

**ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ ТОВЩИНИ ТЕПЛОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ  
МОДУЛЬНИХ БУДИНКІВ НА ОСНОВІ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО  
АНАЛІЗУ**

*В. М. Желих, доктор технічних наук, професор*

*Ю. В. Фурдас, кандидат технічних наук, старший викладач*

*С. П. Шаповал, доктор технічних наук, доцент*

*М. Р. Ребман, аспірант*

*А. К. Лісковщенко, студент*

*Національний університет «Львівська політехніка»*

**Анотація.** *Нині модульне будівництво набуває популярності в облаштуванні виробничих приміщень.*

*Мета дослідження - теоретичне обґрунтування вибору оптимальної товщини теплової ізоляції для зовнішніх захищень модульних будинків з врахуванням критеріїв оцінки, що базується на методі аналізу ієрархій.*

*В статті відображено можливість застосування будинків модульного типу для житлових та громадських потреб. Враховуючи особливості застосування теплоізоляційних матеріалів, такі споруди зводяться за короткий період часу у зв'язку з використанням готових модулів.*

*Також запропоновано використання багатокритеріального аналізу для порівняння різних товщин теплової ізоляції модульного будинку.*

*Отримані результати представлені у вигляді пелюсткових діаграм та діаграм глобальних пріоритетів, що дало можливість зробити глибоку оцінку декілька товщин теплової ізоляції. При проведенні теоретичних досліджень слід відзначити, що для вибору теплової ізоляції одночасно враховувалась важливість кожного з критеріїв.*

*Була проведена експертна оцінка для визначення товщин теплової ізоляції, яка може бути використана для легких збірних конструкцій модульних будинків. У результаті проведених досліджень було встановлено, що найбільш придатним теплоізоляційним матеріалом є поліуретан.*

**Ключові слова:** *модульний будинок, багатокритеріальний аналіз, тепла ізоляція, пелюсткова діаграма, діаграма глобальних пріоритетів*

**Актуальність.** *Нині модульне будівництво набуває популярності в облаштуванні виробничих приміщень. Такі будівлі відповідають сучасним вимогам до промислового будівництва, зокрема, вони мають привабливий зовнішній вигляд,*

якісні несучі та енергозберігаючі конструкції зовнішніх огорожень, максимально короткий час будівництва та низькі експлуатаційні витрати.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Це все можливо завдяки використанню легких металевих конструкцій [1]. Подібне будівництво набуло широкого поширення завдяки транспортабельності сталевих конструкцій, високій мірі заводської готовності несучих та огорожувальних елементів, а також можливості переміщення будівлі на нову ділянку.

**Мета дослідження** - теоретичне обґрунтування вибору оптимальної товщини теплової ізоляції для зовнішніх захищень модульних будинків з врахуванням критеріїв оцінки, що базується на методі аналізу ієрархій.

**Матеріали та методи дослідження.** Багатокритеріальне прийняття рішень, на відміну від аналізу, заснованого на одному критерії, сприяє створенню цілісного набору критеріїв, який буде функціонувати як інструмент повної оцінки і дозволить сформулювати, використовувати та трансформувати переваги в процесі прийняття рішень. Таким чином, обґрунтовуючи рішення щодо вибору товщини теплоізоляції, яка може бути інтегрована з енергоефективністю та охороною природи і для якої потрібно вирішити багато проблем, настійно рекомендується використовувати багатокритеріальні методи прийняття рішень. При кількісній оцінці критерію активності системи за сукупністю параметрів необхідно здійснювати ієрархічне представлення факторів, що впливають. Для цього використовується метод аналізу ієрархій, що є одним із способів проведення складних експертиз. Метод аналізу ієрархій передбачає розкладання проблеми на більш прості компоненти.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Нами проведено багатокритеріальний аналіз варіантів із використанням попарних порівнянь.

Починаючи оцінювати товщину ізоляційного матеріалу, необхідно вирішити два завдання:

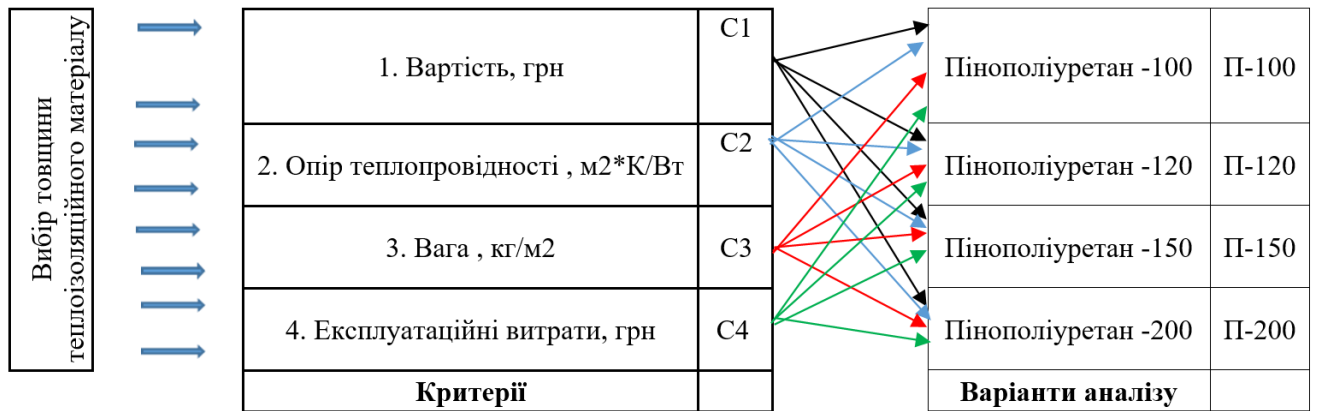
1. Сформулювати групу експертів.
2. Розробити систему критеріїв, за якими буде проводитися аналіз.

Кількість експертів, яких ми приймаємо, 5. Це незалежні кваліфіковані фахівці, які мають досвід у цій галузі.

Були вибрані критерії, за якими будуть оцінюватися варіанти (рис.1):

$C_1$  – Вартість;  $C_2$  – Опір теплопровідності;  $C_3$  – Вага;

$C_4$  – Експлуатаційні витрати.



**Рис. 1. Ієрархія оптимізаційної задачі вибору товщини теплової ізоляції**

Таким чином маємо множину критеріїв, за якими будуть оцінені варіанти:

$$C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_8\}.$$

Для конструкції модульних будинків використовується декілька товщин теплової ізоляції: пінополіуретан – 100 мм – S1, пінополіуретан – 120 мм – S2, пінополіуретан -150 мм – S3, пінополіуретан - 200 м – S4. Варіанти, які підлягають багатокритеріальному аналізу:

- упорядкування елементів множини  $S$  за критеріями із множини  $C$ ;
- визначення функції приналежності нечітких множин на основі експертної інформації про парні порівняння варіантів за допомогою 9-бальної шкали Сааті [4].

Принцип синтезу пріоритетів полягає в розробці глобального критерію на основі системи локальних критеріїв. Локальні критерії визначаються як вектори пріоритетів кожної матриці парних порівнянь [3].

Власний вектор матриці позначається:

$$AC11 = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де  $a_0, a_1, a_3 \dots a_n$  – значення компонент власного вектора матриці.

Для критерію  $C_I$  (вартість матеріалу) матриця парних розраховано нижче.

$$ACI = \begin{pmatrix} 1 & ACI_{0,1} & ACI_{0,2} & ACI_{0,3} \\ \frac{1}{ACI_{0,1}} & 1 & ACI_{1,2} & ACI_{1,3} \\ \frac{1}{ACI_{0,2}} & \frac{1}{ACI_{1,2}} & 1 & ACI_{2,3} \\ \frac{1}{ACI_{0,3}} & \frac{1}{ACI_{1,3}} & \frac{1}{ACI_{2,3}} & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Визначаємо середнє геометричне по кожному рядку матриці парних порівнянь:

$$ACI1 = \begin{pmatrix} \sqrt[4]{ACI_{0,0} + ACI_{0,1} + ACI_{0,2} + ACI_{0,3}} \\ \sqrt[4]{ACI_{1,0} + ACI_{1,1} + ACI_{1,2} + ACI_{1,3}} \\ \sqrt[4]{ACI_{2,0} + ACI_{2,1} + ACI_{2,2} + ACI_{2,3}} \\ \sqrt[4]{ACI_{3,0} + ACI_{3,1} + ACI_{3,2} + ACI_{3,3}} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Далі необхідно визначити вектор локальних пріоритетів ( $ACI11$ ), який і буде показувати значимість порівнюваних критеріїв з точки зору даного експерта. Компонента вектора пріоритетів визначається як відношення компоненти власного вектора матриці до суми значень його компонент [3].

$$ACI11 = \begin{pmatrix} \frac{ACI1_0}{\sum ACI1} \\ \frac{ACI1_1}{\sum ACI1} \\ \frac{ACI1_2}{\sum ACI1} \\ \frac{ACI1_3}{\sum ACI1} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Визначаємо відношення узгодженості:

$$OC = \frac{IC}{CC} \leq 0,2, \quad (5)$$

де  $OC$  – відношення узгодженості,  $IC$  – індекс узгодженості,  $CC$  – величина, яка відповідає середній випадковій узгодженості матриці.

Індекс узгодженості може бути визначений за такою формулою [3]:

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (6)$$

де  $n$  – число елементів, що порівнюються,  $\lambda_{\max}$  – розрахункова величина.

Для розрахунку  $\lambda_{\max}$  визначається сума за кожним стовпцем матриці, яка помножується на відповідну компоненту вектора пріоритетів. Умовно це можна представити так[3]:

$$\sum S_1 \cdot x_1 + \sum S_2 \cdot x_2 + \sum S_3 \cdot x_3 + \dots + \sum S_n \cdot x_n = \lambda_{\max}, \quad (7)$$

де  $\sum S_1, \sum S_2, \sum S_3, \dots, \sum S_n$  – сума елементів відповідних стовпців матриці.

$$\lambda_1 = (\sum AC1^{<0>} \cdot AC111_0 + \sum AC1^{<1>} \cdot AC111_1 + \sum AC1^{<2>} \cdot AC111_2 + \sum AC1^{<3>} \cdot AC111_3)$$

Отже, в нашому випадку розрахункова величина для критерію  $C_1$ :

$$\lambda_{\max} = \lambda_1.$$

Отримані значення вектора пріоритетів ( $AC111$ ) – це система локальних критеріїв, на основі яких розраховується глобальний пріоритет варіанту за кожним варіантом [3].

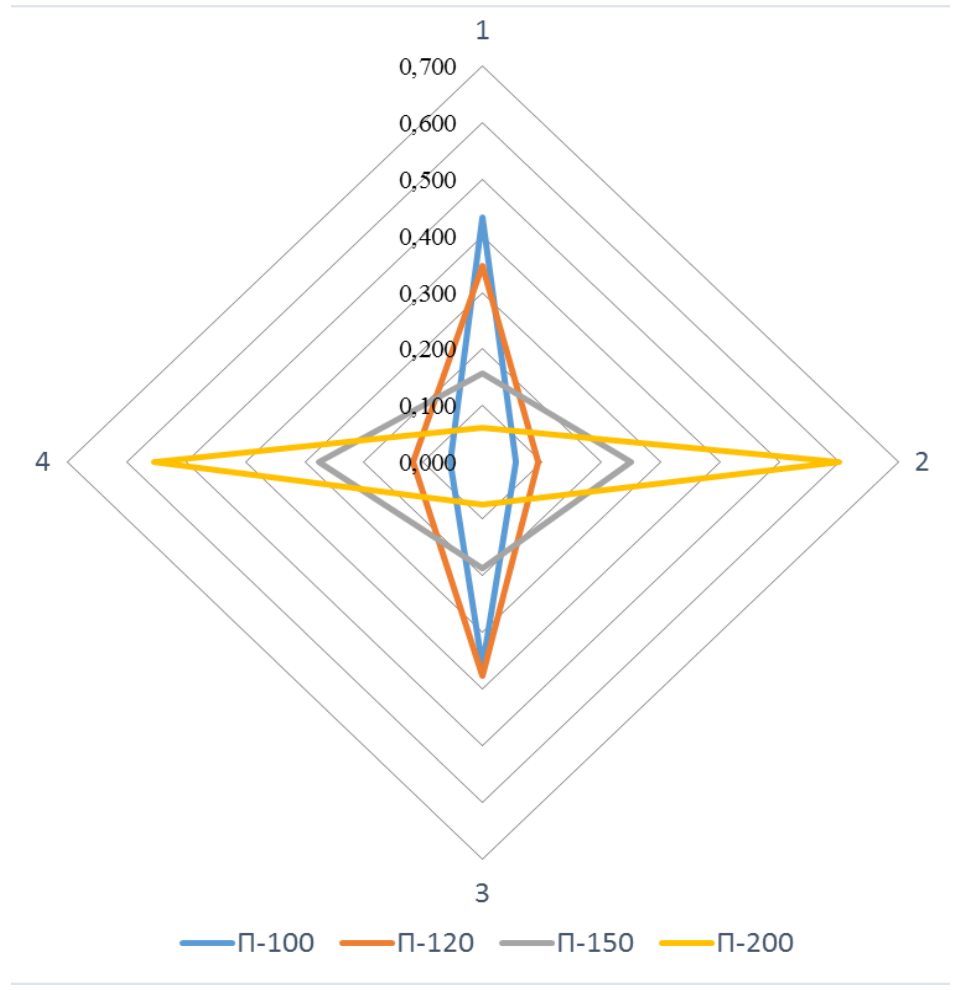
$$P_{j_r} = \sum_{i=1}^m P_j(i) \cdot w(i), \quad (8)$$

де  $P_{j_r}(i)$  – пріоритет  $j$  – ой альтернативи за  $i$  – им критерієм,  $w(i)$  – значущість  $i$  – ого критерію.

Для вибору установок термічного знешкодження розраховані вектори локальних пріоритетів.

$$P_g = AC111 \cdot W1 + AC121 \cdot W2 + AC131 \cdot W3 + AC141 \cdot W4.$$

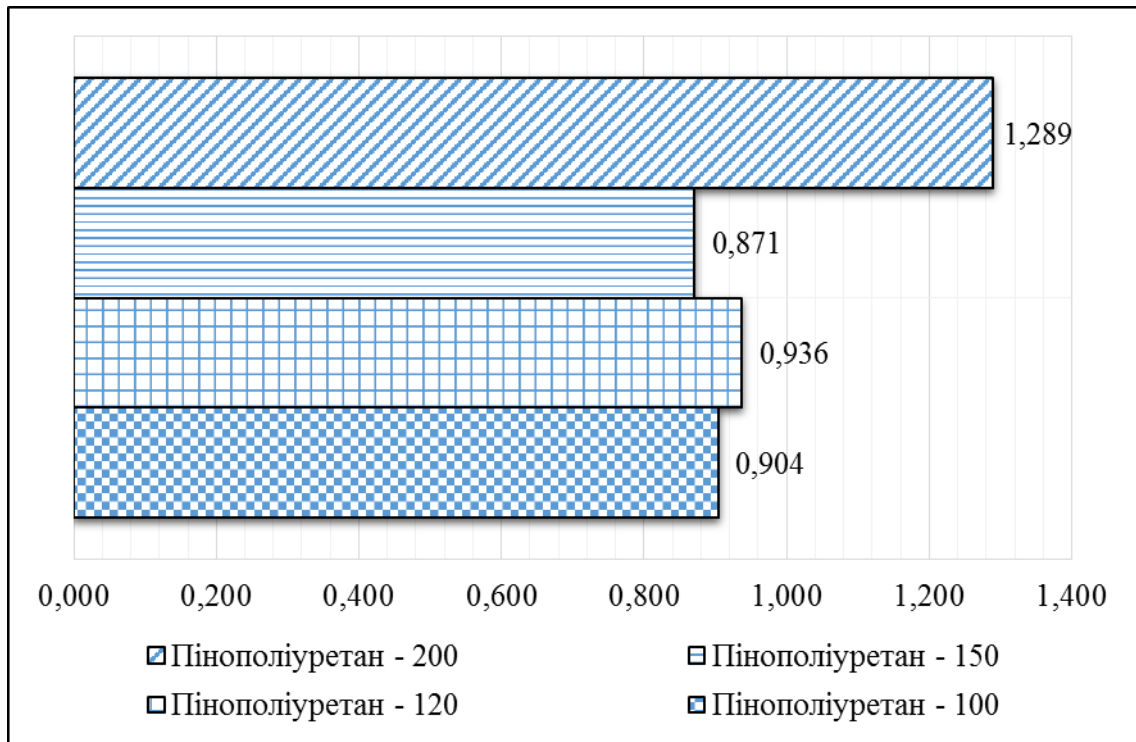
Інтерпретація результатів аналізу реалізована у формі пелюсткової діаграми (рис. 2). Діаграма глобальних пріоритетів – на рис. 3.



| Варіанти | Критерії |       |       |      |
|----------|----------|-------|-------|------|
|          | 1        | 2     | 3     | 4    |
| П-100    | 0,433    | 0,055 | 0,360 | ,055 |
| П-120    | 0,348    | 0,094 | 0,378 | ,116 |
| П-150    | 0,157    | 0,250 | 0,188 | ,275 |
| П-200    | 0,062    | 0,601 | 0,074 | ,553 |

**Рис. 2. Результати багатокритеріального аналізу для вибору типу теплоізоляційного матеріалу – пелюсткова діаграма**

З діаграми видно, що для пінополіуретану товщиною 200 мм найвищим показником є високий опір теплопровідності та низькі експлуатаційні витрати. У свою чергу пінополіуретан товщиною 100 мм має низькі капітальні витрати та низьку питому вагу.



**Рис. 3. Діаграма глобальних пріоритетів**

Беручи до уваги значення глобальних пріоритетів з діаграми (рис.3) впливає, що найоптимальніша товщина теплоізоляційного матеріалу – пінополіуретан 200 мм.

**Висновки і перспективи.** Розглянуто можливість застосування будинків модульного типу для житлових та громадських потреб. Завдяки особливостям технології і застосування теплоізоляційних матеріалів такі споруди зводяться за короткий термін за допомогою готових модулів, що відзначаються простотою та швидкістю монтажу.

Вибір товщини теплоізоляційного матеріалу зовнішнього захищення модульного будинку ґрунтувався на застосуванні багатокритеріального аналізу різних товщин теплової ізоляції.

Застосування пелюсткових діаграм та діаграм глобальних пріоритетів дало можливість зробити глибоку оцінку декілька товщин теплової ізоляції. Особливо слід звернути увагу, що для вибору теплової ізоляції одночасно враховувалась важливість кожного з критеріїв.

У результаті створеної системи експертних оцінок для визначення товщини теплової ізоляції, яка може бути використана для легких збірних конструкцій модульних будинків, на основі багатокритеріального аналізу варіантів з використанням парних порівнянь було встановлено, що найбільш придатним теплоізоляційним матеріалом є поліуретан товщиною 200 мм.

Результати багатокритеріального аналізу представлені у вигляді пелюсткових діаграм та діаграм глобальних пріоритетів.

### **Список використаних джерел**

1. Лисенко В. А. Сучасні будинки та споруди з легких металевих конструкцій / В. А. Лисенко, С. О. Постернак, І. М. Постернак, Н. Ф. Уразманова, О. О. Постернак // Современные строительные конструкции из металла и древесины. - Сборник ССКМД №10-19. - 2006. – С. 120-124.
2. Саати Т. Аналитическое планирование. Организация систем / Т. Саати, К. Кернс. – М.: Радио и связь. - 1991. – 224 с.
3. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Саати Т. – М.: Радио и связь, 1993.
4. Крот О.П. Обґрунтування вибору оптимального способу знешкодження твердих побутових відходів у містах // Четвертий міжнародний Конгрес «Захист навколишнього середовища. Збалансоване природокористування». 20-21 квітня 2017 р. - Львів. – С. 65–66.
5. Авдєєва М.С. Особливості формування житла для вимушених переселенців зони АТО / М. С. Авдєєва, А. Б. Капліна // Сучасні проблеми архітектури та містобудування. Наук.-техн. зб. Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. - Київ : КНУБА. - 2015. - Вип. 38. - С. 187-194.
6. Сафронова О. О. Сучасні тенденції в організації простору будинків-інтернатів для людей похилого віку / О. О. Сафронова, М. С. Бедзір // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки. – 2015. – Т. 4. - С. 231-236.
7. Дьяченко О. С. Об'ємно-модульне будівництво доступного житла й готелів в Україні / О. С. Дьяченко // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Стародубовские чтения, 59. – 2011. – С. 98-102.
8. Антоненко І. В. Надводне житло України і вектор формування модульного дизайну / І. В. Антоненко // Priority directions of science development. Scientific Publishing Center" Sci-conf. com. Ua. – 2020. – P. 340-344.
9. Хлюпін О. А. Особливості формування модульної забудови на воді / О. А. Хлюпін, Г. В. Кравчук // Проблеми розвитку міського середовища. Вип.1 (20). – 2018. – С. 204-210.



### **References**

1. Lisenko, V. A., Posternak, S. O., Posternak, I. M., Urazmanova, N. F., Posternak, O. O. (2006). Suchasni budynky ta sporudy z lehkykh metalevykh konstruktsiy [Modern houses and buildings made of light metal structures]. *Sovremennyye stroitel'nye konstruktsyy yz metalla y drevesyny. Sbornyk SSKMD*, 10-19, 120-124.
2. Saaty, T., Kerns, K. (1991). Analytycheskoe planirovanye. Orhanyzatsyya system [Analytical planning. Organization of systems]. Moscow: Radyo y svyaz, 224.
3. Saaty, T. (1993). Prynyatyte reshenyy. Metod analiza yerarkhyi [Making decisions. Hierarchy analysis method]. Moscow: Radyo y svyaz'.
4. Krot, O.P. (2017). Obgruntuvannya vyboru optymal'noho sposobu zneshkodzhennya tverdykh pobutovykh vidkhodiv u mistakh. [Rationale for choosing the optimal method of solid waste disposal in cities]. *Chetvertyu mizhnarodnyy Konhres «Zakhyst navkolyshn'oho seredovyscha. Zbalansovane pryrodokorystuvannya»*. 20-21 kvitnya 2017 r, L'viv, 65–66.
5. Avdyeyeva, M.S., Kaplina, A.B. (2015). Osoblyvosti formuvannya zhytla dlya vymushenykh pereselentsiv zony ATO [Features of housing formation for IDPs in the ATO zone]. *Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannya. nauk.-tekhn. Kyiv, Nats. un-t bud-va i arkhitekt. KNUBA*, 38, 187-194.
6. Safronova, O. O., Bedzir, M. S. (2015). Suchasni tendentsiyi v orhanizatsiyi prostoru budynkiv-internativ dlya lyudey pokhyloho viku [Modern trends in the organization of the space of nursing homes for the elderly]. *Visnyk Kyyivs'koho natsional'noho universytetu tekhnolohiy ta dyzaynu. Seriya: Tekhnichni nauky*, 4, 231-236.
7. D'yachenko, O. S. (2011). Ob'yemno-modul'ne budivnytstvo dostupnoho zhytla y hoteliv v Ukrayini [Volumetric and modular construction of affordable housing and hotels in Ukraine]. *Stroytel'stvo. Materyalovedenye. Mashynostroenye. Seryya: Starodubovskyye chtenyia*, 59, 98-102.
8. Antonenko, I. V. (2020). Nadvodne zhytlo Ukrayiny i vektor formuvannya modul'noho dyzaynu [Surface housing of Ukraine and the vector of modular design formation]. *Priority directions of science development. Scientific Publishing Center". Sci-conf. com. Ua*, 340-344.
9. Khlyupin, O.A., Kravchuk, H. V. (2018). Osoblyvosti formuvannya modul'noyi zabudovy na vodi [Features of formation of modular building on water]. *Problemy rozvytku mis'koho seredovyscha*, (20), 204-210.

### **ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ МОДУЛЬНЫХ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗА**

***В. М. Желых, Ю. В. Фурдас, С. П. Шаповал, М. Р. Ребман, А. К. Лисковщенко***

***Аннотация.*** В настоящее время модульное строительство приобретает популярность в обустройстве производственных помещений.

*Цель исследования - теоретическое обоснование выбора оптимальной толщины тепловой изоляции для наружной защиты модульных зданий с учетом критериев оценки, основанный на методе анализа иерархий.*

*В статье отражены возможности применения домов модульного типа для жилых и общественных нужд. Учитывая особенности применения теплоизоляционных материалов, такие сооружения возводятся за короткий период времени в связи с использованием готовых модулей.*

*Также предложено использование многокритериального анализа для сравнения различных толщин тепловой изоляции модульного дома.*

*Полученные результаты представлены в виде лепестковых диаграмм и диаграмм глобальных приоритетов, что позволило сделать глубокую оценку несколько толщин тепловой изоляции. При проведении теоретических исследований следует отметить, что для выбора тепловой изоляции одновременно учитывалась важность каждого из критериев.*

*Была проведена экспертная оценка для определения толщины тепловой изоляции, которая может быть использована для легких сборных конструкций модульных домов. В результате проведенных исследований было установлено, что наиболее подходящим теплоизоляционным материалом является полиуретан.*

**Ключевые слова:** *модульный дом, многокритериальный анализ, тепловая изоляция, лепестковая диаграмма, диаграмма глобальных приоритетов*

## **SELECTION OF OPTIMAL THICKNESS OF THERMAL INSULATION OF MODULAR BUILDINGS ON THE BASIS OF MULTICRITERIAL ANALYSIS**

*V. Zhelykh, Yu. Furdas, S. Shapoval, M. Rebman, A. Liskovshchenko*

**Abstract.** *Today modular construction is gaining popularity in the arrangement of production facilities.*

*The purpose of the research is the theoretical substantiation of the choice of the optimal thickness of thermal insulation for external protections of modular buildings taking into account the evaluation criteria based on the method of hierarchy analysis.*

*The article reflects the possibility of using modular buildings for residential and public needs. Given the peculiarities of the use of thermal insulation materials, such structures are erected in a short period of time due to the use of ready-made modules.*

*It is also proposed to use multicriteria analysis to compare different thicknesses of thermal insulation of a modular building.*

*The obtained results are presented in the form of petal diagrams and diagrams of global priorities, which made it possible to make an in-depth assessment of several thicknesses of thermal insulation. When conducting theoretical research, it should be noted that the importance of each of the criteria was taken into account for the selection of thermal insulation.*

*An expert assessment was performed to determine the thickness of thermal insulation, which can be used for lightweight prefabricated structures of modular buildings. As a result of research, it was found that the most suitable thermal insulation material is polyurethane.*

**Key words:** *modular house, multicriteria analysis, thermal insulation, petal diagram, diagram of global priorities*