

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

ЛЕЩЕНКО Віталій Петрович



УДК 515.2

**ОПТИМІЗАЦІЙНІ РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТИВНІ
ГЕОМЕТРИЧНІ МОДЕЛІ БАГАТОПУСТОТНИХ СТІНОВИХ БЛОКІВ**

05.01.01 – Прикладна геометрія, інженерна графіка

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі архітектурних конструкцій Київського національного університету будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент
СКОЧКО Володимир Ігорович,
Київський національний університет будівництва і архітектури МОН України, доцент кафедри архітектурних конструкцій (м. Київ)

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
АУШЕВА Наталія Миколаївна,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського» МОН України, професор кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем (м. Київ);

доктор технічних наук, професор
АРУТЮНЯН Ірина Андріївна,
Запорізький національний університет МОН України, завідувач кафедри промислового та цивільного будівництва (м. Запоріжжя).

Захист відбудеться «13» травня 2021 року о 15³⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.06 у Київському національному університеті будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31, Вчена рада університету, ауд. 466.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31.

Автореферат розіслано «12» квітня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О. А. Бондар

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Одним із сучасних та практично значущих трендів у розвитку прикладної геометрії є розробка спеціальних геометричних та графоаналітичних моделей для вирішення різноманітних задач енергозбереження та енергоефективності у будівництві.

Основою цього наукового напрямку є дослідження з синтезу геометричних методів та будівельної фізики, започатковані школою проф. О. Л. Підгорного. Поряд із задачами архітектурної акустики та світлотехніки, які активно тяжіють до використання методів класичної лінійчатої геометрії (проф. О. В. Сергейчук, проф. В. Л. Мартинов та ін.), дедалі більшої актуальності набувають задачі, пов'язані з дослідженням теплообмінних процесів, оптимізацією відповідних параметрів будівельних конструкцій, мікроклімату в приміщеннях тощо, де більш ефективним є застосування методів дискретної геометрії.

В останні роки при зведенні енергоефективних будівель і споруд активно використовуються матеріали та вироби з підвищеним опором теплопередачі, що дає змогу виконувати стінові огорожувальні конструкції одношаровими без застосування зовнішнього додаткового утеплення.

Для оптимального визначення геометричних і теплофізичних параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій необхідно розробити універсальну та зручну для практичного застосування геометричну модель розповсюдження теплових потоків у тілі огорожувальної конструкції, яка має базуватися на максимально коректних геометричних інтерпретаціях процесів теплообміну. Найбільш наочним та ефективним способом відповідного інтерпретаційного моделювання є графоаналітичне відтворення температурних полів у товщі огорожувальних конструкцій.

Нині в Україні досить ефективно використовуються *керамічні багатопустотні блоки*. Деякі з них виробляються не лише з формуванням штучних крупних пустот, а й з додаванням спеціальних дрібних заповнювачів (таких, як деревина тощо), що у процесі термічного оброблення випалюються, утворюючи багаточисельні мікропустоти, заповнені повітрям. Існують комбіновані блочні вироби підвищеного рівня енергоефективності, які передбачають розміщення теплоізоляційних матеріалів (пінополіуретан, пінополістирол, мінеральна вата) безпосередньо в пустотах блоків. Якщо зосередити увагу на житлових будинках, споживання теплової енергії яких складає майже 70 % від загального обсягу вироблюваної теплоти, то *керамічні блочні вироби* поки що є найбільш ефективними й універсальними. Окрім того, доречно зосередити увагу і на задачі ефективного використання різних за внутрішньою структурою конструктивних різновидів блоків у різних зонах огороження, з урахуванням геометрії фасаду об'єкта та за умов різних температур і вологості.

У такий спосіб означені питання є актуальними, адже розробка відповідних геометричних інструментів для їх вирішення дає змогу створити сучасний підхід до проектування енергоефективних конструктивних елементів зовнішніх стін.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертацію виконано у Київському національному університеті будівництва і архітектури згідно з тематикою науково-дослідної роботи кафедри архітектурних конструкцій за напрямом: «Розробка геометричних моделей складних об'єктів і процесів».

Мета і завдання дослідження. *Мета* дисертаційної роботи полягає у розробці оптимізаційних розрахунково-конструктивних геометричних моделей багатопустотних стінових блоків та вдосконаленні процесу проектування енергоефективних огорожувальних стінових конструкцій загалом.

Для реалізації зазначеної мети, необхідно виконати такі *завдання*:

1. Проаналізувати сучасний стан проектування енергоефективних огорожувальних стінових конструкцій, визначити перспективи їх досліджень засобами геометричного моделювання;

2. Розробити математичний апарат для обчислення основних теплофізичних параметрів на основі геометричних моделей стінових керамічних блоків;

3. Розробити комплексний підхід до оптимізаційного геометричного моделювання конструктивних параметрів енергоефективних стінових блоків;

4. Створити комплексні геометричні моделі стінових огорожувальних конструкцій, з урахуванням фізико-механічних експлуатаційних обмежень, а також алгоритми та рекомендації щодо практичного використання розробленого підходу;

5. Упровадити одержані наукові результати у виробництво та освітній процес, а також визначити напрями подальшого розвитку створеного математичного апарату та запропонованих розрахунково-конструктивних геометричних моделей.

Об'єктом дослідження є архітектурно-будівельне проектування енергоефективних огорожувальних конструкцій.

Предмет дослідження – оптимізаційні розрахунково-конструктивні геометричні моделі багатопустотних стінових блоків огорожувальних будівельних конструкцій.

Методи дослідження. У ході роботи використано методи геометричного моделювання, варіаційний метод (для вирішення задачі мінімізації повної потенціальної енергії), методи будівельної фізики, чисельні методи, методи багатофакторної оптимізації, системний аналіз, методи прийняття рішень.

Наукову базу здійснених досліджень становлять подані у списку літературних джерел праці вітчизняних та закордонних учених з обчислювальної геометрії, теорії кривих і поверхонь, апроксимації та інтерполяції, множин і графів, математичного моделювання об'єктів і процесів, баз даних, алгоритмів, програмування, оптимізації, архітектурно-будівельного проектування, комп'ютерної графіки. Відповідні посилання є в тексті дисертації.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розробці оптимізаційних методів геометричного моделювання енергоефективних огорожувальних конструкцій, зокрема:

вперше:

– розроблено системний спосіб визначення оптимальних теплофізичних параметрів енергоефективних стінових блоків на основі комплексного аналізу їх геометричних моделей;

- запропоновано використання засобів геометричного моделювання для зменшення містків холоду зовнішніх огорожувальних конструкцій із багатопустотних стінових блоків;

- запропоновано оптимізаційний алгоритм дефініції геометричних параметрів внутрішньої структури енергоефективних стінових огорожувальних конструкцій;

удосконалено:

- комплексні розрахунково-конструктивні геометричні моделі внутрішньої структури будівельних модульних елементів на основі ізотерм та силових ліній температурних полів;

- методологію визначення раціональних теплофізичних параметрів багатопустотних стінових блоків, шляхом застосування засобів геометричного моделювання;

отримало подальший розвиток:

- теорія архітектурно-будівельного проектування енергоефективних огорожувальних конструкцій за допомогою використання оптимізаційних розрахунково-конструктивних геометричних моделей багатопустотних стінових блоків.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що: застосування запропонованих оптимізаційних методів геометричного моделювання енергоефективних стінових багатопустотних блоків дає змогу досягти підвищення теплоізоляційних властивостей огорожувальних конструкцій будівель; створені алгоритми та рекомендації щодо практичного використання розробленого підходу до оптимізаційного геометричного моделювання конструктивних параметрів енергоефективних стінових блоків сприяють контролю тепловтрати крізь огорожувальні конструкції будь-якої конфігурації та форми.

Результати досліджень впроваджено в ТОВ «ГРАДОБУД-К» при розробці проектів оптимізації теплових оболонок житлових будівель, що зводяться з використанням керамічних блоків (Акт від 17.08.2020 р. № 21/20); на кафедрі архітектурних конструкцій КНУБА при викладанні спецкурсу «Енергоефективність будівель» (Акт від 04.08.2020 р. № 013-61); у БНЕС-Центрі КНУБА при формуванні спецкурсу підготовки енергоаудиторів (Акт від 06.09.2020 р. № 416-61).

Упровадження подібних засобів дає змогу:

- зробити ефективнішим процес проектування елементів огорожувальних конструкцій, представлених стіновими багатопустотними блоками;

- здійснювати оптимізацію зовнішніх та за потреби, внутрішніх огорожувальних конструкцій, досягаючи необхідних техніко-економічних показників ще на етапі проектування будівель;

- досягти ефекту енергозбереження у розрізі економії теплової енергії при експлуатації будівлі у холодну пору року, а також економії електричної енергії при роботі систем охолодження в теплу пору року;

- автоматизувати розрахункові алгоритми корегування геометричних параметрів багатопустотних стінових блоків стінових огорожувальних

конструкцій, з метою максимального їх залучення у практику проектування та зведення енергоефективних будівель.

Достовірність результатів дослідження визначається коректністю застосування методів та моделей прикладної геометрії та чисельного моделювання. Запропонований у роботі підхід ґрунтується на дослідженнях реальних конструкцій, що забезпечує адекватність одержаних результатів.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є самостійним науковим дослідженням у галузі геометричного моделювання, будівельної фізики та проектування архітектурно-будівельних конструкцій. Наукові результати, теоретичні положення, практичні розробки, висновки та рекомендації сформульовано автором особисто. Особистий внесок здобувача в праці, видані у співавторстві, визначено в списку опублікованих праць за темою дисертації.

Апробація результатів дослідження. Основні теоретичні положення та практичні результати роботи було оприлюднено на таких Міжнародних науково-практичних конференціях: «Енергоінтеграція – 2017» та «Енергоінтеграція – 2019» (м. Київ, КНУБА), Міжнародних конференціях молодих учених «БУД-МАЙСТЕР-КЛАС» (м. Київ, КНУБА, 2017, 2020 рр.).

Публікації. Основні теоретичні положення, висновки і практичні результати, одержані у процесі дослідження, висвітлено у 8-и наукових працях, зокрема: 1 стаття – у виданні держави Євросоюзу, 3 статті – опубліковано у виданнях, які входять до затвердженого МОН України переліку фахових видань та 4 праця апробативного характеру.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається з анотації, списку праць здобувача, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 153 сторінки, з них основного тексту – 120 сторінок. Список використаних джерел налічує 157 найменувань та займає 12 сторінок. Робота містить 10 таблиць та 39 рисунків. Додатки (3) розміщено на сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження; вказано на зв'язок роботи з науковою тематикою; визначено мету, завдання, об'єкт, предмет, сформульовано методологічну основу дослідження; висвітлено наукову новизну, науково-теоретичне та практичне значення одержаних результатів; наведено відомості про апробацію результатів дослідження, структуру та обсяг дисертації.

У **Розділі 1 «Аналіз літературних джерел з моделювання енергоефективних огорожувальних конструкцій»** проаналізовано основні принципи розробляння керамічних блоків, а також визначено завдання та перспективи напрямів досліджень дисертаційної роботи.

Установлено, що основні принципи розробляння керамічних блоків полягають у:

1) використанні матеріалів із низьким коефіцієнтом теплопровідності (на основі кераміки з домішками деревини тощо);

2) застосуванні положення щодо подовження траєкторій трансмісійного переносу теплової енергії з середини внутрішніх приміщень назовні;

3) використанні значної кількості повітряних прошарків або прошарків ефективного утеплювача;

4) максимальному підвищенні товщини блоків;

5) використанні полімерних клеїв для з'єднання окремих блоків.

З'ясовано, що одним із головних завдань при розробці керамічних блоків є збереження несучої здатності огорожувальної конструкції, що побудована з цих блоків, оскільки збільшення довжини смуг теплопередачі потребує звуження їх стінок, що натомість зумовлює послаблення міцності блоку.

Доведено, що перспективним напрямом досліджень є пошук оптимальних співвідношень між показниками опору теплопередачі та допустимим рівнем навантаження, яке зможе сприймати елемент огороження.

У **Розділі 2 «Геометричні моделі керамічних блоків та математичний апарат визначення їх теплофізичних параметрів»** проаналізовано методи і засоби моделювання температурних полів зовнішніх огорожувальних конструкцій різними засобами чисельного моделювання, а також розглянуто закономірності розповсюдження теплової енергії у непрозорому середовищі та описано процес перетворення рівнянь теплопровідності в систему алгебраїчних рівнянь. У ході роботи проведено порівняльний аналіз переваг і недоліків зазначених методів, виконано оцінку їх ефективності при розв'язанні різних класів задач теплопередачі у будівельній фізиці.

Доведено, що найбільші тепловтрати відбуваються через зовнішні огорожувальні конструкції у холодну пору року, а в теплу – через ці конструкції надходить надлишкова кількість тепла. Тому одним із основних принципів проектування енергоефективних будівель і споруд є забезпечення уникнення надмірних тепловтрат узимку та перегрівання в літній період.

Закон, що виражає зміну температурного поля об'єкту, частини якого перебувають у різних термодинамічних фазах, можна записати у вигляді рівняння теплопровідності для певної області Σ .

Якщо тверда частка загального об'єму виражається через деяку функцію \mathfrak{R} від температури T :

$$\mathfrak{R} = \zeta(T), \quad (1)$$

то рівняння теплопровідності для усієї області Σ , з урахуванням динаміки розвитку температурного поля, має вигляд:

$$\nabla(\lambda \cdot \nabla T) + q_v = (c \cdot \rho - \chi \cdot \partial \mathfrak{R} / \partial T) \cdot (\partial T / \partial \tau + \bar{w} \cdot \nabla T), \quad (2)$$

де: λ , c та ρ – коефіцієнт теплопровідності, питома теплоємність та густина вологого тіла відповідно; q_v – кількість теплоти, виділеної внутрішніми джерелами в одиниці об'єму середовища за проміжок часу $\partial \tau$; χ – ентальпія фазового переходу; w – вектор швидкості руху рідкої фази (за наявності).

В опрацьовуваних задачах моделювання теплопровідності не розглядаються випадки, коли речовина переходить із твердої фази у рідку. Тому тверда частка в області Σ залишається сталою ($\mathfrak{R} = \text{const}$) незалежно від температури.

У такому разі рівність (2) набуває форми диференціального рівняння енергії Фур'є-Кірхгофа:

$$\nabla(\lambda \cdot \nabla T) + q_v = c \cdot \rho \cdot (\partial T / \partial \tau + \bar{w} \cdot \nabla T). \quad (3)$$

Приймаючи теплопровідні властивості матеріалу незалежними від координат досліджуваної точки області та вводячи коефіцієнт – a температуропровідності:

$$a = \lambda / (c \cdot \rho). \quad (4)$$

Вважаючи рух рідкої фази матеріалу відсутнім, а температурне поле стаціонарним, для (3) отримуємо:

$$a \cdot \nabla^2 T + q_v / (c \cdot \rho) = 0. \quad (5)$$

На основі диференціального рівняння (5) здійснюється перехід до дискретної форми представлення температурного поля шляхом складання системи алгебраїчних рівнянь методу скінченних різниць або методу скінченних елементів.

Для визначення в методі *скінченних різниць* різницевої схеми, що наближено описує певне диференційне рівняння, необхідно замінити область Σ неперервної зміни функції $T(x, y, z)$, що у цьому разі описує процес теплопередачі, на дискретну область, представлену сіткою із рівномірним чи довільним кроком вузлів у m напрямках. Після цього замінити диференційний оператор D на різницевий оператор \mathcal{D} і сформулювати різницеві аналоги крайових та початкових умов.

Якщо оператор D , який діє на функцію $T = \zeta(x, y, z)$, замінити на різницевий оператор \mathcal{D} , то замість виразу DT одержимо його дискретний аналог $\mathcal{D}T$, у якому часткові похідні інтерпретовані різницевиими співвідношеннями. $\mathcal{D}T$ є лінійною комбінацією дискретних значень функції G з деякої множини вузлів сітки $\Phi(s_{i,j,k,\dots,m})$, що в геометричному сенсі представляє собою обчислювальний шаблон:

$$\mathcal{D}T_{i,j,k,\dots,m} = \sum_{s_h \in \Phi(s_{i,j,k,\dots,m})} A(s_{i,j,k,\dots,m}, s_h) \cdot T_h, \quad (h = \overline{1, N}), \quad (6)$$

де: $A(s_{i,j,k,\dots,m}, s_h)$ – коефіцієнт, відповідний h -му вузлу шаблону із координатами $s_{i,j,k,\dots,m}$; N – кількість вузлів такого обчислювального шаблону. Заміна DT на $\mathcal{D}T$ називається апроксимацією диференційного оператора DT різницевим оператором $\mathcal{D}T$ або *різницевою апроксимацією*.

Основний принцип застосування методу скінченних елементів полягає в тому, що шуканий параметр досліджуваного процесу (температурного поля) представляється в формі глобальної функції $T(x, y, z)$, що розповсюджується уздовж усього об'єму суцільної ділянки конструкції (області Σ), в якій і поширюється тепловий потік. Відповідна функція моделюється за частинами в окремих фрагментах області Σ , на які остання поділяється відповідно до її геометричної форми та специфіки поширення температурного поля. У межах кожного з таких скінченних елементів функція $T(x, y, z)$ визначається локально з допомогою спеціальних базисних функцій або функцій форм скінченних елементів. Останні будуються на основі інтерполяційних поліномів різної природи. У рамках інтерполяційних методів функція у деякій області описується за допомогою її значень в обраних точках області на основі інтерполяції.

Розрахунки за методом скінченних елементів потребують дискретного представлення досліджуваної області Σ із подальшим відтворенням n -значень вузлових величин температури T_1, T_2, \dots, T_n , що задовольняють рівнянням (2), (3) або (5), з урахуванням накладених на границі Γ умов.

Можливі два шляхи реалізації такого глобального розрахунку: на основі варіаційного методу або методу проєкцій.

Проаналізовані методи чисельного моделювання мають низку переваг і недоліків, при чому недоліки одного з них є перевагами іншого.

На основі проведеного аналізу моделей та методів моделювання процесів теплопередачі сформульовано основні правила проєктування керамічних стінових блоків для зовнішніх огорожувальних конструкцій.

На рисунках 1 та 2 наведено приклад розробленого виробу, в якому розглянуто процес проходження теплової енергії крізь товщу рядових керамічних блоків. Розміри блоків складають $440 \times 248 \times 238$ мм. Опір теплопередачі матеріалу в поздовжньому напрямку (паралельно грані довжиною 440 мм) становить $R = 3.33$ ($\text{м}^2\text{К}/\text{Вт}$), при умові, що блоки влаштовуються на теплоізоляційному полімерному розчині. Міцність блоку на стиск 10 МПа.

У прикладі проаналізовано три типові траєкторії проходження теплової енергії q від внутрішньої поверхні до зовнішньої (рис. 2).

Позначатимемо цю кількість енергії для відповідних траєкторій як q_1, q_2 та q_3 , і розглянемо формули для визначення опору теплопередачі, що чинитиме блок у зазначених трьох випадках (вузол А на рис. 2 та рис. 3).

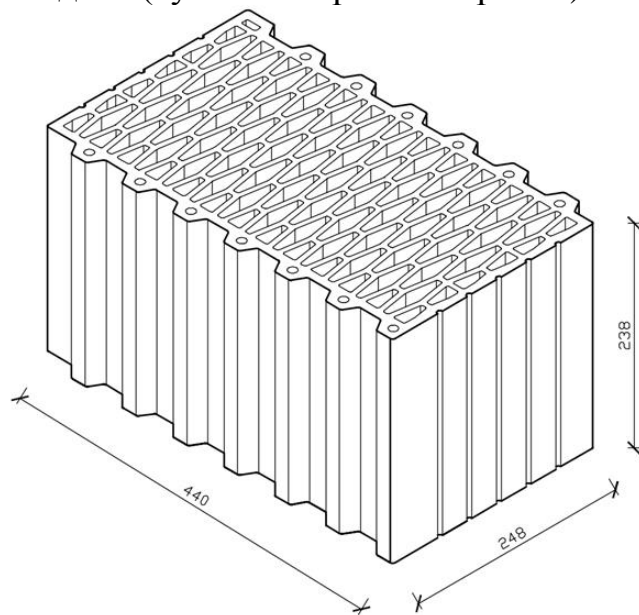


Рис. 1 Геометрична модель керамічного багатопустотного блоку

Загальна формула для визначення опору теплопередачі конструкції, виконаної з одного виду будівельного матеріалу (R_i), що містить повітряні порожнини за довільним i -м перерізом (траєкторії) має вигляд:

$$R_i = R_B + \sum_{j=1}^m R_{M,i,j} + \sum_{k=1}^n R_{\text{п.п.},i,k} + R_3 = \frac{1}{\alpha_B} + \sum_{j=1}^m (\delta_{\text{п.п.},i,k} / \lambda_{\text{п.п.}}) + 1/\alpha_3, \quad (7)$$

де: R_B та R_3 – опори теплопередачі внутрішньої та зовнішньої поверхні огорожувальної конструкції, $\text{м}^2\text{К}/\text{Вт}$; $R_{M,i,j}$ та $R_{\text{п.п.},i,k}$ – відповідно опори теплопередачі j -го прошарку матеріалу та k -го повітряного прошарку огорожувальної

конструкції, $m^2 \cdot K / Bm$; α_B та α_3 – коефіцієнти тепловіддачі цих поверхонь, $Bm / (m^2 \cdot K)$; $\delta_{M,i,j}$ та $\delta_{П.П.i,k}$ – відповідно товщини j -го шару матеріалу та k -го шару повітряного прошарку конструкції в i -му перерізі, m ; λ_M та $\lambda_{П.П.}$ – коефіцієнти теплопровідності матеріалу конструкції та її повітряних прошарків (або утеплювача в пустотах за його наявності) у розрахункових умовах експлуатації, що вимірюються у $Bm / (m \cdot K)$; m та n – кількість шарів матеріалу та повітряних прошарків (або утеплювача в пустотах за його наявності) у конструкції блоку.

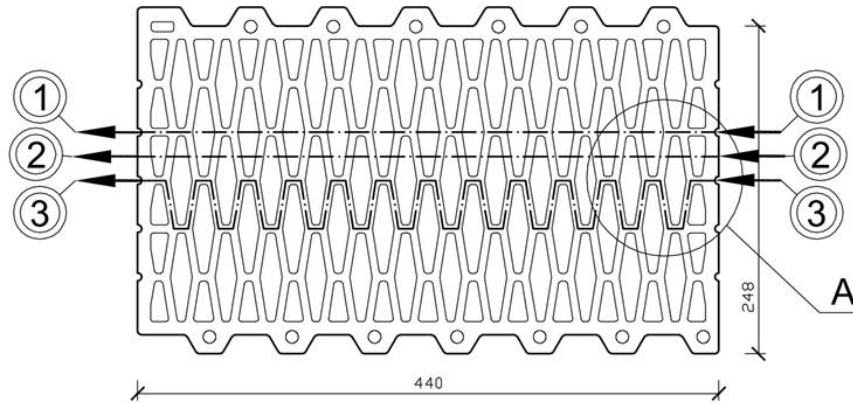


Рис. 2 Поширення тепла крізь товщу багатопустотного керамічного блоку: 1, 2 та 3 – позначення трьох варіантів елементарних траєкторій передачі теплової енергії з середини приміщення у зовнішній простір

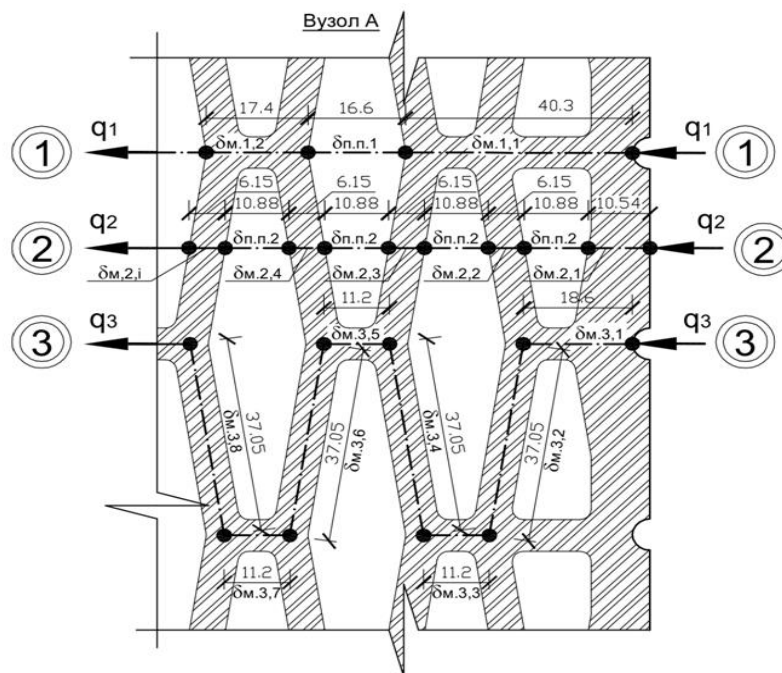


Рис. 3 Фрагмент конструкції стінового багатопустотного керамічного блоку

Опір теплопередачі блоку вздовж траєкторії 1 визначається формулою:

$$R_1 = R_B + \sum_{j=1}^{12} R_{M,i,j} + \sum_{k=1}^{11} R_{П.П.i,k} + R_3 =$$

$$= \frac{1}{\alpha_B} + \sum_{j=1}^{12} (\delta_{M.1,j} / \lambda_M) + \sum_{k=1}^{11} (\delta_{П.П.1,k} / \lambda_{П.П.}) + 1 / \alpha_3 \quad (8)$$

З огляду на те, що всі, крім першого та останнього матеріального прошарку, рівні за величиною й усі повітряні прошарки також однакові, вираз (8) набуває вигляду:

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_B} + \frac{2 \cdot \delta_{M.1,1} + 10 \cdot \delta_{M.1,2}}{\lambda_M} + 11 \cdot \delta_{П.П.1} / \lambda_{П.П.} + 1 / \alpha_3 \quad (9)$$

Опір теплопередачі блоку вздовж траєкторії 2 визначається залежністю (10), яка в результаті математичних перетворень набуває вигляду (11):

$$R_2 = R_B + \sum_{j=1}^{26} R_{M.2,j} + \sum_{k=1}^{25} R_{П.П.2,k} + R_3 =$$

$$= \frac{1}{\alpha_B} + \sum_{j=1}^{26} (\delta_{M.2,j} / \lambda_M) + \sum_{k=1}^{25} (\delta_{П.П.2,k} / \lambda_{П.П.}) + 1 / \alpha_3 \quad (10)$$

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_B} + \frac{2 \cdot \delta_{M.2,1} + 24 \cdot \delta_{M.2,2}}{\lambda_M} + 25 \cdot \delta_{П.П.2} / \lambda_{П.П.} + 1 / \alpha_3 \quad (11)$$

Опір теплопередачі блоку вздовж траєкторії 3 за відсутності у її складі повітряних пустот, розраховується за формулою:

$$R_3 = R_B + \sum_{j=1}^{49} R_{M.3,j} + R_3 = \frac{1}{\alpha_B} + \sum_{j=1}^{49} (\delta_{M.3,j} / \lambda_M) + 1 / \alpha_3 \quad (12)$$

Як і в попередніх двох випадках, модифікована математична модель набуває вигляду:

$$R_3 = \frac{1}{\alpha_B} + \frac{2 \cdot \delta_{M3,1} + 24 \cdot \delta_{M3,2} + 23 \cdot \delta_{M3,3}}{\lambda_M} + 1 / \alpha_3 \quad (13)$$

Для перевірки найбільш слабких місць керамічного блоку проводиться розрахунок опору теплопередачі найдовшою його гранню (довжиною $L = 0.44$ м у цьому разі), оскільки саме це місце може представляти собою прямий місток холоду, так як ця грань прямо і без розривів повітряними прошарками сполучає приміщення та зовнішнє середовище, забезпечуючи прямий трансмісійний перенос теплової енергії:

$$R_4 = R_B + R_{M.4} + R_3 = \frac{1}{\alpha_B} + \frac{L}{\lambda_M} + 1 / \alpha_3 \quad (14)$$

Дані *аналітично-геометричні моделі* дають змогу узагальнити підхід до теплофізичної складової проектування енергоефективних стінових блоків зі складною багатопустотною структурою.

Процес забезпечення нормативних або заданих теплотехнічних параметрів має такий алгоритм:

1. *Визначити* очікуваний опір теплопередачі огорожувальної конструкції, виконаної зі стінових блоків;
2. *Визначити* геометричні параметри зовнішніх граней стінових блоків;
3. *Сформувати* топологічну структуру решітки перегородок і пустот блоків;
4. *Визначити* товщини внутрішніх перегородок та пустот;
5. *Виконати* дефініцію місць розташування типових траєкторій поширення теплової енергії крізь товщу досліджуваного блоку. Число перерізів має відповідати кількості видів матеріалів (включаючи повітря та різні види застосованого утеплювача), для того, щоб у подальшому можна було скласти й розв'язати відповідну кількість рівнянь теплопередачі. Місця розташування

перерізів слід обирати, з огляду на топологію внутрішньої решітки перегородок блоку;

б. *Розрахувати* необхідні коефіцієнти теплопровідності матеріалів та пустот блочної конструкції. При цьому допускається, що пустоти можуть бути повністю або частково заповнені утеплювачем одного або кількох видів. Матеріал конструкції також може змінюватися в різних зонах блоку. В узагальненій формі система для визначення шуканих показників теплопровідності може бути записана у такий спосіб:

$$\left. \begin{aligned}
 & \left(\sum_{k=1}^{m_{1,1}} \delta_{M.1,k} \right) \cdot k_{M.1} + \left(\sum_{k=1}^{m_{1,2}} \delta_{M.2,k} \right) \cdot k_{M.2} + \dots + \left(\sum_{k=1}^{m_{1,p}} \delta_{M.p,k} \right) \cdot k_{M.p} + \\
 & + \left(\sum_{k=1}^{n_1} \delta_{\Pi.\Pi.1,k} \right) \cdot k_{\Pi.\Pi.} = R - 1/\alpha_B - 1/\alpha_3 ; \\
 & \left(\sum_{k=1}^{m_{2,1}} \delta_{M.1,k} \right) \cdot k_{M.1} + \left(\sum_{k=1}^{m_{2,2}} \delta_{M.2,k} \right) \cdot k_{M.2} + \dots + \left(\sum_{k=1}^{m_{2,p}} \delta_{M.p,k} \right) \cdot k_{M.p} + \\
 & + \left(\sum_{k=1}^{n_2} \delta_{\Pi.\Pi.2,k} \right) \cdot k_{\Pi.\Pi.} = R - 1/\alpha_B - 1/\alpha_3 ; \\
 & \vdots \\
 & \left(\sum_{k=1}^{m_{p,1}} \delta_{M.p,k} \right) \cdot k_{M.1} + \left(\sum_{k=1}^{m_{p,2}} \delta_{M.p,k} \right) \cdot k_{M.2} + \dots + \left(\sum_{k=1}^{m_{p,p}} \delta_{M.p,k} \right) \cdot k_{M.p} + \\
 & + \left(\sum_{k=1}^{n_p} \delta_{\Pi.\Pi.p,k} \right) \cdot k_{\Pi.\Pi.} = R - 1/\alpha_B - 1/\alpha_3 ; \\
 & \left(\sum_{k=1}^{m_{p+1,1}} \delta_{M.1,k} \right) \cdot k_{M.1} + \left(\sum_{k=1}^{m_{p+1,2}} \delta_{M.2,k} \right) \cdot k_{M.2} + \dots + \left(\sum_{k=1}^{m_{p+1,p}} \delta_{M.p,k} \right) \cdot k_{M.p} + \\
 & + \left(\sum_{k=1}^{n_{p+1}} \delta_{\Pi.\Pi.p+1,k} \right) \cdot k_{\Pi.\Pi.} = R - 1/\alpha_B - 1/\alpha_3 .
 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

де: $m_{i,j}$ – кількість прошарків j -го типу матеріалу (використаного при проектуванні блоку), що попадає у переріз уздовж i -ї траєкторії проходження теплового потоку; n_i – кількість повітряних прошарків, що потрапили в переріз уздовж i -ї траєкторії проходження теплового потоку; p – кількість видів матеріалів, використаних при проектуванні блоку; $(p+1)$ – загальна кількість рівнянь, що відповідає кількості показників теплопровідності усіх видів використаних матеріалів та повітряного прошарку; k – позначення величин, обернених до значень теплопровідності, (м·К)/Вт:

$$k = 1/\lambda, \quad (16)$$

7. *Підібрати*, на основі одержаних коефіцієнтів теплопровідності, сировину для несучих компонентів (ребер і граней) енергоефективного блоку;

8. *Визначити* найбільш короткі й/або найбільш ймовірні траєкторії передачі теплової енергії від приміщення до зовнішнього середовища через трансмісійне перенесення ребрами і гранями несучого матеріалу блочної конструкції;

9. *Виконати* розрахунок термічних опорів знайдених траєкторій за формулою (14) та *впевнитися*, що дані опори не менші за встановлений опір теплопередачі конструкції;

10. *Здійснити* розрахунок блоку на міцність на стиск і стійкість внутрішніх граней із застосуванням сучасних методів чисельного моделювання. Характеристики міцності блоку мають бути встановлені відповідно до очікуваних експлуатаційних навантажень у залежності від сфери їх подальшого застосування.

У Розділі 3 «Геометричне моделювання конструктивних параметрів енергоефективних стінових блоків» розроблено основні положення щодо визначення оптимальної топологічної конфігурації та геометричних параметрів внутрішніх перегородок і пустот стінових блоків. Питання досліджено з погляду мінімізації тепловтрат за рахунок трансмісійного переносу тепла через перегородки від внутрішніх приміщень будівлі до зовнішнього середовища. При цьому враховується, що на можливість формування тієї чи іншої геометричної конфігурації як внутрішньої структури, так і зовнішніх параметрів блоків, значною мірою впливає матеріал, з якого їх зроблено. Саме фізико-механічні властивості матеріалів визначають показники міцності всього виробу та його теплотехнічні характеристики.

Чим вища міцність матеріалу, тим тоншими можуть бути внутрішні перегородки (зовнішні перегородки завжди повинні мати певний запас за товщиною, оскільки вони несуть додаткову роль захисту внутрішньої структури блоку від механічних пошкоджень), а отже, передаватимуть меншу кількість теплової енергії кондуктивним шляхом. При цьому повітряні прошарки також не повинні бути надто широкими або надто тонкими, оскільки у такому разі виникають конвективні потоки повітря, що інтенсифікують передачу тепла між протилежними перегородками, або зростає вплив радіаційної теплопередачі між перегородками, внаслідок чого загальний опір теплопередачі блоку також знижуватиметься.

Відтак при проектуванні енергоефективних блоків потрібен *оптимальний баланс між співвідношеннями товщин перегородок та повітряних прошарків*. Для оптимізації зазначеного балансу розглянуто природу розповсюдження теплової енергії крізь тіло матеріалів огороджувальної конструкції.

Процес теплопереносу для двовимірних задач описується законом Фур'є, що пов'язує компоненти теплового потоку \bar{q} у кожній точці з її температурою T :

$$\bar{q} = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} \cdot \bar{e}_x + \frac{\partial T}{\partial y} \cdot \bar{e}_y \right) \quad (17)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу конструкції.

Вектори теплового потоку в кожній точці утворюють векторне поле теплового потоку \bar{q} , яке в узагальненій формі має вигляд:

$$\bar{q}(x, y) = q_x(x, y) \cdot \bar{e}_x + q_y(x, y) \cdot \bar{e}_y \quad (18)$$

Ураховуючи вираз (17), базисні компоненти векторного поля (18) визначаються за формулами:

$$q_x(x, y) = -\lambda \cdot \partial T / \partial x \quad (19)$$

$$q_y(x, y) = -\lambda \cdot \partial T / \partial y \quad (20)$$

Векторне поле \vec{q} має скалярний потенціал, який у кожній точці матеріалу представлений температурним полем T :

$$T = f(x, y). \quad (21)$$

Оскільки теплова енергія завжди розповсюджується від більш теплої до більш холодної області, то напрям переміщення в кожній точці співпадає з вектором градієнту потенціального температурного поля, в холодну пору року траєкторії витоку теплової енергії від внутрішнього (опалювального) кімнатного простору до зовнішнього середовища співпадають з *лініями току поля* \vec{q} .

З математичної точки зору ці траєкторії являють собою *силові лінії*, диференціальне рівняння яких для двовимірного випадку записується у такій формі:

$$\frac{dx}{q_x(x, y)} = \frac{dy}{q_y(x, y)}. \quad (22)$$

Загальний розв'язок цього рівняння має вигляд:

$$\int \frac{1}{q_x(x, y)} dx - \int \frac{1}{q_y(x, y)} dy = C, \quad (23)$$

де C – константа інтегрування, величина якої визначає положення кожної конкретної лінії току у векторному полі \vec{q} .

На рис. 4 показано приклад фрагментів огорожувальних конструкцій, які необхідно замінити окремими багатопустотними блоками.

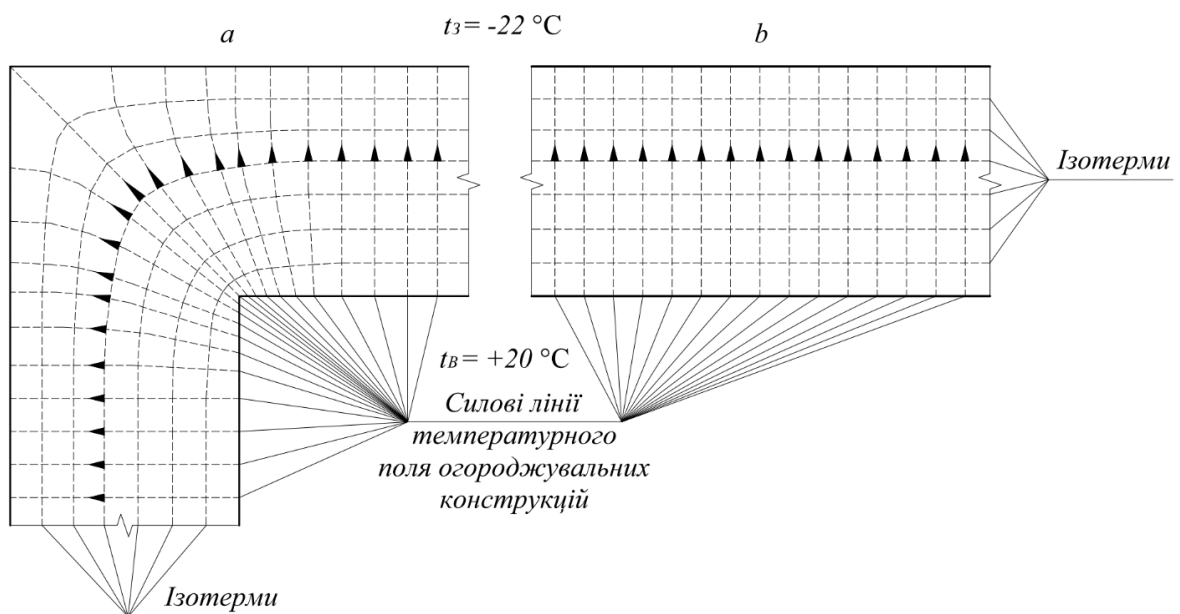


Рис. 4 Характер ізоTERM та силових ліній температурного поля в суцільних огорожувальних конструкціях: *a* – кутовий фрагмент; *b* – рядовий прямолінійний фрагмент

Отже, висновок щодо принципів проектування форми та положення внутрішніх перегородок полягає в тому, що для мінімізації трансмісійної теплопередачі крізь внутрішні перегородки блочної конструкції слід суміщати осі (або грані) цих перегородок із ізолініями температурного поля. Принципову

модель у відповідний спосіб побудованих блоків для раніше наведеного характеру ізотерм представлено на рис. 5.

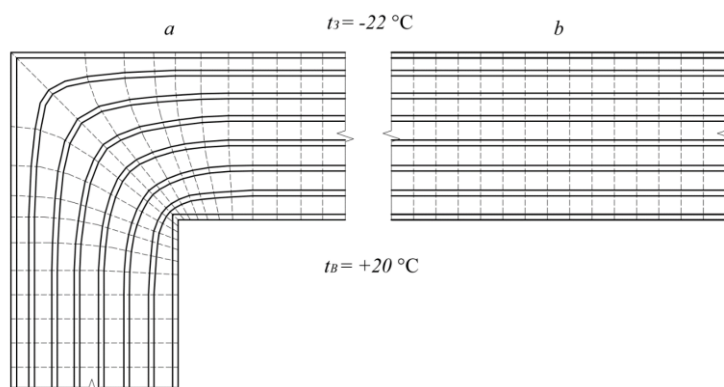


Рис. 5 Ідеалізована геометрична модель внутрішніх перегородок блоків, які співпадають винятково з ізолініями температурного поля:
а – кутовий фрагмент; б – рядовий прямолінійний фрагмент

Модель є ідеалізованою, однак майже не застосовна на практиці через те, що прогнозовані показники міцності та стійкості таких блоків у напрямках, нормальних до ізотерм (внутрішніх перегородок), прогнозовано будуть дуже низькими, що суперечить принципам забезпечення надійності та стійкості конструктивних елементів і будівлі загалом. У контексті цього доречно додати до вже сформованої моделі (рис. 5) додаткові перегородки, що сполучатимуть між собою основні перегородки, які співпадають з ізотермами. Принцип, за яким будуть розміщені такі додаткові перегородки, потребує відповідного обґрунтування та пояснення.

На рис. 6 показано дві траєкторії проходження теплової енергії крізь товщу огорожувальної конструкції.

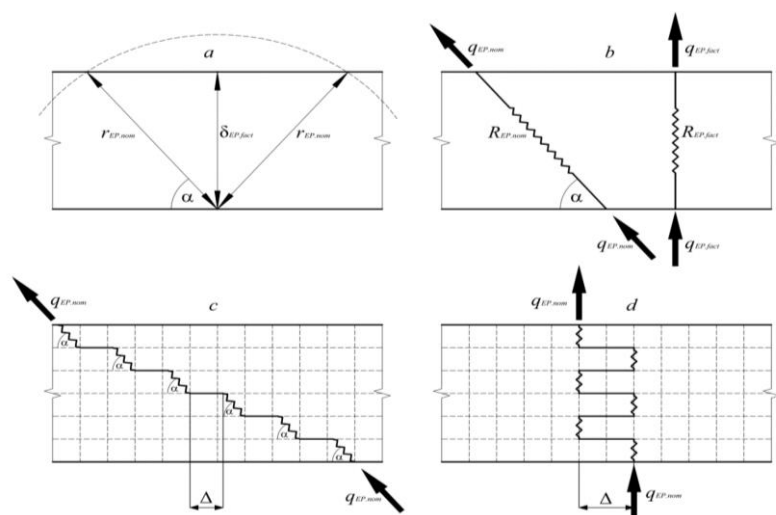


Рис. 6 Визначення кроку зміщення додаткових внутрішніх перегородок та кута їх нахилу по відношенню до зовнішніх граней енергоефективних блоків:

- а – визначення кута нахилу α ; б – опір теплопередачі ортогональної та похилої траєкторій поширення теплової енергії;
- с, d – траєкторії теплопередачі при похилих та ортогональних перегородках

Перша траєкторія перпендикулярна до зовнішніх граней конструкції та є прямолінійною й найкоротшою, тому тепловтрати за цією траєкторією будуть максимальними, якщо вважати стіну виконаною з однорідного матеріалу.

Елементарна кількість теплоти, яка втрачатиметься при цьому одиницею площі поверхні, складатиме $q_{EP.fact}$ (індекс $EP.fact$ – відповідає фактичній енергопотребі на 1 м^2 , що необхідна для забезпечення роботи систем опалення та гарячого водопостачання, але без енерговитрат на охолодження, оскільки йдеться про холодну пору року) та визначатиметься за формулою:

$$q_{EP.fact} = \frac{t_b - t_3}{R_{EP.fact}} \quad (24)$$

де опір теплопередачі $R_{EP.fact}$ становитиме:

$$R_{EP.fact} = \frac{\delta_{EP.fact}}{\lambda}, \quad (25)$$

де: t_3 та t_6 – температури зовнішнього та внутрішнього повітря відповідно; $\delta_{EP.fact}$ – фактична товщина суцільної огорожувальної конструкції.

Друга траєкторія є похилою та проходить крізь конструкцію уздовж прямої лінії у такий спосіб, щоб її довжина $r_{EP.nom}$ давала змогу досягти розрахункової величини опору теплопередачі трансмісійним шляхом $R_{EP.nom}$, яка уможлиблювала забезпечення необхідного розрахункового рівня питомої енергопотреби $EP.nom$. При цьому кількість теплової енергії $q_{EP.nom}$, що пройде цієї траєкторією, визначатиметься за формулою:

$$q_{EP.nom} = \frac{t_b - t_3}{R_{EP.nom}}, \quad (26)$$

де опір теплопередачі $R_{EP.nom}$ становитиме:

$$R_{EP.nom} = \frac{r_{EP.nom}}{\lambda}. \quad (27)$$

Маючи закономірності для визначення тепловтрат за різними траєкторіями, розглянемо два шляхи побудови додаткових перегородок, що сполучатимуть основні:

1. Якщо з технологічних і конструктивних причин або через інші обмеження існує потреба розміщувати додаткові перегородки в середині блоків під прямим кутом до основних, то виникає необхідність у збільшенні довжини траєкторії проходження теплової енергії від $\delta_{EP.fact}$ до $r_{EP.nom}$, щоб досягти необхідного опору трансмісійному переносу тепла $R_{EP.nom}$. Найпростішим шляхом вирішення цієї задачі є розміщення додаткових перегородок із періодичним сталим зміщенням Δ , як це показано на рисунку 3, *d*. Якщо число внутрішніх основних перегородок, що співпадають з ізоляціями, складає n , то величина зміщення Δ становитиме:

$$\Delta = \frac{r_{EP.nom} - \delta_{EP.fact}}{n} \quad (28)$$

Геометрична модель внутрішніх перегородок, побудована з використанням такого **1-го підходу**, продемонстрована на рис. 5.

2. Якщо вимоги ортогональності перегородок немає, можна задіяти інший підхід, за якого додаткові перегородки розміщуватимуться під певним кутом нахилу α до основних та зовнішніх граней (рис. *ба ... бс*). При цьому зникає обов'язкова вимога систематичного зміщення додаткових перегородок на величину Δ , проте таке зміщення дасть змогу значно підвищити теплоізоляційні властивості блочної конструкції. При введенні систематичного кроку Δ у

поєднанні з похилим розміщенням додаткових перегородок, опір трансмісійній теплопередачі R за одержаною траєкторією перевищуватиме розрахунковий і необхідний опір $R_{EP.nom}$ та становитиме:

$$R = R_{EP.nom} + \frac{n+\Delta}{\lambda} = \frac{r_{EP.nom}}{\lambda} + \frac{n \cdot \Delta}{\lambda} = \frac{r_{EP.nom} + n \cdot \Delta}{\lambda} . \quad (29)$$

Геометрична модель внутрішніх перегородок, побудована з використанням цього 2-го підходу, продемонстрована на рис. 7, 8.

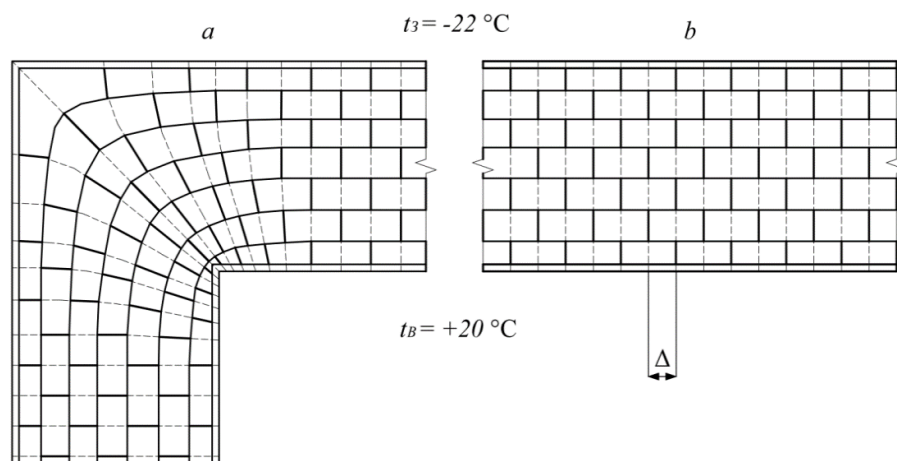


Рис. 7 Геометрична модель внутрішніх перегородок, які співпадають з ізотермами та силовими лініями температурного поля та ортогональні до основних перегородок: *a* – кутовий фрагмент; *b* – рядовий прямолінійний фрагмент

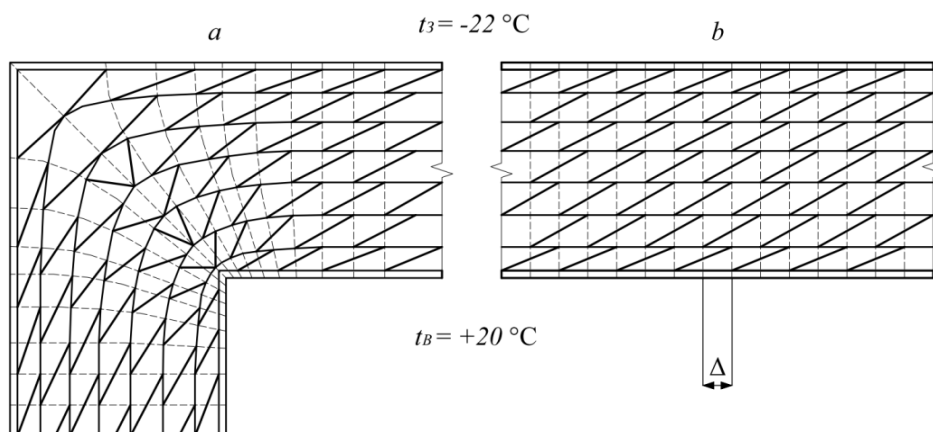


Рис. 8 Геометрична модель ефективної побудови внутрішніх перегородок, які співпадають з ізотермами та мають додаткові простінки під гострим кутом до основних: *a* – кутовий фрагмент; *b* – рядовий прямолінійний фрагмент

Для більшої наочності на рис. 9 та рис. 10 наведено моделі енергоефективних блоків, побудовані на основі 1-го та 2-го підходів (принципів).

У такому разі, на підставі розуміння фізичної основи і принципів побудови внутрішніх перегородок, визначимо величину кута α , під яким сполучатимуться внутрішні основні та додаткові матеріальні перегородки. З геометричної точки зору (рис. 6 *a*) цей кут можна визначити з такого співвідношення:

$$\sin \alpha = \frac{\delta_{EP.fact}}{r_{EP.nom}} \quad (30)$$

звідки отримаємо:

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{\delta_{EP.fact}}{r_{EP.nom}} \right) \quad (31)$$

Значення $\delta_{EP.fact}$ та $r_{EP.nom}$ можна виразити через фізичні величини $R_{EP.fact}$, $R_{EP.nom}$ і λ , користуючись тотожностями (32) та (33):

$$\delta_{EP.fact} = \lambda \cdot R_{EP.fact} \quad (32)$$

$$r_{EP.nom} = \lambda \cdot R_{EP.nom} \quad (33)$$

Підставляючи вирази (24) та (25) до формул (30) та (31) скорочуючи величину λ в обох випадках, одержимо відповідно:

$$\sin \alpha = \frac{R_{EP.fact}}{R_{EP.nom}} \quad (34)$$

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{R_{EP.fact}}{R_{EP.nom}} \right) \quad (35)$$

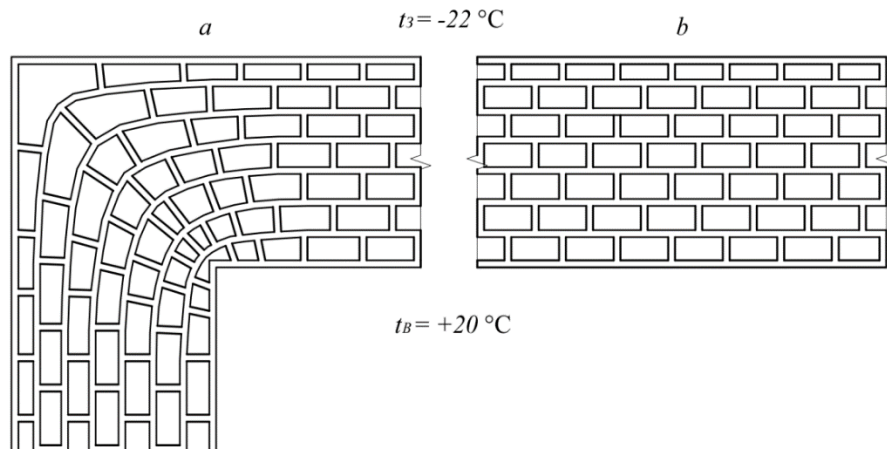


Рис. 9 Геометрична модель блоку з ортогональними внутрішніми перегородками та їх заданими товщинами:

a – кутовий фрагмент; b – рядовий прямолінійний фрагмент

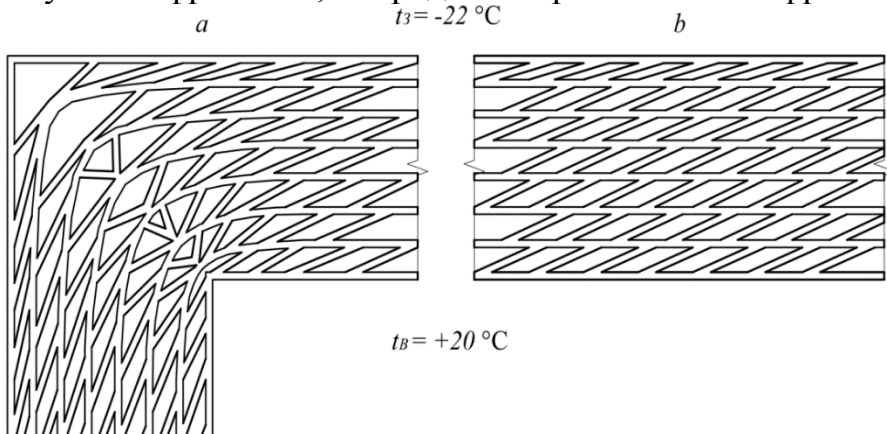


Рис. 10 Геометрична модель блоку підвищеної ефективності з внутрішніми перегородками під гострим кутом одні до одних та їх заданими товщинами: a – кутовий фрагмент; b – рядовий прямолінійний фрагмент

За аналогією можна виразити кут α й через показники тепловтрат $q_{EP.fact}$ та $q_{EP.nom}$, користуючись тотожностями (33) та (34) відповідно. Виразивши з останніх рівностей опори теплопередачі, одержимо:

$$R_{EP.fact} = \frac{t_B - t_3}{q_{EP.fact}} \quad (36)$$

$$R_{EP.nom} = \frac{t_B - t_3}{q_{EP.nom}} \quad (37)$$

Підставляючи вирази (36) та (37) до формул (34) і (35) та скорочуючи величину $(t_B - t_3)$, отримаємо:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{q_{EP.nom}}{q_{EP.fact}}\right) \quad (38)$$

Наведені формули дають змогу визначити кут нахилу перегородок, користуючись вимогами до теплофізичних або енергетичних показників огорожувальних конструкцій, що проектуються.

Запропонованим підходом до побудови геометричних моделей внутрішніх перегородок стінових багатопустотних керамічних блоків досягається заданий опір теплопередачі огорожувальних конструкцій із мінімумом втрат енергії крізь них.

У **Розділі 4 «Рекомендації щодо практичного впровадження розроблених розрахунково-конструктивних геометричних моделей»** викладено ключові аспекти проектування внутрішніх геометричних параметрів структури стінових багатопустотних енергоефективних блоків для зовнішніх огорожувальних конструкцій і сформульовано алгоритм визначення геометричних параметрів внутрішньої структури енергоефективних стінових блоків. При цьому запропоновано визначати геометричні параметри стінових блоків, ґрунтуючись на аналізі ізоліній температурних полів.

Алгоритм передбачатиме такі дії:

1. *Моделювання* плоского температурного поля в аналогічному за формою та габаритами фрагменті зовнішньої огорожувальної конструкції;

2. *Виділення* з множини ізоTERM певної кількості тих, які надалі слугуватимуть геометричними місцями розташування вузлів з'єднання сітки внутрішніх перегородок блоку, що проектується. При цьому можливі два випадки розміщення перегородок, що не лежать на ізоTERМАХ, за яких спосіб вибору кількості та частоти ізоTERM відрізнятиметься;

3. *Задання* кроку дискретизації вздовж обраних ізоTERM, з метою їх подальшого з'єднання та *визначання* у такий спосіб топології внутрішньої сітки перегородок блоку;

4. *Формування* початкових товщин внутрішніх перегородок стінового блоку для подальшого моделювання впливу зовнішніх і внутрішніх навантажень, а також для відтворення температурного поля в тілі одержаного блоку;

5. *Виконання* чисельного моделювання напружено-деформованого стану одержаної на поточному кроці проектування конфігурації блоку. З'ясування, чи задовольняють геометричні параметри та фізико-механічні характеристики матеріалу одержаного стінового блоку конструктивним вимогам на предмет міцності та стійкості;

6. У разі, якщо пункт 5 не виконується, *повторення* пунктів 2 ... 5, обравши більш щільний крок виділення ізоліній та/або менший крок дискретизації уздовж відповідних ізоліній;

7. *Виконання* для одержаної конфігурації внутрішніх перегородок чисельного моделювання температурного поля, з урахуванням утворених повітряних пустот або якщо передбачаються не пустоти, а заповнення ізоляційним матеріалом, то з урахуванням додаткових матеріалів;

8. *Проведення* формування траєкторій найшвидших тепловтрат крізь тіло блоку, спираючись на результати моделювання температурного поля;

9. *Перевірка* опору теплопередачі одержаних траєкторій на предмет того, чи задовольняє їх опір нормативним значенням;

10. *Здійснення* перевірки траєкторій тепловтрат уздовж найкоротших матеріальних сполучень (уздовж перегородок за максимально короткою траєкторією) на предмет відповідності нормативним (або заздалегідь заданим) значенням опору теплопередачі;

11. *Виконання* перевірки найбільш властивих для одержаної конфігурації блоку нормальних перерізів на предмет відповідності нормативним (або наперед заданим) значенням опору теплопередачі.

Використовуючи запропонований алгоритм дій при проектуванні внутрішньої топології та геометричних параметрів сітки перегородок, можна досягти оптимальних результатів з погляду однорідності заданих показників опору теплопередачі у стіновому багатопустотному блоці будь-якої форми та конфігурації. Відтак послідовно застосовуючи цей алгоритм для оптимізації блоків, що мають розміщуватися у складі різних фрагментів огорожувальних конструкцій, можна запобігти виникненню містків холоду на відповідних ділянках.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційному дослідженні розроблено оптимізаційні розрахунково-конструктивні геометричні моделі багатопустотних стінових блоків та вдосконалено процес проектування енергоефективних огорожувальних стінових конструкцій загалом.

Наукове значення одержаних результатів полягає у створенні розрахунково-конструктивних геометричних моделей та оптимізаційних методів стінових огорожувальних конструкцій.

Практичне значення результатів роботи полягає у формулюванні рекомендацій, що дають змогу контролювати тепловитрати крізь огорожувальні конструкції будь-якої конфігурації та форми.

За результатами дослідження сформульовано такі висновки:

1. Визначено перспективи подальших досліджень у напрямі оптимізації співвідношень між показниками опору теплопередачі та допустимим рівнем навантаження, на основі системного аналізу сучасного стану проектування енергоефективних огорожувальних стінових конструкцій та моделювання їх геометричних параметрів.

2. Запропоновано математичний апарат розрахунку їх теплофізичних параметрів, застосування якого дає змогу зменшити містки холоду зовнішніх огорожувальних конструкцій із багатопустотних стінових блоків, забезпечити

високі й рівномірні показники опору теплопередачі на всій площині стінової конструкції, незалежно від форми будівлі у плані, на основі геометричних моделей стінових керамічних блоків.

3. Упроваджено комплексний підхід до оптимізаційного геометричного моделювання конструктивних параметрів енергоефективних стінових блоків, в основу якого покладено розроблений алгоритм оптимізаційного геометричного моделювання конструктивних параметрів енергоефективних стінових блоків, що дає змогу досягти заданого опору теплопередачі огорожувальних конструкцій, мінімізувавши втрати енергії крізь них.

4. Розроблено комплексні геометричні моделі стінових огорожувальних конструкцій, з урахуванням фізико-механічних експлуатаційних обмежень та рекомендації щодо практичного використання розробленого підходу, спрямовані на мінімізацію втрат трансмісійної складової процесу теплопередачі.

5. Упровадження одержаних наукових результатів у виробництво та освітній процес сприяє підвищенню ефективності здійснення процесу проектування стінових огорожувальних конструкцій, а також проведенню підготовки висококваліфікованих фахівців архітектурно-будівельного проектування енергоефективних огорожувальних конструкцій на основі створеного математичного апарату та методології, що ґрунтується на запропонованих розрахунково-конструктивних геометричних моделях.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці у зарубіжних наукових виданнях

1. Leshchenko V., Yakusevich S., Yakusevich A., Skochko V. Comparative analysis of numerical modeling methods of temperature fields related to the problems of energy efficient structures designing. // Scientific letter of Academes Society of Michail Baludyansky. 2020. Volume 8. N1a. P. 144–152 (*Особистий внесок здобувача: здобувачем виконано аналіз методів чисельного моделювання багатопустотних блоків*).

Статті у фахових виданнях України

2. Лещенко В.П., Плоский В.О., Панько О.М. Концептуальні положення розробки енергоефективних стінових блочних конструкцій // Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2017. Вип. 48. С. 489–502. (Індекс Google Scholar) (*Особистий внесок здобувача: здобувачем розроблено загальну концепцію оптимізації багатопустотних блочних конструкцій*).

3. Лещенко В.П., Плоский В.О., Скочко В.І. Теоретичні аспекти проектування внутрішніх геометричних параметрів енергоефективних стінових блоків // Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2018. Вип. 50. С. 376–388. (Індекс Google Scholar) (*Особистий внесок здобувача: здобувачем розроблено алгоритм розрахунку геометричних параметрів енергоефективних багатопустотних блоків*).

4. Лещенко В.П. Алгоритм визначення геометричних параметрів внутрішньої структури енергоефективних стінових блоків // Прикладна геометрія та інженерна графіка. 2018. Вип. 95. С. 215–219 (Індекс Google Scholar).

Додаткові публікації та праці апробативного характеру

5. Лещенко В.П., Плоский В.О., Панько О.М. Основи розробки енергоефективних стінових блочних конструкцій // VII Міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані енергоефективні технології в архітектурі та будівництві: Енергоінтеграція–2017», 26–28 квітня 2017 р. Київ: КНУБА, 2017. С. 52–54. *Здобувачем сформульовані рекомендації щодо практичного застосування математичного апарату оптимізаційного моделювання стінових блоків.*

6. Лещенко В. Підбір геометричних параметрів структури енергоефективних стінових блоків при їх проектуванні // IX Міжнародна науково-практична конференція «Енергоінтеграція–2019», 24–26 квітня 2019 р. Київ: КНУБА, 2019. С. 42.

7. Leschenko V. Influence of the topological structure of the grids of internal material partitions of energy-efficient wall block structures on their thermal resistance // International Scientific-Practical Conference of young scientists «Build-Master-Class-2017», Desember 2017. Kyiv, 2017. P. 64.

8. Лещенко В., Куліков П., Скочко В., Кожедуб С. Дослідження температурних полів засобами чисельного моделювання // International Scientific-Practical Conference of young scientists «Build-Master-Class–2020», November 2020. Kyiv, 2020. P. 84–85. *Здобувачем розроблено чисельну модель розповсюдження теплової енергії у невітлопрозорому середовищі.*

АНОТАЦІЯ

Лещенко В. П. Оптимізаційні розрахунково-конструктивні геометричні моделі багатопустотних стінових блоків. – *Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.01.01 – прикладна геометрія, інженерна графіка. – Київський національний університет будівництва і архітектури. – Київ, 2021.

Дисертаційну роботу присвячено розробці оптимізаційних розрахунково-конструктивних геометричних моделей багатопустотних стінових блоків та вдосконаленню процесу проектування енергоефективних огороджувальних стінових конструкцій загалом. У ході дослідження дістала подальшого розвитку теорія архітектурно-будівельного проектування енергоефективних огороджувальних конструкцій завдяки використанню оптимізаційних розрахунково-конструктивних геометричних моделей багатопустотних стінових блоків.

Проаналізовано сучасний стан проектування енергоефективних огороджувальних стінових конструкцій, що дало змогу визначити перспективи для подальших нових наукових досліджень. Створено математичний апарат для розрахунків теплофізичних параметрів стінових керамічних блоків на основі їх геометричних моделей. Запропонований математичний апарат ілюструє правила збереження основних властивостей теплотехнічних та механічних властивостей енергоефективних багатопустотних стінових блоків при їх розробці. Запропонований принцип пошуку показників теплопровідності дає змогу

забезпечити високі й рівномірні показники опору теплопередачі на всій площині стінової конструкції, незалежно від форми будівлі у плані. Розроблено основи оптимізаційного геометричного моделювання конструктивних параметрів енергоефективних стінових блоків. Користуючись запропонованими підходами до побудови відповідних геометричних моделей внутрішніх матеріальних перегородок стінових багатопустотних блоків, можна досягти заданого опору теплопередачі огорожувальних конструкцій, мінімізувавши втрати енергії крізь них. Розроблено рекомендації щодо практичного використання створених комплексних геометричних моделей. Запропоновані алгоритми базуються на мінімізації втрат трансмісійної складової процесу теплопередачі. При цьому не береться до уваги радіаційна складова теплообміну між сусідніми стінками та конвекційна теплопередача за рахунок циркуляції повітря в пустотах між цими стінками, у зв'язку з їх незначним впливом за загальний теплообмін між будівлею та зовнішнім середовищем.

Результатом упровадження є підвищення ефективності здійснення процесу проектування стінових огорожувальних конструкцій, зведених з багатопустотних енергоефективних блоків.

Окреслено напрями подальшого розвитку напрацьованого математичного апарату та запропонованих розрахунково-конструктивних геометричних моделей. У подальших дослідженнях наведені методи й оптимізаційні алгоритми доцільно доповнити рекомендаціями щодо проектування геометричних параметрів блоків у місцях їх стикування, концентрації силових ліній, а також вказівками щодо забезпечення їх міцності та стійкості в період монтажу та подальшої експлуатації.

Ключові слова: енергоефективні стінові блоки, геометричні моделі, опір теплопередачі, трансмісійні втрати тепла, фізико-механічне обстеження, архітектурно-будівельне проектування, енергоефективність, теплофізичні параметри, силова лінія, міцність, стійкість.

ABSTRACT

Leshchenko V. P. Optimization calculation and constructive geometric models of hollow-wall blocks. – *Qualification scientific work on the manuscript.*

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.01.01 – applied geometry, engineering graphics. – Kyiv National University of Construction and Architecture. – Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the development of optimization calculation and constructive geometric models of multi-hollow wall blocks and to the improvement of the process of designing energy-efficient enclosing wall structures in general. The theory of architectural and construction design of energy-efficient enclosing structures due to the use of optimization computational and structural geometric models of multi-hollow wall blocks was further developed in the work.

The current state of design of energy-efficient wall enclosures is analyzed, which allowed to determine the prospects for further new research. Based on the existing analytical-geometric models, the approach to the thermophysical component of designing energy-efficient wall blocks with a complex multi-hollow structure is

generalized. A mathematical device for calculating the thermophysical parameters of wall ceramic blocks based on their geometric models. The proposed mathematical apparatus illustrates the rules of preserving the basic properties of thermal and mechanical properties of energy-efficient multi-hollow wall blocks during their development. The proposed principle of searching for thermal conductivity allows to provide high and uniform heat transfer resistance over the entire plane of the wall structure, regardless of the shape of the building in plan. The bases of optimization geometrical modeling of constructive parameters of energy-efficient wall blocks are developed. Using the proposed approaches to the construction of appropriate geometric models of internal material partitions of multi-hollow wall blocks, it is possible to achieve a given heat transfer resistance of enclosing structures, minimizing energy losses through them. Recommendations for the practical use of the created complex geometric models are developed. The proposed algorithms are based on minimizing the loss of the transfer component of the heat transfer process. This does not take into account the radiation component of heat exchange between adjacent walls and convective heat transfer due to air circulation in the cavities between these walls due to their negligible impact on the overall heat exchange between the building and the environment.

The approach proposed in the work is based on studies of real structures, which ensures the adequacy of the results. This ensures the correct application of models and methods of applied geometry and numerical modeling in the implementation of scientific results in the production and educational process. The obtained scientific results are implemented in the production and educational process. The result of the implementation is to increase the efficiency of the process of designing wall enclosures from multi-hollow energy efficient units.

The key aspects of designing the internal geometric parameters of the structure of wall multi-hollow energy-efficient blocks for external enclosing structures has presented and the algorithm for determining the geometric parameters of the internal structure of energy-efficient wall blocks is proposed. It is proposed to determine the geometric parameters of the wall blocks, based on the analysis of isolines of temperature fields.

The scientific significance of the obtained results lies in the creation of computational and geometric models and optimization methods of wall enclosing structures. The practical significance of the results of the work lies in the creation of recommendations to control heat consumption through the enclosing structures of any configuration and shape.

The directions of further development of the developed mathematical apparatus and the offered computational and constructive geometrical models are stated. In further research, optimization methods and algorithms should be supplemented by recommendations for the design of geometric parameters of blocks at their joints, the concentration of power lines, as well as instructions for ensuring their strength and stability during installation and subsequent operation.

As a result of the conducted researches, the complex computational and constructive geometrical models of the internal structure of building modular elements and the methodology for determining the rational thermophysical parameters of multi-hollow wall blocks have been improved. Introduction of the carried-out researches in manufacture allows to increase efficiency of realization of process of designing of wall

enclosing designs, and use of the made optimization models and methods in educational process allows to carry out preparation of highly skilled experts of architectural and construction design of energy-efficient enclosing designs.

Key words: energy efficient wall blocks, geometric models, heat transfer resistance, heat transfer losses, physical and mechanical inspection, architectural and construction design, energy efficiency, thermophysical parameters, power line, strength, stability.

Наклад 100. Папір офсетний. Ум.-др. арк. 0,9.
Підписано до друку 05.04.2021. Замовлення 163.

Надруковано в «МП Леся».

*Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
суб'єктів видавничої справи серія ДК № 892 від 08.04.2002.*

«МП Леся»

03148, Київ, а/с 115.

Тел./факс: (066) 60-50-199, (068) 126-49-26

E-mail: lesya3000@ukr.net