

УДК 699.86:620.9(02)

Лапенко Марія Олександрівна,
магістр,
Національний авіаційний університет,
ORCID 0000-0003-2622-8743
maria.lapenberg76@gmail.com

СУЧАСНА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЛІ З РІЗНИМИ УТЕПЛЮВАЧАМИ

*Сучасна енергетика — це ключовий фактор економічної і соціально-політичної стабільності будь-якого суспільства. Тому енергетика повинна бути ефективною, а це здійснюється сучасними технологіями і раціональним використанням теплової енергії. Найбільш ефективним шляхом поліпшення енергозабезпечення України є максимально можлива енергоощадність. Варто зауважити, що на одиницю внутрішнього валового продукту ми витрачаємо енергії в 2–3 рази більше, ніж у розвинутих країнах. Таким чином, дослідження опору теплопередачі огорожувальних конструкцій на основі використання сучасних науково-технічних засобів з метою раціонального використання теплової енергії є **актуальною** задачею.*

Мета дослідження полягає в вивченні проблеми та визначенні енергоефективності будівлі за допомогою порівняння теплопровідності зовнішніх стін із різних матеріалів та з різними утеплювачами.

Потреба в енергії, що постійно зростає, є однією з основних проблем, що стоять перед економічним, промисловим, екологічним, соціальним та академічним розвитком людства. У звіті за 2018 рік від Міжнародного енергетичного агентства (IEA) було зазначено, що в тому році глобальне споживання енергії зросло майже вдвічі порівняно зі звичайним приростом з 2010-го року.

Незалежно від способу життя та виду діяльності, люди все більше часу проводять усередині приміщень, тому заощадження енергії будівель є досить гострою потребою. Відомо, що 1/3 усієї первинної

енергії та 40% енергетичних ресурсів у всьому світі споживається так званим забудованим середовищем, всупереч загальній думці про те, що «люди використовують енергію, а не будівлі». Тому споживання енергії в будинку за рахунок використання систем опалення, охолодження, вентиляції та штучного освітлення у поєднанні з поведінкою та звичками споживачів енергії (мешканців будинку чи працівників офісу) значно впливає на загальні характеристики будівель, що в цьому випадку можна назвати енергоефективністю будівлі.

Ключові слова: енергоефективність будівлі, огороджувальні конструкції, опір теплопередачі, теплопровідність, тепловий потік, мікроклімат приміщення.

Lapenko Mariia,
MSc Graduate,
National Aviation University,
ORCID 0000-0003-2622-8743
maria.lapenberg76@gmail.com

A MODERN APPROACH TO MEASURING THE ENERGY EFFICIENCY OF THE BUILDING WITH DIFFERENT INSULATION MATERIALS

The key factor of economic, social, and political stability of any society is modern strategies in the energy sector. Therefore, the energy sector must be effective which can be done by applying new technologies and efficient thermal energy use. In Ukraine, the most effective way to improve energy supply is a maximum energy-saving approach. Noteworthy, Ukrainians spend 2-3 times more energy per unit of gross domestic product, compared to developed countries. Hence, there is an urgent need to conduct research on heat transfer resistance in building insulation based on modern scientific and technical tools in order to use thermal energy efficiently.

The research aim is to determine and measure the energy efficiency of the building by comparing the thermal conductivity of external walls of different materials and insulation types.

The growing need for energy has become one of the main challenges mankind should face in order to continue the economic, industrial, environmental, and social developments. In a 2018 report made by International Energy Agency (IEA), it was noted that global energy consumption had almost doubled in 2018 compared to normal growth since 2010.

Regardless of their lifestyle, nowadays people spend considerably more time indoors, hence energy saving has become a pressing need for everyone. It is known that 1/3 of all primary energy and 40 % of world energy resources are consumed by the so-called “built” environment. Therefore, energy consumption by means of heating, cooling, ventilation, artificial lighting systems combined with the habits of energy consumers (e.g. house residents or office workers) significantly affects the overall characteristics of the building, which in this case can be called energy efficiency.

Key words: *energy efficiency of a building, building insulation, heat transfer resistance, thermal conductivity, heat flow, the microclimate of premises.*

ВСТУП

Одним із головних та ключових елементів енергоефективності будівлі чи споруди є огорожувальна конструкція, чи теплоізоляція. Огорожувальна конструкція будівлі є бар'єром між двома середовищами – зовнішнім та внутрішнім, які мають різну температуру, що залежно від кліматичної зони може мати велику різницю. Повна теплоізоляція споруди на етапі її будівництва або під час реконструкції зазвичай збільшує загальні витрати на матеріали та проведення робіт, проте в подальшому допомагає заощадити значно більше через зменшення витрат на охолодження чи підігрів приміщень.

Теплоізоляція – це широко доступна та перевірена технологія, яка допомагає власнику будівлі не лише економити енергію та зменшувати витрати, а також і скоротити відсоток втраченого тепла. Якісно встановлена огорожувальна конструкція забезпечує енергоефективність у кожній частині будівлі чи споруди, включаючи не лише стіни та фасади, а й, наприклад, дахи. Також вони застосовуються для труб та котлів, щоб зменшити втрати енергії технічного обладнання будівлі. Використання огорожувальних конструкцій

у будівлях є актуальним як у холодних, так і в теплих регіонах, оскільки у холодних областях теплоізоляція підтримує будівлю в теплі та зменшує потребу в додатковій енергії для опалення приміщень, тоді як у теплих місцевостях ті самі системи ізоляції утримують тепло та вирішують проблему кондиціонування.

Зовнішня стіна вважається якісно ізолюваною, якщо значення її опору теплопровідності (R) є високим, це означає, що тепловтрати через неї не є значущими. Саме огорожувальна конструкція є ключовим елементом стіни для досягнення високого значення R .

Іншим питанням є товщина та матеріал огорожувальних конструкцій. Щоб обмежити товщину теплоізоляції, виробники даних матеріалів мають постійно покращувати їхню теплопровідність, тим самим забезпечуючи підвищений тепловий опір за однакових температурних та технічних умов.

Товщина та матеріал огорожувальних конструкцій стосується й іншого питання – зовнішнього вигляду будівлі, її естетичність займає не останнє місце у вимогах до будівництва та дизайну.

Використання огорожувальних конструкцій під час зведення будівель та споруд є економічним, екологічним та соціально-відповідальним підходом до життя. Теплоізоляція є одним із визначальних факторів ефективності будівлі загалом і енергоефективності зокрема.

Питання ефективності будівель та споруд є одним із найважливішим у останні роки, оскільки стосується не лише загально-відомих понять та явищ як захист навколишнього середовища, економічне використання ресурсів, збереження енергії, а й досить нового терміну – сталості довкілля. Під час свого життя та діяльності людство несприятливо впливає на екосистеми, що впливає на якість життя і благополуччя всього живого на планеті. Поєднання екологічного та економічного підходів до життя враховує багато факторів, серед яких і соціальний, етичний та фінансовий чинники. Цей підхід має стати нормою не лише для держав на рівні міжнародного та національного законодавств та програм, а й на рівні споживання звичайних користувачів, тобто кожного з нас. Існує декілька способів створення умов життя, сприятливих для сталості довкілля, серед них: «екопоселення», «стабільні міста» (або «еко-міста»),

етичне споживання та «зелена» економіка. Їх усіх об'єднує прагнення до збереження ресурсів та ефективного їх використання. Першим кроком до «зеленого» та більш економічно- та енергоефективного способу життя для кожного з нас є можливість збереження тепла у наших домівках та в офісних чи промислових спорудах за допомогою огороджувальних конструкцій, або теплоізоляції.

Дослідження енергоефективності будівель та споруд є популярною темою для досліджень. Енергоефективне будівництво, яке обговорюється в наукових роботах, вивчає, що потрібно для зведення будівель з урахуванням збереження природних ресурсів та енергії. Багато науковців^{1,2} внесли великий вклад у розробку, розвиток, а потім і поширення огороджувальних конструкцій. Енергоефективні дослідницькі роботи, що освітлюють зведення будівель та споруд, ілюструють, що будівництво або реконструкція будинку з урахуванням енергоефективності зменшує довгострокові корпоративні або особисті витрати та в майбутньому сприятиме збільшенню прибутків або скороченню витрат.

1. Основна частина

Енергоефективність будівлі – це її властивість, а також її конструктивні елементи та спеціальне обладнання, що надають можливість людям перебувати або проживати в ній завдяки оптимальним мікрокліматичним умовам, допустимим значенням енерговитрат, вентиляції, водопостачанню з урахуванням місцевих кліматичних показників.

Огородження – це будівельна конструкція, яка створює теплоізоляційну оболонку навколо житлового будинку, щоб підтримувати оптимальний температурний рівень (зберігати тепло чи охолоджувати) всередині нього та захищати його від зовнішніх кліматичних впливів, а також розділяти його на окремі частини або приміщення з різними температурними і вологісними умовами.

¹ Гнатишин Я.М., Криштапович В.І. Теплотехніка: навч. посіб. – К.: Знання, 2008. – 364 с.

² Сергейчук О.В. Геометричне моделювання фізичних процесів при оптимізації форми енергоефективних будинків : дис. ... доктора техн. наук : 05.01.01 / Сергейчук Олег Васильович. – Київ, 2008. – 425 с.

Мінімальні значення, що характеризують будівлю, її конструктивні елементи, спеціальне обладнання, а також допустиме споживання енергії на одиницю опалюваної (охолоджуваної) площі чи об'єму будівлі, що визначається на основі економічно обґрунтованого рівня енергоефективності будівлі, мають відповідати вимогам людей, які перебувають чи проживають в ній, і називаються мінімальними значеннями енергоефективності будівлі. Також вводиться значення компактності будівлі, що визначається відношенням загальної площі внутрішніх поверхонь ізоляційних конструкцій та об'єму будівлі, що опалюється чи охолоджується.

$$A_{bci} = \frac{A_{\Sigma}}{V}; \quad (1)$$

де A_{Σ} – це загальна площа внутрішніх поверхонь ізоляційних конструкцій, що включає перекриття та підлогу, м²;

V – об'єм будівлі, визначений згідно з ДСТУ³ Б EN ISO 13790, м³.

При проектуванні новобудов, реконструкції чи капітальному ремонті будівель шари теплоізоляційних матеріалів варто розміщувати із зовнішньої сторони опорних стін.

Наявність в ізоляції теплопровідних включень призводить до зміни температури в її товщі у двох або й трьох напрямках. Так, маємо справу з двовимірним (плоским) чи тривимірним полем. В ізоляційних конструкціях будівель плоске температурне поле виникає за наявності елементів каркасу, рядів, перемичок тощо, довжина яких значно перевищує товщину ізоляції.

Диференціальне рівняння для плоского температурного поля в прямокутній системі координат OXY виглядає як:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0; \quad (2)$$

Інтегрувати це рівняння аналітично досить важко, що ускладнюється ще й наявністю в полі матеріалів із різними коефіцієнтами

³ ДБН В.1.2-14-2008 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. Київ. Мінрегіонбуд України 2009, с. 15.

теплопровідності. Тому зазвичай дана задача розв'язується числовим інтегруванням за допомогою методу скінченних різниць. Він заснований на заміні диференціальних операторів різницевиими операторами, інтегралів — сумами, а функцій неперервного аргументу — функціями дискретного аргументу. Така заміна приводить до системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, які зрештою зводяться до лінійної системи деяким ітераційним методом. Дана система рівнянь містить значення температур в точках поля, розташованих у вузлах квадратної сітки з довжиною сторони, що дорівнює прийнятому розміру Δ , невідомі. Ця сітка обрана таким чином, щоб напрямком однієї сторони був паралельним, а іншої — перпендикулярним до основного напрямку руху теплового потоку.

У постійному температурному полі сума кількості тепла, що рухається від вузла з координатами X до сусідніх вузлів має дорівнювати нулю. Згідно з цією умовою можна визначити найпоширеніший вираз для температури $\tau_{x,y}$ у вузлі з координатами X, Y :

$$\tau_{x,y} = \frac{k_{x-1} \cdot \tau_{x-1,y} + k_{y+1} \cdot \tau_{x,y+1} + k_{x+1} \cdot \tau_{x+1,y} + k_{y-1} \cdot \tau_{x,y-1}}{k_{x-1} + k_{y+1} + k_{x+1} + k_{y-1}}; \quad (3)$$

де $\tau_{x-1,y}, \tau_{x,y+1}, \tau_{x+1,y}, \tau_{x,y-1}$ — температура в сусідніх вузлах сітки, K ; $k_{x-1}, k_{y+1}, k_{x+1}, k_{y-1}$ — коефіцієнти теплопередачі у напрямку сторін сітки між точкою X, Y та сусідніми точками, $W/(m^2 \cdot K)$.

Для визначення коефіцієнтів теплопередачі між вузлами сітки використовуються наступні правила:

1. Припустимо, що з вузла з температурою $\tau_{x,y}$ до вузла з температурою $\tau_{x,y+1}$ тепло передається лише в межах квадрата $abcd$ (Рис. 1.1). Тоді коефіцієнт теплопередачі k_{y+1} визначається як величина, протилежна до термічного опору квадрата $abcd$. Термічний опір даного квадрата визначається за формулою ізоляції, рівномірність матеріалу якої порушено і в перпендикулярному, і в паралельному до теплового потоку напрямках.

2. Теплопередача з вузла з температурою $\tau_{x,y}$ до вузла з температурою $\tau_{x+1,y}$ здійснюється в межах квадрата $hknm$, і до вузла з температурою $\tau_{x-1,y}$ — в межах квадрата $ghml$. Термічний опір даних квадратів визначається як для двошарової ізоляції.

3. У напрямку вузла з температурою $t_{x,y-\Delta}$ відбувається теплопередача у квадраті $cdfe$, термічний опір якого визначається за формулою для ізоляції, що складається з двох матеріалів, кожен із яких товщиною Δ .

4. Для квадратів з одного матеріалу, коефіцієнт дорівнює $k = \lambda/\Delta$, де λ – це теплопровідність матеріалу, $(m \cdot K)/W$, а Δ – відстань між вузлами сітки, м.

5. Якщо вузол із температурою $t_{x,y}$ лежить у площині, що межує з повітряним середовищем, то коефіцієнт теплопередачі в повітря дорівнюватиме відповідному значенню коефіцієнта сприйняття теплоти α_v або теплопередачі α_n . Тоді значення k для сусідніх вузлів, що лежать у даній площині, приймаються за 0,5, оскільки теплопередача через матеріал в напрямку даних вузлів відбуватиметься лише на площі, що дорівнює половині квадрата сітки, бо через повітря, де знаходиться друга половина квадрата, теплопередача не здійснюється.

Температурне поле розраховується за допомогою ітераційного методу. Приблизні значення температур призначаються усім вузлам в обчислювальній сітці інтуїтивно. Потім за формулою послідовно визначаються величини температур у всіх вузлах, що замінюють попередні, допоки відповідні рівняння в кожному вузлі сітки не будуть задовольняти ці значення. Розрахунки закінчуються тоді, коли значення температур перетворюються на константи у всіх вузлах сітки згідно з заданою точністю обчислень.

Кліматичні фактори визначають тривалість експлуатації будівель та споруд, оскільки атмосферний тиск, зміни вітру та температури є визначними характеристиками навантажень на будівельні конструкції. Урахування зовнішніх кліматичних умов впливає на вирішення проблем збереження енергетичних та паливних ресурсів, покращення ефективності капіталовкладень, надійності та тривалості експлуатації конструкцій будівель та споруд, зменшення вартості будівництва та покращення умов роботи та життя людей.

Незалежно від типу будівлі, проектувальники намагаються створити оптимальне штучне середовище для усіх процесів, що мають відбуватися в ній. Оптимальність такого середовища визначається

мікрокліматом приміщень. Параметрами мікроклімату є температура повітря у приміщенні $t_{в}$, °С, його відносна вологість $\phi_{в}$, %, швидкість вітру $v_{в}$, m/s, а також ізоляція, світлові та звукові характеристики приміщення. Необхідні значення даних параметрів, які мають бути в приміщенні, встановлено різними регулятивними документами^{4;5;6}. У таблиці 1.1 наведено встановлені значення параметрів мікроклімату житлових приміщень в Україні.

Таблиця 1

Температура повітря, $t_{в}$, °С	Відносна вологість, $\phi_{в}$, %	Швидкість вітру, $v_{в}$, м/с	Мін. тривалість інсоляції на період з 22 березня по 22 вересня, год.	Коефіцієнт природного освітлення, е, %	Допустимий рівень шуму, дБ
18 + 22	50 ÷ 60	0,1 + 0,15	2,5 ÷ 0,5	0,5	$\frac{L_{А \text{ екв доп}}}{L_{А \text{ макс доп}}} = \frac{30 - 40}{45 - 50}$

Мікроклімат кімнати формується під впливом зовнішнього клімату, технологічних процесів, що виконуються в кімнаті, а також властивості будівлі змінювати клімат всередині. Обмін тепла, повітряних потоків та вологості між середовищем та кімнатою здійснюється постійно (рис. 1).

Огороджувальні конструкції виступають буфером між кліматом зовнішнього середовища та мікроклімату приміщень. Тому вони мають захищати кімнати від несприятливих погодних умов та

⁴ ДБН А.2.2-1-2003. Склад і зміст матеріалів оцінки впливів на навколишнє середовище (ОВНС) при проектуванні і будівництві підприємств, будинків і споруд. Основні положення проектування., затв.наказом Держбуду України від 15.12.2003 р. N 214 (введені в дію з 1 квітня 2004 р.).

⁵ ДБН В.1.2-2:2006 Навантаження і впливи. Норми проектування Київ. Мінбуд України 2006, с. 75.

⁶ ДБН В.2.6-31:2006. [Чинні від 2007-04-01]. Теплова ізоляція будівель. Мінбуд України – К. : Укрархбудінформ, 2006. – 65 с. – (Державні будівельні норми України).

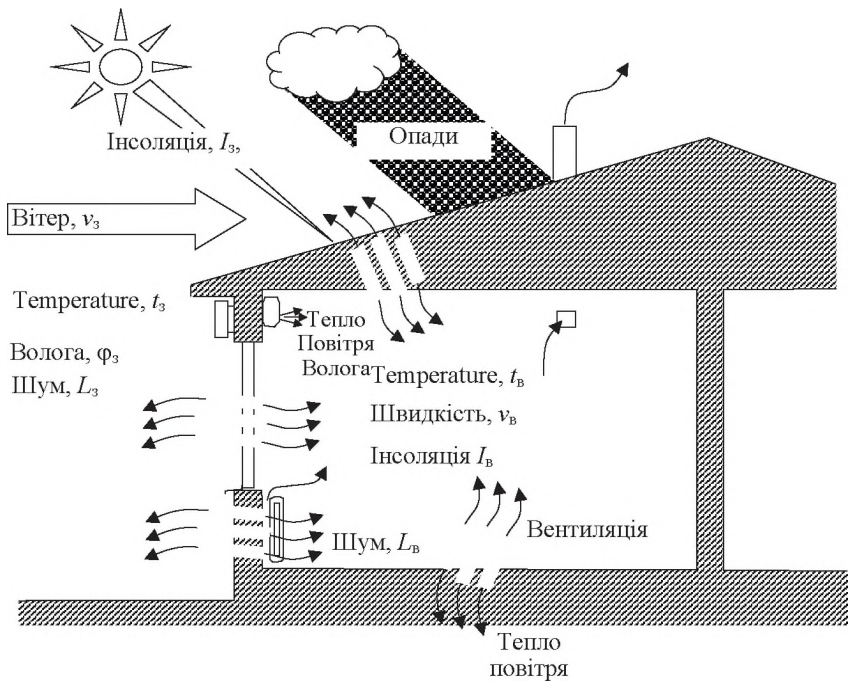


Рисунок 1 – Значення параметрів мікроклімату житлових приміщень

не перешкоджати сприятливим. Для цього здійснюються наступні фізичні та технічні розрахунки огорожувальних конструкцій:

- термічні розрахунки (опір теплопередачі, стійкість до паропроникності, опір повітропроникності, тепловий опір конструкцій, поглинання тепла підлогою);
- ізоляційні розрахунки (тривалість утеплення приміщення, проектування приладів для захисту від сонця);
- світлові розрахунки (коефіцієнт природнього освітлення — рівномірність освітлення);
- акустичні розрахунки (звукоізоляція зовнішніх огорожень).

Також огорожувальні конструкції мають забезпечувати надійно вологостійкість приміщень від опадів та вологості ґрунту.

Інший вид розрахунків, пов'язаний із погодними умовами ділянки, на якій здійснюється будівництво, бере до уваги навантаження на конструкцію будівлі чи споруди від снігу, вітру, льодових утворень та інших температурних впливів.

2. Розв'язання задачі теплопровідності за допомогою МСЕ

Розглянемо метод скінченних елементів як приклад простої одновимірної стаціонарної задачі, що дозволить постежити процедуру розв'язання простих математичних задач за допомогою МСЕ.

Основою такої задачі є аналітичний вираз, хоча більшість інженерних задач не є аналітичними. Це пояснюється тим, що чекати точного розв'язку інженерних задач не варто, оскільки зазвичай вони взагалі не мають розв'язку. Тому для вирішення таких завдань, як правило, використовують наближені методи чисельного аналізу, які дають результати, точність яких є достатньою для практичних завдань і не перевищує точність вхідних даних.

За МСЕ область вивчення даної функції поділяється на ряд піддоменів звичайної форми. Функції, які потрібно знайти, апроксимуються в межах кожного піддомену за допомогою поліномів так, що коефіцієнти поліномів апроксимації мають значення шуканих функцій у кількості так званих вузлових точок піддомену. Піддомен із виділеними вузловими точками називається скінченним елементом. Взаємодія між скінченними елементами відбувається лише у вузлових точках. Розв'язком задачі є визначення шуканих функцій у вузлах сітки скінченних елементів. Проблема визначення вузлових значень, як правило, вирішується за допомогою відповідного варіаційного принципу. Функції апроксимації, що використовуються, зводять задачу знаходження стаціонарних умов відповідної функції до задачі знаходження екстремуму функції багатьох змінних. Система лінійних алгебраїчних рівнянь із значеннями потрібної функції у вузлах є системою основних рівнянь МСЕ та умовою знаходження екстремуму.

При використанні МСЕ для вивчення деформованого стану тіла задача найчастіше розв'язується за допомогою зміщень. У цьому

випадку знаходяться наближені функції для зміщень всередині сітки скінченного елемента, що утворюють кінематично допустимі поля зміщення в межах усієї області дослідження. Вузлові зміщення визначаються на основі варіаційного принципу Лагранжа, який з усіх кінематично допустимих зміщень вирізняє поле зміщення, яке задовольняє умови рівняння рівноваги.

Рівняння Лагранжа виглядає наступним чином:

$$\delta\Pi = 0, \quad (4)$$

де Π – повна потенціальна енергія пружної системи, що складається з потенціальної енергії деформації та потенціальної енергії зовнішніх сил.

Варіаційне рівняння Лагранжа прямує до системи лінійних алгебраїчних рівнянь вузлових зміщень, які у своєму фізичному розумінні є рівняннями рівноваги вузлів. Цей принцип варіаційного числення також забезпечує виконання умов рівноваги лише в певних межах. Реальна рівновага спостерігається лише тоді, коли значення всіх внутрішніх та зовнішніх сил, що діють на можливі зміщення, будуть однаковими за довільних варіацій зміщень.

Відомо, що однією з головних ідей МСЕ є ідея апроксимації функції неперервного зміщення (у нашому випадку – температури), дискретної моделі кусково-неперервних функцій, кожна з яких визначена на скінченному елементі.

Для здійснення апроксимації зазвичай застосовують повні чи неповні поліноміальні функції різного порядку. Кількість коефіцієнтів многочлена апроксимації визначається кількістю незалежних параметрів або кількістю ступенів свободи скінченного елемента, за допомогою чого функція інтерполюється всередині даного елемента.

Порядок інтерполяційного многочлена не може бути меншим першого, тому апроксимація функцій за допомогою лінійного многочлена називається симплексним наближенням. Скінченні елементи називаються елементами симплекса в даному випадку.

Розв'язуючи задачу теплової пружності, необхідно знати розповсюдження температурного поля. Тому перед розв'язаннями задачі

термондружності варто розв'язати вільові рівняння задачі теорії теплопроводності. Задача теорії стаціонарної теплопроводності є граничною задачею математичної фізики, яка зводиться до розв'язання диференціальних рівнянь теплового балансу певної області за вільних граничних умов.

Отже, для привимірного прикладу задачі теорії теплопроводності описується наступним диференціальним рівнянням:

$$(5) \quad K^{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K^{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K^{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + w = \rho c \frac{\partial T}{\partial t},$$

де $T = T(x, y, z, t)$ - температура поля в області ; K^{xx}, K^{yy}, K^{zz} - коефіцієнти теплопроводності у напрямках x, y, z ;

$w = w(x, y, z, t)$ - потужність ажера тепла всередині тіла;

ρ - щільність матеріалу;

c - питома теплоота матеріалу тіла.

Для розв'язання даної задачі, потрібно встановити граничні умови. Існує три види граничних умов для задачі даного типу.

1. Гранична умова першого роду, коли температура T задається на частині поверхні тіла:

$$(6) \quad T = T(x, y, z, t),$$

2. Гранична умова другого роду, коли на частині поверхні тіла подається тепловий потік:

$$(7) \quad K^{xx} \frac{\partial T}{\partial x} l_x + K^{yy} \frac{\partial T}{\partial y} l_y + K^{zz} \frac{\partial T}{\partial z} l_z = -q,$$

3. Гранична умова третього роду, коли на частині поверхні тіла відбувається конвективний теплообмін:

$$(8) \quad K^{xx} \frac{\partial T}{\partial x} l_x + K^{yy} \frac{\partial T}{\partial y} l_y + K^{zz} \frac{\partial T}{\partial z} l_z = -h(T_s - T_b),$$

Розв'язання задачі такого типу входить до знаходження мінімуму функції. Отже, виходячи з принципу варіаційного числення, потрібно розв'язати задачу варіаційного числення на скінченній області, створивши при цьому певну кількість вузлів. Ступенями свободи

виступить температура у вузлах. Температури вузлів утворюють вектор невідомих змінних.

Розглянемо граничні умови задачі теплопровідності детальніше. У загальному випадку теплопровідність – це передача тепла шляхом прямого контакту частинок тепла з різними температурами. За теплопровідності температура всередині тіла є різною і неперервною між дотичними частинками тіла. Значення температури в усіх точках тіла в будь-який момент часу називається температурним полем тіла.

Температурне поле може бути змінним (нестационарним) та постійним (статичним) у часі та мати різні значення температури в одному, двох та трьох вимірах. Відповідно, існує три типи температурного поля: одно-, дво- та тривимірне. Воно представляється ізотермічними поверхнями та лініями, що з'єднують точки тіла з однаковою температурою.

Найбільш різка зміна температури тіла відбувається у напрямку, перпендикулярному до ізотермічних поверхонь. Якщо $\Delta t = t_1 - t_2$ – це нескінченно мала зміна температури між ізотермічними поверхнями (або лініями) в цьому напрямку і Δx – це нескінченно мала відстань між ними, то границя відносної температури Δt до відстані Δx називається температурним градієнтом. Градієнт температури – це векторна величина, що характеризує ступінь зміни температури на одиницю довжини у напрямку її підвищення.

Тепловий потік – це інший вектор, напрямком якого є протилежним до вектора градієнта температури, але збігається з напрямком теплопередачі, а його абсолютне значення виражає інтенсивність теплопередачі. Тепловий потік (тобто інтенсивність передачі тепла за теплопровідністю) є пропорційним градієнту температури (за законом Фур'є).

Використовуючи закон Фур'є та закон збереження енергії, процес теплопровідності аналітично зображується у вигляді диференціального рівняння теплопровідності, що показує залежність між температурою, часом та координатами елемента тіла.

Розв'язуючи диференціальне рівняння теплопровідності, можна знайти температурне поле, тепловий потік всередині тіла

в будь-який момент часу та кількість тепла, що рухається з однієї частини тіла в іншу з плином часу.

Найпростіший випадок теплопередачі за теплопровідністю – це статичний теплообмін через плоску однорідну стінку товщиною δ з коефіцієнтом теплопровідності матеріалу λ незмінної температури t_1 та t_2 на її поверхнях.

Конвективний теплообмін відбувається в рідинах та газах і являє собою теплопередачу рухомими масами рідини чи газу.

У загальноприйнятому розумінні конвективний теплообмін – це процес передачі тепла між безпосередньо поверхнею дотику твердого тіла з рухомою рідиною або газоподібним середовищем. Виділяють два типи конвекції – природна та примусова. Природна конвекція обумовлена наявністю різниці температур у рідкому чи газоподібному середовищах та пов'язаною з цим зміною щільності відповідно до об'єму середовища. Різниця температур у навколишньому середовищі спричинена наявністю джерела, що виділяє тепло в середовище чи поглинає тепло з нього.

Джерелом виділення тепла у повітря виступають гарячі поверхні нагрівальних приладів, а поглинання тепла з повітря здійснюється внутрішніми поверхнями зовнішніх огорожувальних конструкцій, зо взимку мають нижчу температуру, ніж повітря всередині.

При контакті з цими поверхнями повітря нагрівається (охолоджується) і піднімається вгору (або опускається донизу). На його місці нові повітряні маси теж піддаються нагріванню чи охолодженню. Так відбувається циркуляція повітряних мас з однієї частини приміщення в іншу, що викликає конвективний теплообмін між дотичними повітряним середовищем та внутрішньою поверхнею огорожувальної конструкції.

Одним із видів зовнішнього навантаження у вирішенні задачі теплопровідності є теплопередача через випромінювання. Така передача тепла здійснюється від фізичного тіла у повітряне середовище незалежно від його температури і супроводжується тепер створенням теплової енергії граничного шару тіла в енергію випромінювання, яка поширюється в середовищі. Коли інші тіла потрапляють на цю поверхню, одна частина енергії випромінювання

виділяється у середовище, а інша поглинається поверхнею цих тіл і перетворюється на теплову енергію.

Енергія випромінювання, що відбивається від поверхні тіла, приєднується до енергії, що випромінюється ним, утворюючи ефективне випромінювання, яке в свою чергу поглинається іншими тілами чи відбивається від них.

Випромінювання, поглинання та відбиття енергії випромінювання тілом з температурою вище абсолютного 0°C здійснюється постійно і незалежно від температури навколишнього середовища. У результаті цього між тілами відбувається теплообмін. Залежно від різниці між випромінюваною та поглиненою енергією тіла, воно може нагріватися чи охолоджуватися і, таким чином, передавати тепло від більш нагрітих тіл до менш нагрітих за допомогою випромінювання. За однакової кількості випроміненої та поглиненої енергії тіло перебуває у тепловій рівновазі і через це його температура залишається незмінною.

За законом Стефана-Больцмана кількість тепла, що випромінюється одиницею поверхні будь-якого тіла за одиницю часу, є пропорційною четвертому степеню абсолютної температури T .

3. Принцип здійснення розрахунків у ПК «Ліра САПР»

Під час роботи було використано найновішу версію ПК «Ліра САПР» 2020-го року, оскільки дана версія, окрім усіх попередньо доданих обчислювальних модулів та ресурсів, передбачає можливість розрахунку величини теплового потоку в задачах теплопровідності, а також обчислення суми теплового потоку для обраних навантажень.

Для визначення теплового потоку Q (Дж/с), що проходить через плоску стіну, і також для знаходження температури на межі її шарів (основного матеріалу та огорожувальної конструкції), потрібно відшукати необхідні коефіцієнти теплопровідності для кожного матеріалу, що використовується, а також виміряти середню температуру всередині приміщення (температура внутрішньої поверхні стіни) і температуру назовні (або зовнішньої поверхні стіни).

Потім у ПК «Ліра САПР» необхідно створити новий документ – задачу в 15-й ознаці схеми, тобто задачі теплопровідності. Ця ознака схеми відрізняється тим, що має лише одну ступінь свободи у вузлі – температуру t .

Для кожного із розрахунків, наведених у наступному підрозділі було використано ділянку стіни однакової висоти – 1 м. Матеріали, з яких побудовано стіни, а також матеріал для теплоізоляційного шару відрізняються в кожному із випадків.

Після формування геометрії у ПК «Ліра САПР» було отримано скінченно-елементну модель, для якої в 15-й ознаці схеми для 4-х вузлових пластин за замовчуванням призначено тип SE № 1509 – чотирикутний скінченний елемент теплопровідності. Проте для задання температури повітря всередині приміщення та ззовні стіни, потрібно додати стержневі елементи, відповідно, на внутрішній та зовнішній поверхнях розглянутої ділянки стіни, а також змінити їхній тип на SE № 1555.

Першим типом навантаження на стіну було обрано постійну температуру у вузлі (або гранична умова першого роду).

Для цього кожному з матеріалів, використаних для стіни, було задано коефіцієнти теплопровідності, проте значення коефіцієнту теплопоглинання C та питомої ваги R_0 в задачах стаціонарної теплопровідності не враховуються, тому їхні значення в даному випадку такі, що дорівнюють одиниці. Для елементів конвекції також було задано жорсткість і коефіцієнти конвекції для кожного із шарів.

Після цього у якості зовнішнього навантаження було задано температуру повітря для даних елементів конвекції – у розділі Навантаження та параметрах конвективного теплообміну. Для зовнішньої температури було обрано -15°C , а для внутрішньої – $+20^{\circ}\text{C}$. Результати наведено у наступному підрозділі для кожного із випадків.

Наступним кроком було задання теплового потоку (або граничної умови другого роду).

За визначенням тепловий потік дорівнює кількості теплоти, що проходить через ізотермічну поверхню, тобто умовну поверхню

з однаковою температурою, за одиницю часу. Він вимірюється у Дж/с*м² (або Вт/м², оскільки 1 Вт = 1 Дж/с).

$$Q = q \cdot F, \quad (9)$$

де Q – тепловий потік;

q – щільність теплового потоку;

F – поверхня стіни, що розглядається.

Для визначення щільності теплового потоку через двошарову стіну застосовується наступна формула:

$$q = \frac{t_1 - t_3}{s_1 / \lambda_1 + s_2 / \lambda_2}, \quad (10)$$

де t_1, t_3 – відповідно температура внутрішньої та зовнішньої поверхонь стіни;

s_1, s_2 – товщина шарів стіни, відповідно шару основного матеріалу стіни та шару теплоізоляційної конструкції;

λ_1, λ_2 – коефіцієнти теплопровідності, відповідно шару основного матеріалу стіни та шару теплоізоляційної конструкції.

Проте застосування вищенаведених формул у ПК «Ліра САПР» відбувається автоматично – у процесі розрахунку визначається тепловий потік у вузлах розрахункової схеми для обраних елементів. Для цього потрібно викликати діалогове вікно Тепловий потік у вузлах та задати номери вузлів, в яких здійснюється розрахунок теплового потоку, а також номери елементів, що передають тепловий потік у дані вузли.

Наступним кроком є розрахунок даної схеми та можливий перегляд результатів у вигляді Мозаїки теплового потоку. Проте для отримання значення теплового потоку, що проходить через стіну за стаціонарного теплового стану, спочатку необхідно знайти суму теплового потоку в обраних вузлах.

У ПК «Ліра САПР» результатом розрахунку також є графік Ізополів температур, що і було обрано для даної роботи у якості демонстрації результатів проведених розрахунків для чотирьох різних випадків: цегляної стіни із теплоізоляцією, цегляної стіни без теплоізоляції, а також бетонної стіни з теплоізоляцією та без неї. Результати наведено в наступному підрозділі.

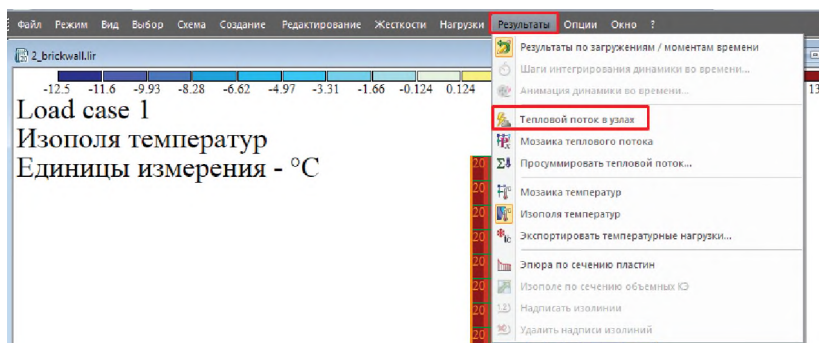


Рисунок 2 – Викилик діалогового вікна Тепловий потік у вузлах

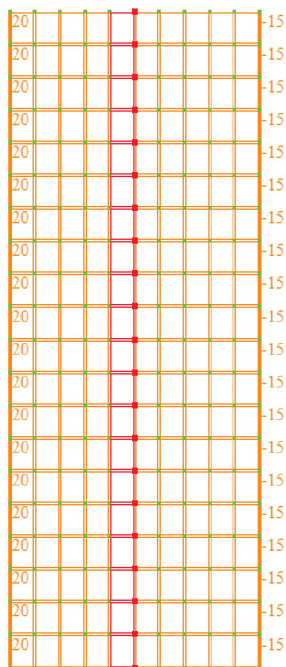
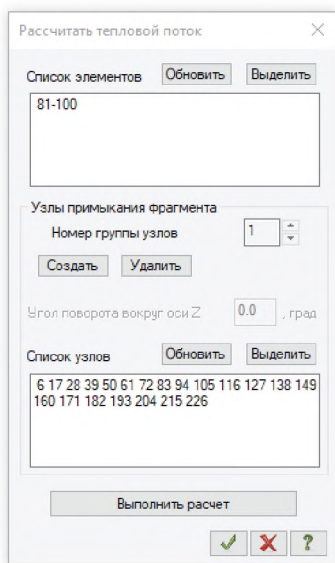


Рисунок 3 – Задання номерів вузлів та елементів для визначення теплового потоку у вузлах

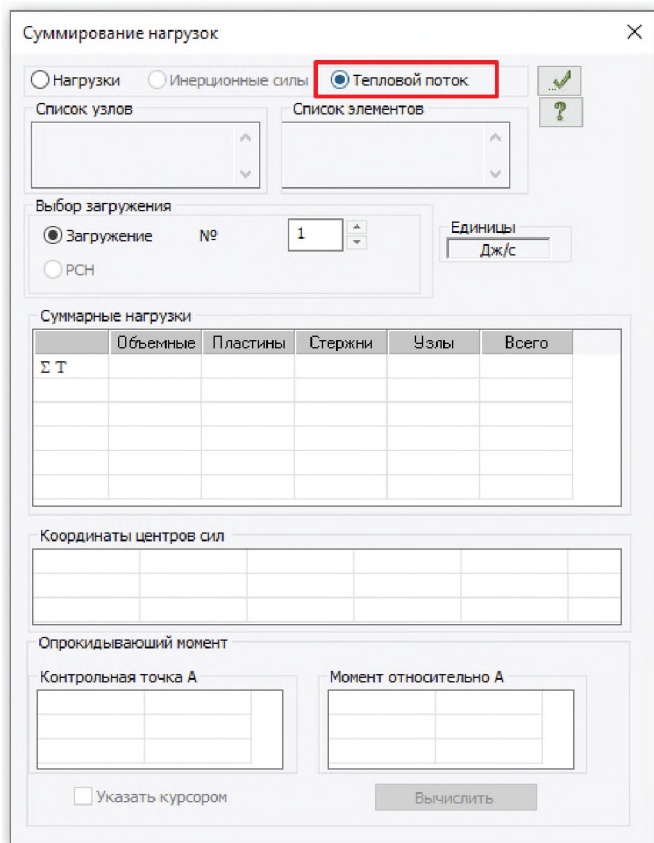


Рисунок 4 – Знаходження суми теплового потоку у ПК «Ліра САПР»

4. Проведення розрахунків у ПК «Ліра САПР»

Розрахунок 1 – цегляна стіна та огорожувальна конструкція зі скловати.

Товщина стіни – 380 мм. Матеріал стіни – цегла із коефіцієнтом теплопровідності $0,44 \text{ Дж}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C})$.

Товщина утеплення – 100 мм. Матеріал утеплення – скловата із коефіцієнтом теплопровідності $0,038 \text{ Дж}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C})$.

Розглядаємо ділянку стіни висотою 1 м (1000 мм).

Одиницями вимірювання температури приймаємо °С.

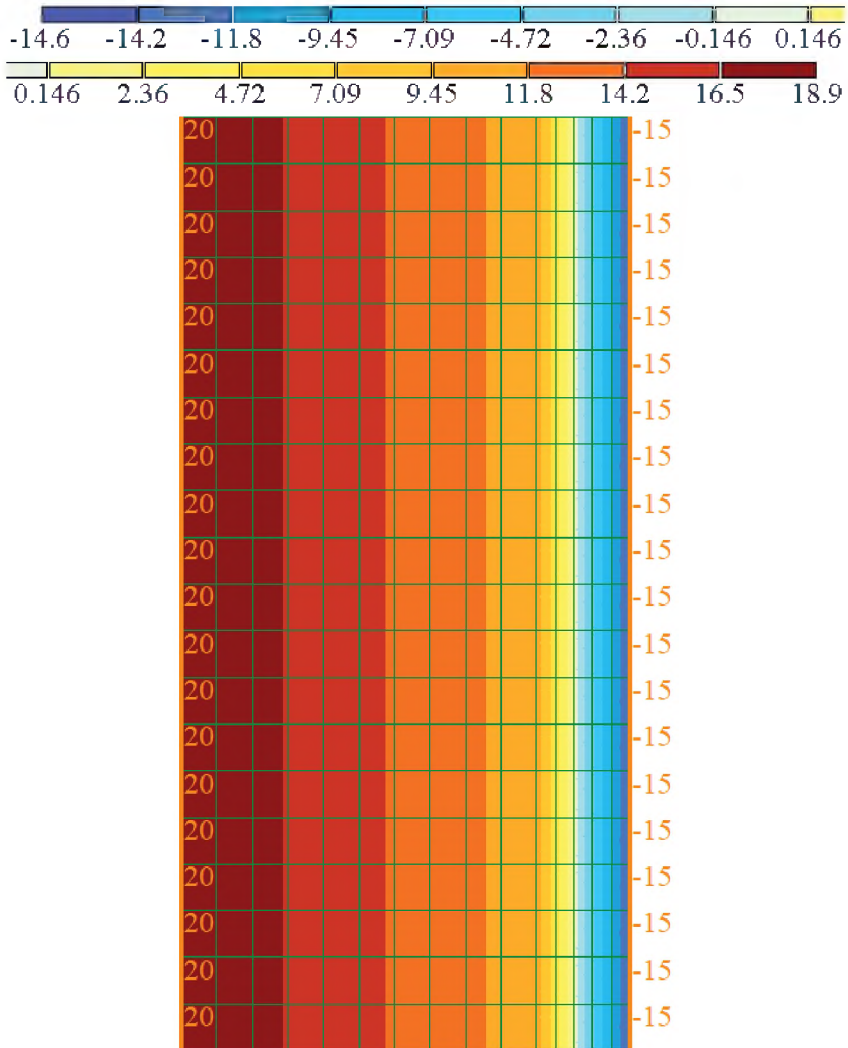


Рисунок 5 – Результати розрахунків першого випадку у вигляді ізополів температур

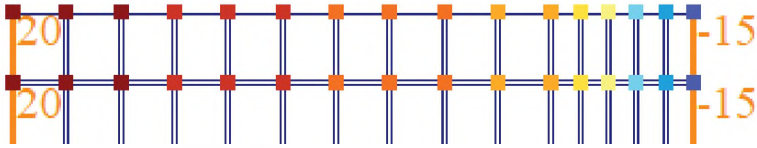


Рисунок 6 – Динаміка зміни температури в першому випадку (у вигляді мозаїки температур)

Отримане значення просумованого теплового потоку для першого випадку складає $Q = 9,579$ Вт (Дж/с) (див. рис. 7).

Суммирование нагрузок

Нагрузки
 Инерционные силы
 Тепловой поток

Список узлов: 7 23 39 55 71 87 103 119
 135 151 167 183 199 215
 231 247 263 279 295 311

Список элементов: 121-140

Выбор загрузки: Загрузка № 1
 Единицы: Дж/с

Суммарные нагрузки

	Объемные	Пластины	Стержни	Узлы	Всего
Σ T				9.5794954	9.5794954

Координаты центров сил

Опрокидывающий момент

Контрольная точка A

Момент относительно A

Указать курсором
 Вычислить

Рисунок 7 – Результати розрахунку теплового потоку для першого випадку

Розрахунки для інших варіантів конструкцій стін виконуються аналогічно.

5. Порівняння результатів розрахунків

Для порівняння результатів розрахунків використано значення опору теплопередачі огорожувальної конструкції. Даний показник є однією зі складових вимог до теплотехнічних показників елементів теплоізоляційної оболонки будинків.

Згідно з ДБН В.2.6-31:2006⁷ для зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель та споруд, що опалюються та/або охолоджуються, обов'язковим є виконання умови

$$R_{\Sigma \text{пр}} \geq R_{q \text{ min}}, \quad (11)$$

де $R_{\Sigma \text{пр}}$ – приведений опір теплопередачі непрозорої огорожувальної конструкції;

$R_{q \text{ min}}$ – мінімально допустиме значення опору теплопередачі непрозорої огорожувальної конструкції; встановлюється залежно від температурної зони, в якій знаходиться будинок.

Для знаходження опору теплопередачі огорожувальної конструкції застосовується наступна формула:

$$R_{\Sigma \text{пр}} = \frac{(t_{\text{вн}} - t_{\text{зовн}}) * L}{\Sigma Q}, \quad (12)$$

де ΣQ – сума теплового потоку, що проходить через стіну, яка визначається на основі розрахунків;

$t_{\text{вн}}$, $t_{\text{зовн}}$ – відповідно температура всередині приміщення та назовні;

L – висота стіни, що розглядається.

ВИСНОВКИ

Під час роботи над роботою було використано найновішу версію ПК «Ліра САПР» 2020-го року, оскільки дана версія, окрім усіх попередньо доданих обчислювальних модулів та ресурсів, передбачає

⁷ ДБН В.2.6-31:2006. [Чинні від 2007-04-01]. Теплова ізоляція будівель. Мінбуд України – К. : Укрархбудінформ, 2006. – 65 с. – (Державні будівельні норми України).

можливість розрахунку величини теплового потоку в задачах теплопровідності, а також обчислення суми теплового потоку для обраних навантажень.

Для визначення теплового потоку, що проходить через плоску стіну, і також для знаходження температури на межі її шарів (основного матеріалу та огорожувальної конструкції), потрібно відшукати необхідні коефіцієнти теплопровідності для кожного матеріалу, що використовується, а також виміряти середню температуру всередині приміщення (температура внутрішньої поверхні стіни) і температуру назовні (або зовнішньої поверхні стіни).

Потім у ПК «Ліра САПР» необхідно створити новий документ – задачу в 15-тій ознаці схеми, тобто задачі теплопровідності. Ця ознака схеми відрізняється тим, що має лише одну ступінь свободи у вузлі – температуру t .

Після формування геометрії у ПК «Ліра САПР» було отримано скінченно-елементну модель, для якої в 15-ій ознаці схеми для 4-х вузлових пластин за замовчуванням призначено тип SE № 1509 – чотирикутний скінченний елемент теплопровідності. Проте для задання температури повітря всередині приміщення та ззовні стіни, потрібно додати стержневі елементи, відповідно, на внутрішній та зовнішній поверхнях розглянутої ділянки стіни, а також змінити їхній тип на SE № 1555.

Для цього кожному з матеріалів, використаних для стіни, було задано коефіцієнти теплопровідності, проте значення коефіцієнту теплопоглинання C та питомої ваги R_0 в задачах стаціонарної теплопровідності не враховуються, тому їхні значення в даному випадку такі, що дорівнюють одиниці. Для елементів конвекції також було задано жорсткість і коефіцієнти конвекції для кожного із шарів.

За визначенням тепловий потік дорівнює кількості теплоти, що проходить через ізотермічну поверхню,

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гнатишин Я.М., Криштапович В.І. Теплотехніка: навч. посіб. – К. : Знання, 2008. – 364 с.
2. ДБН А.2.2-1-2003. Склад і зміст матеріалів оцінки впливів на навколишнє середовище (ОВНС) при проектуванні і будівництві підприємств,

- будинків і споруд. Основні положення проектування, затв.наказом Держбуду України від 15.12.2003 р. № 214 (введені в дію з 1 квітня 2004 р.).
3. ДБН В.1.2-14-2008 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. Київ. Мінрегіонбуд України 2009, с. 15.
 4. ДБН В.1.2-2:2006 Навантаження і впливи. Норми проектування Київ. Мінбуд України 2006, с. 75.
 5. ДБН В.2.6-31:2006. [Чинні від 2007-04-01]. Теплова ізоляція будівель. Мінбуд України – К. : Укрархбудінформ, 2006. – 65 с. – (Державні будівельні норми України).
 6. Положення про безпечну та надійну експлуатацію будівель та споруд № 33/228 від 27.11.1997 р. 167 с.
 7. Сергейчук.О.В. Геометричне моделювання фізичних процесів при оптимізації форми енергоефективних будинків : дис. ... доктора техн. наук : 05.01.01 / Сергейчук Олег Васильович. – Київ, 2008. – 425 с.
 8. Офіційний сайт ReynaersUkraine: <http://www.reynaers.com/ua/rus>

References

1. Hnatyshyn Y.M, Kryshchapovich V.I Teplotehnika [Heat engineering: Textbook. The method.] – К. : Znannia, 2008. – 364 с.
2. State building codes A.2.2-1-2003. Composition and content of environmental impact assessment (EIA) materials in the design and construction of enterprises, buildings and structures. Basic design provisions, approved by the order of the State Construction Committee of Ukraine dated 15.12.2003 N 214 (entered into force on April 1, 2004).
3. State building codes B.1.2-14-2008 General principles of ensuring the reliability and structural safety of buildings, structures, building structures and foundations. Kyiv. Ministry of Regional Development of Ukraine 2009, p. 15.
4. State building codes B.1.2-2: 2006 Loads and effects. Design standards Kyiv. Ministry of Construction of Ukraine 2006, p. 75.
5. State building codes B.2.6-31: 2006. [Effective from 2007-04-01]. Thermal insulation of buildings. Ministry of Construction of Ukraine – Kyiv : Ukrarkhbudininform, 2006. – 65 p. – (State building norms of Ukraine).
6. Regulations on safe and reliable operation of buildings and structures № 33/228 dated 27.11.1997. 167 p.
7. Sergeychuk O.V. Geometrichne modelyuvannya fizichnih procesiv pri optimizacii formi energoefektivnih budinkiv [Geometric modeling of physical processes at optimization of a form of energy-efficient houses:] dis. doctor of technical sciences Sciences: 05.01.01 / Sergeychuk Oleg Vasilyevich. – Kyiv, 2008. – 425 p.
8. Official website of ReynaersUkraine: <http://www.reynaers.com/ua/rus>