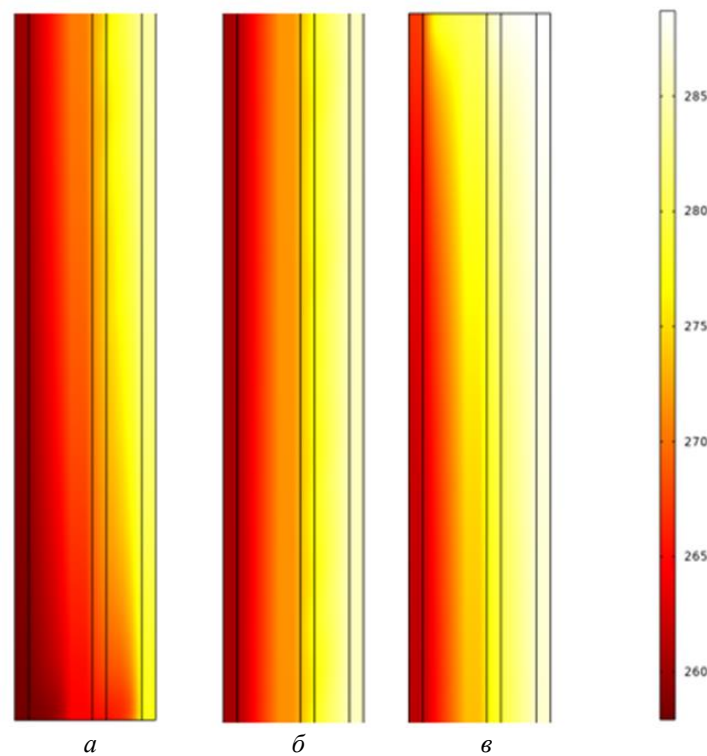


а – нижній фрагмент; б – середній фрагмент; в – верхній фрагмент.

Рис. 2 – Лінії току в камерах склопакета.

На рис.3 наведено розподіл температури для різних фрагментів склопакету. Неоднорідний розподіл температури обумовлено наявністю конвективних потоків в камерах склопакету за рахунок те-

мпературних градієнтів. В верхній частині склопакету формується зона підвищеної температури в порівнянні з нижньою частиною. В центральній області розподіл температури по ширині склопакету майже незмінний.



а – нижній фрагмент; б – середній фрагмент; в – верхній фрагмент.

Рис. 3 – Розподіл температури в двокамерному склопакеті.

COMSOL Multiphysics має інструменти, які дозволяють обчислювати інтегральні теплофізичні характеристики, локальний та загальний теплові потоки, тепловий опір, визначати максимальну, мінімальну, середню температуру. На рис. 4 наведено загальні витрати тепла через площину склопакету в залежності від співвідношення розмірів та видів наповнення повітряних камер. У всіх випадках сума розмірів зовнішнього зазору h_1 та внутрішнього h_2 складала 28 мм. Значення $h_1=0$ мм та $h_1=28$ мм по суті відповідають варіантам однокамерних склопакетів з різною товщиною скла. Підтверджена передбачувана ефективність теплоізоляційних властивостей склопакетів з інертними газами. Як показують розрахунки, товщина скла слабо впливає на загальну теплоізоляцію, оскільки коефіцієнт теплопровідності скла досить високий. Більш впливовими факторами, які визначають тепловий опір, є кількість камер склопакету, наповнення камер інертними газами замість повітря, збільшення товщини склопакету. Але реалізація цих конструктивних особливостей суттєво збільшує вартість продукту.

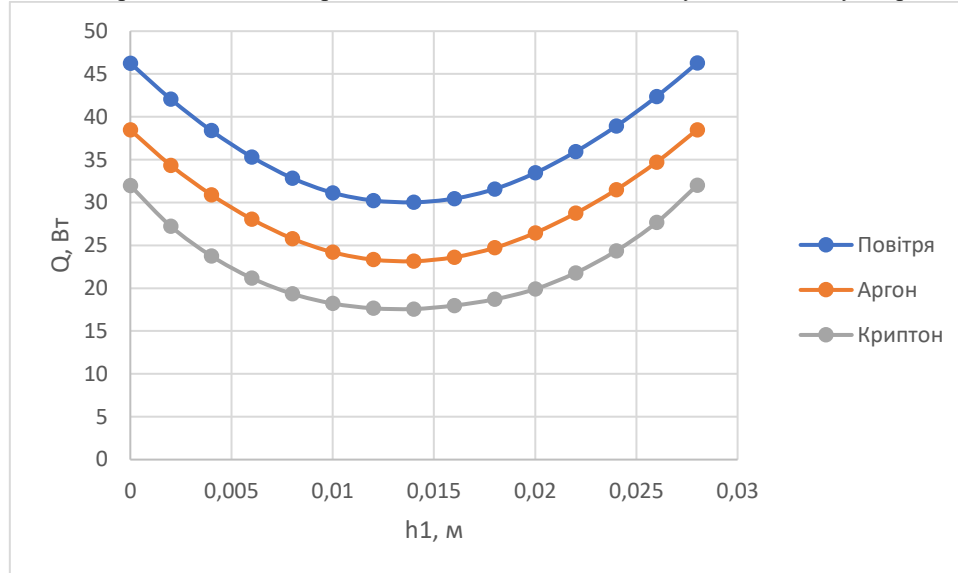


Рис. 4 – Витрати тепла через площину склопакету в залежності від ширини зовнішньої камери

На рис. 5 наведено розрахунок теплового опору склопакету в залежності від ширини зовнішньої камери h_1 . Як бачимо, найменші втрати тепла відповідають випадку, коли $h_1=h_2$.

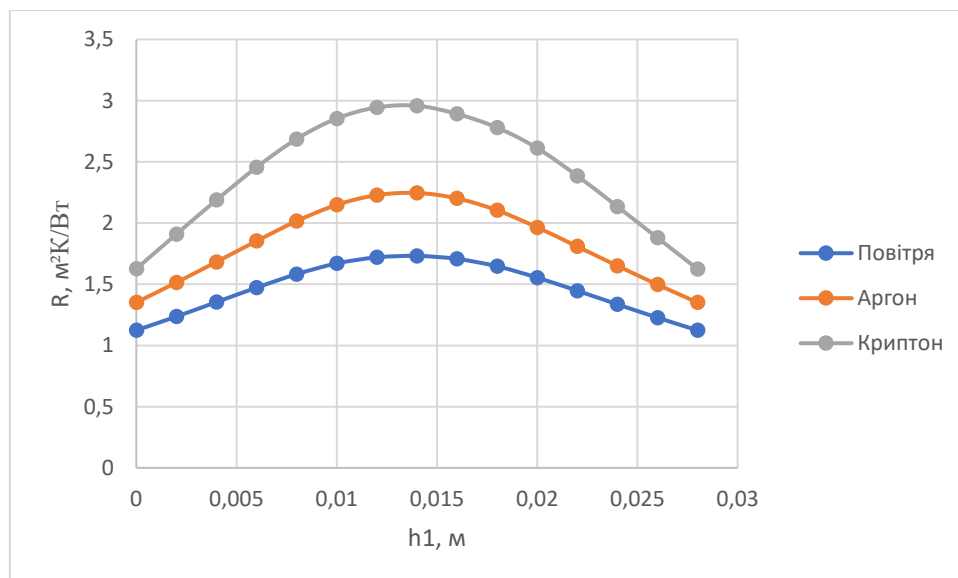


Рис. 5 – Тепловий опір склопакету в залежності від ширини зовнішньої камери h_1 та виду наповнювача.

На рис. 6 наведено розрахунок теплового опору склопакету в залежності від зовнішньої температури та ширини камери h_1 . Температура в середині приміщення залишалась на рівні 20°C. Для розрахунку використовувалась різниця температур в середині приміщення та зовні. Враховуючи кон-

вективний теплообмін, температури зовнішніх поверхонь склопакету будуть відрізнятися від температур оточуючого середовища. То ж, якщо використовувати для розрахунку різницю зовнішніх температур поверхонь склопакету, результати будуть відрізнятися від наведених.

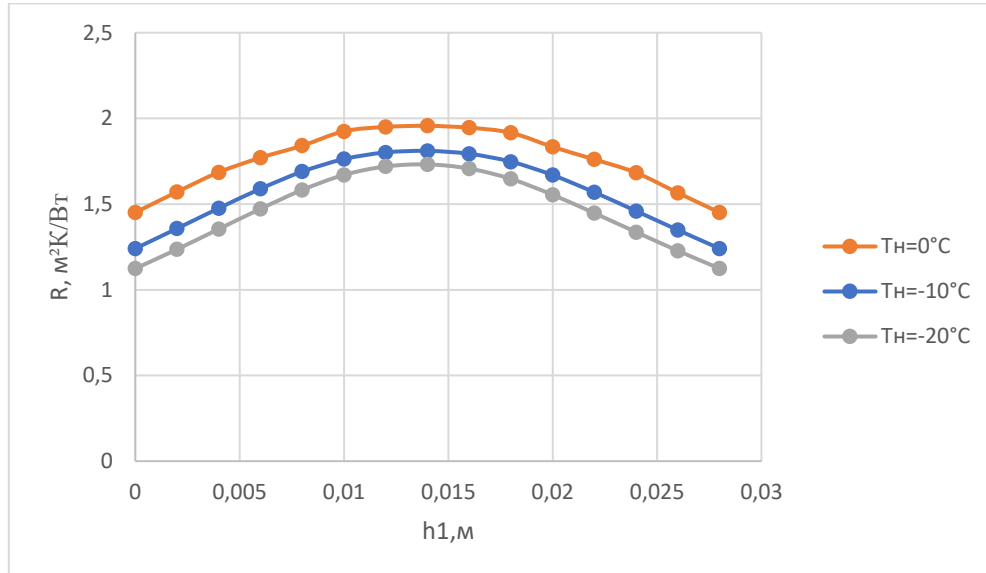


Рис. 6 – Тепловий опір склопакету з повітряним наповненням камер в залежності від зовнішньої температури T_n та ширини камери h_1 .

Представлена модель дозволяє оцінювати теплофізичні характеристики склопакетів довільної геометрії, з різною кількістю камер, різною товщиною скла, а також для різних наповнювачів та ширини камер. Результати розрахунків дозволяють обґрунтовано обирати варіанти склопакетів для певних кліматичних умов.

Список літератури:

1. Голубев С.С. Численное моделирование сложного теплообмена в стеклопакете с учетом его деформирования // Вестник МГСУ. 2012. № 12. С. 47—52.
2. Varapaev V.N., Golubev S.S. Comparison of Exact and Approximate Analysis of Heat Radiation of Boundaries in the Numerical Solution of the Conjugate Problem of Natural Convection in a Vertical Layer of Windows // Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering. 2011, no. 8, pp. 129—136.
3. Корепанов Е.В. Свободная конвекция в воздушных прослойках окон с двойным

остеклением // Известия вузов. Строительство. 2005. № 2. С. 106—112.

4. Густавсен А., Туз Ю.В. Численное моделирование естественной конвекции в трехмерной воздушной полости с высокой вертикальной пропорцией и низкой горизонтальной пропорцией // Журнал строительной физики. 2007. 30(3). С. 217—240.

5. Orhan Aydın. Conjugate heat transfer analysis of double pane windows. //Building and Environment. Volume 41, Issue 2, February 2006, Pages 109-116.

6. R. Dalal, D. Naylor, D. Roeleveld. A CFD study of convection in a double glazed window with an enclosed pleated blind// Energy and Buildings. Volume 41, Issue 11, November 2009, Pages 1256-1262

7. S.Z. Movassag, K. Zamzarian, Numerical investigation on the thermal performance of double glazing air flow window with integrated blinds// Renewable Energy, 148 (2020), p. 852-863,