

ВПЛИВ ЩІЛЬНОСТІ ТА ВОЛОГОСТІ СОЛОМ'ЯНОГО БЛОКУ НА ЙОГО ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЯК БУДІВЕЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В даній роботі виконано аналітичний огляд сучасного стану використання солом'яних блоків як будівельного матеріалу в зарубіжних країнах та проведено натурний експеримент. Для натурального матеріалу соломи, який може бути не тільки ефективним утеплювачем, а й несучим та самонесучим елементом огорожуючих конструкцій при використанні її у вигляді тюків у будівництві, проаналізовано залежність між фізичними характеристиками теплопровідності та щільності з урахуванням різної вологості. Виявлено ступінь взаємозв'язку фізико – механічних характеристик через коефіцієнт кореляції та детермінації.

Ключові слова: солом'яні тюки, теплопровідність, щільність, вологість.

Abstract

In this paper an analytical review of the current state of the use of straw blocks as a building material in foreign countries is carried out and a full-scale experiment was conducted. For the natural material of straw, which may be not only an effective heater, but also a bearing and self-supporting element of the enclosing structures when using it in the form of bales in the construction, the dependence between the physical characteristics of the thermal conductivity and density, taking into account different humidity, is analyzed. The degree of correlation between physical and mechanical characteristics is revealed due to the correlation coefficient and the determinant - mination coefficient.

Keywords: straw bales, thermal conductivity, density, humidity.

Вступ

Одним з основних завдань сучасного будівництва є забезпечення високого рівня екологічності будівель. Оскільки сьогодні світ зазнає втрати природних ресурсів, стало доцільним використання солом'яних будівельних матеріалів [13]. Солома є 100% екологічно чистим матеріалом, що анонсується як ключова перевага даної технології. Солом'яні блоки перевершують за своїми теплофізичними характеристиками всі відомі матеріали, що дозволяє підтримувати в будинку оптимальний мікроклімат.

Збір, систематизація та аналіз стану питання за результатами огляду літературних джерел.

У більшій частині доступної літератури [1-13] можна знайти два різні значення теплопровідності солом'яних тюків.

Перше показує теплопровідність, коли волокна соломи перпендикулярні тепловому потоку. Друге дає вимірюване значення, коли волокна паралельні тепловому потоку.

Даний розділ зосереджується на цьому конкретному аспекті. Слід зазначити, що ця відмінність була встановлена McCabe [1] в одній з перших добре відомих робіт, що стосуються теплопровідності солом'яного блоку.

У цій роботі McCabe показав, на основі вимірювань, зроблених за допомогою пристрою, схожого на гарячу пластину, що теплопровідність тюків соломи становить 0,048 Вт/мК, коли тепловий потік перпендикулярний до волокон і 0,061 Вт/мК при паралельному до них.

Після публікації цієї роботи були проведені численні аналогічні експерименти, виконані Andersen [2], так і Shea [3]. Вони вивчали дві серії зразків, одна з щільністю 75 кг/м³, інша з щільністю 90 кг/м³.

Теплопровідність першої серії зразків була 0,052 Вт/мК, при вимірюваннях перпендикулярно до волокон і 0,056 Вт/мК при паралельному вимірюванні до волокон. Теплова провідність, отримана для другого набору зразків, була трохи більшою: 0,056 Вт/мК при перпендикулярному і 0,06 Вт/мК при паралельному розташуванні волокон. Ці значення вказали на перший результат, що стосується різниці теплопровідності з вивченими параметрами. Коли щільність 75 кг/м³, а досліджуваний напрямок від перпендикулярного до паралельного, вимірюється збільшення теплопровідності на 0,004 Вт/мК [2]; для

вимірювання з щільністю 90 кг/м³, що розвивається від перпендикуляра до паралелі, спостерігається однакова величини коефіцієнту теплопровідності [2,3].

Shea [3] вивчав теплопровідність з витратоміром на різних зразках соломи стиснутих до товщини 25 см, щоб досягти великого діапазону щільностей. У цьому конкретному експерименті [3] солом'яні волокна в зразках не мали певної орієнтації в розташуванні. Виміряні теплопровідності коливаються від 0,059 Вт/мК для щільності 63 кг/м³, до 0,064 Вт/мК при щільності 123 кг/м³. Shea запропонував еталонну величину 0.065 Вт/мК.

FASBA[4], німецька асоціація зі спорудження будівель з солом'яних тюків, веда численні дослідження на солом'яних тюках і в 2010 році отримала теплопровідність, близько 0,045 Вт/мК, коли тепловий потік був перпендикулярним до волокон [4].

Багато інших даних про теплопровідність можна знайти в літературі. Серед них: значення, затверджене німецьким центром компетенції для будівництва (DIB) [5], часто використовується як довідник у багатьох країнах. Теплопровідність тут вважається 0,052 Вт/мК, коли тепловий потік перпендикулярний до волокна соломи і 0,080 Вт/мК, коли він паралельний. Хоча надійні вимірювання, як правило, отримуються з використанням методів стаціонарного стану, таких як метод "охоронної гарячої пластини", Dubois [6] підкреслив, що більша частина даних походить від перехідних методів, або від стійких методів з різною товщиною тюків. Douzane [7] подає результати теплової провідності, вимірюваної на тюках соломи, отриманих методом стаціонарного режиму. Охолоджена гаряча плита-апарат була використана для оцінки теплопровідності солом'яних тюків. Оскільки апарат був комерційним пристроєм, зразки були підготовлені шляхом підрізання солом'яних тюків до низьких товщин (10 см). Було вивчено два види проб щодо орієнтації волокон. Середні значення теплопровідності при 10 ° С були відповідно 0,072 Вт/мК і 0,051 Вт/мК при паралельній та перпендикулярній орієнтації волокон соломи. Conti [8] розробив систему вимірювання теплопровідності для солом'яних тюків, які також базувалися на стаціонарному режимі. Розроблена нагрівна коробка складається головним чином з вимірювальної камери та нагрівача всередині кліматичної камери. Автори визначили теплопровідність близько 0.066 Вт/мК в випадку, коли тепловий потік вважався паралельним волокнам.

Ефект відносної вологості на провідність соломи визнаний багатьма авторами. Згідно з Wei [9], теплопровідність збільшується з вмістом вологи через пористу структуру волокнистих ізоляційних матеріалів. Wei вимірював збільшення теплопровідності рисової соломки, коли вміст вологи змінювався; 0,051 Вт/мК для 10% вологості і 0,0519 Вт/мК для 18% вологості. Ті ж результати були отримані Grelat [10] для тюків соломи. Вимірювання з 0%, 50% та 90% відносної вологості (0%, 15% та 22% вмісту води) показали значне збільшення провідності; від 0,064 Вт/мК при 0% вологості до 0,069 Вт/мК при 22% вологості.

VincasGurskis та RytisSkominas[11] проводили випробування, за результатами яких визначили, що збільшення вологості на 1% збільшує коефіцієнт теплопровідності на 0,0005 ... 0,0011 Вт/мК. А максимальна вологість, задана ними у дослідженні (20%), підвищувала коефіцієнт теплопровідності до 0,01 ... 0,02 Вт/мК, або на 19-42%, в діапазоні щільностей зразків в діапазоні від 50 до 130 кг/м³. Також ними було доведено, що при збільшенні щільності тюка збільшується його теплопровідність.

Palumbo [12] досліджував теплопровідність плити, що складалась з ячмінної соломки (81%) та кукурудзяного крохмалю (19%). Спостереження також призводять до значного лінійного збільшення теплопровідності при відносній вологості і коливається від 10% до 90%. Таблиця 1.1 дає синтетичний вигляд цих результатів. На рисунках 1 і 2 показано розподіл значення теплопровідності, виявлені в літературі, відповідно, з густиною тюків і напрямом теплового потоку.

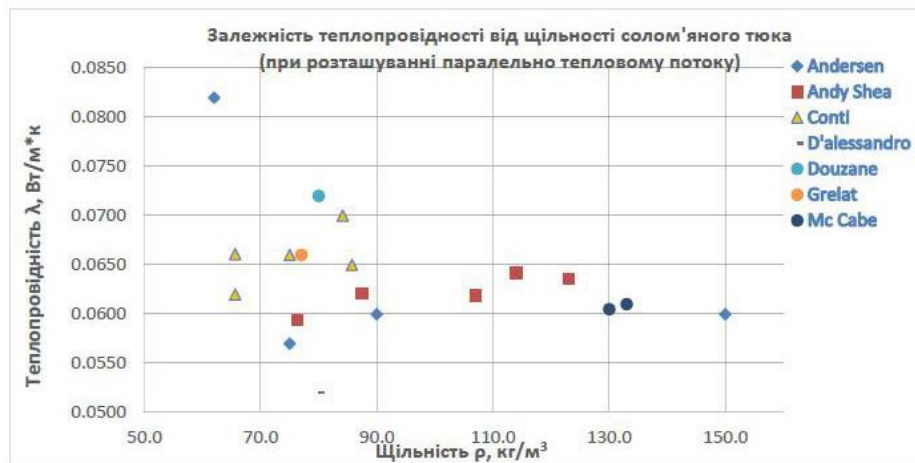


Рисунок 1 – Зв'язок між щільністю солом'яного блоку та його теплопровідністю за дослідними даними [1,2,3,7,8,10,13] при розташуванні зразків паралельно тепловому потоку

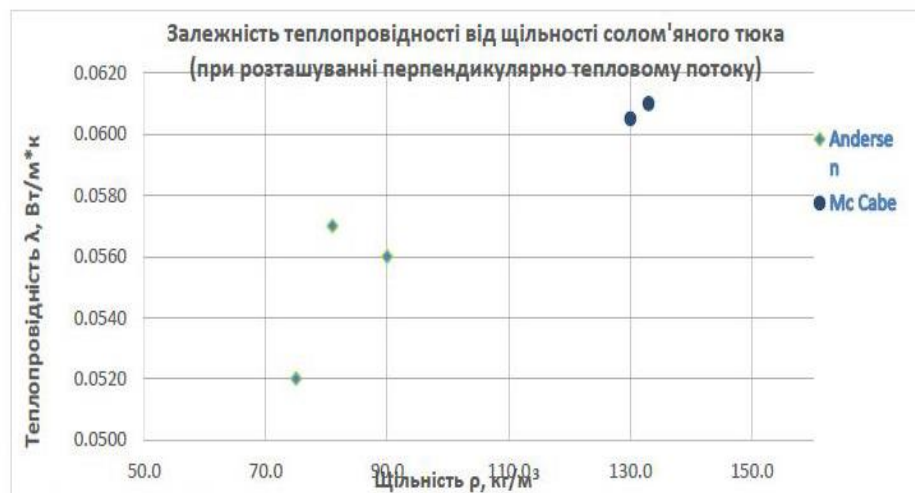


Рисунок 2 – Зв'язок між щільністю солом'яного блоку та його теплопровідністю за дослідними даними [1, 2] при розташуванні зразків перпендикулярно до теплового потоку

Експериментальне дослідження зв'язку теплопровідності солом'яних блоків

Експериментальне дослідження зв'язку теплопровідності солом'яних блоків та їх щільності та вологості починається з виготовлення самих блоків. Для цього було сконструйовано та виготовлено установку для їх пресування.

Експериментальні дослідження проведено з соломи пшениці врожаю 2018 року.

Потрібну кількість соломи, яку завантажували в короб, визначалась за формулою щільності.

Процес пресування зразків проведено наступним чином:

1. На спеціальні дротяні шпичі було нанизано поліпропіленову мотузку та протягнуто через спеціальні прорізи в тілі коробу знизу.

2. В короб завантажували потрібну кількість соломи, після чого пресували пресувальним штоком за допомогою домкрату, що передавав зусилля через опорну частину консольної балки (див. рис. 3б)

3. Процес ущільнення вели до тих пір, поки опорна плита плунжера не досягала потрібної відмітки на тілі корпусу (див. рис. 3а). При досягненні цієї позначки припиняли пресування, блок обв'язували та виймали з установки (див. рис. 3в).

4. Для створення додаткової жорсткості, кожний тюк після виймання з установки додатково обв'язували мотузкою в перпендикулярному до основної обв'язки напрямку. На цьому виготовлення блоку було завершено.



Риснок 3 - Процес пресування солом'яних тюків а) відмітка потрібної висоти тюка на корпусі установки; б) пресування з передачею зусилля через домкрат та опорну балку; в) виймання готового зразка тюка після завершення пресування

Перед виготовленням основних серій зразків, виготовлено блоки різної висоти, від 5.5 - 20 см. Експериментальним шляхом виявлено, що найдоцільнішими для проведення дослідів є блоки висотою 5.5 см, в діапазоні отриманих щільностей 60-160 кг/м³ для кожного значення пресували серію зразків, кількістю три штуки, з різною вологістю.

Додаткова вологість надавалась соломі за допомогою розпилювача води та контролю її вмісту за допомогою вологоміра ТК 100.

Наступним кроком дослідів було нагрівання установки для визначення теплопровідності теплоізоляційних матеріалів та доведення температури верхньої та нижньої частини пластини до сталого значення, причому для визначення температури використовували три канали збору даних: температурні датчики DS18B20, термометри ТРМ10 та хромель-копелеві термометри. Дослід повторювали з серіями 2 і 3 для кожної щільності блоків.

Процес стабілізації температури в заданих точках T1, T2, T3 (рис 4) тривав від 5 до 6 годин.

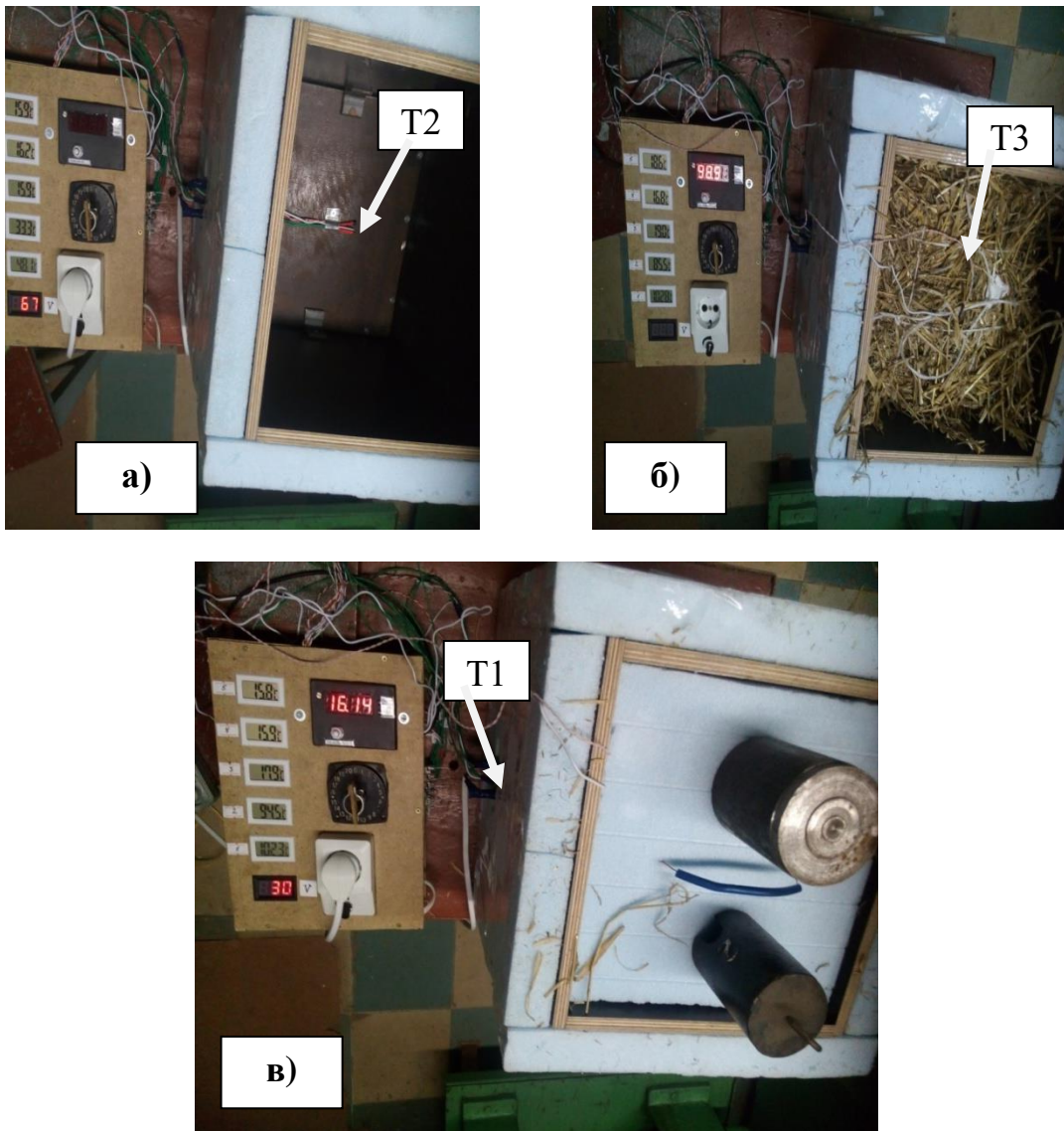


Рисунок 4 - Процес нагрівання солом'яного блоку та вимірювання температур а) початок прогріву установки; б) нагрівальна установка з поміщенням в неї зразком; в) витримка зразка до стабілізації температури

Коефіцієнт теплопровідності обчислювали за формулою Фур'є:

$$Q = \frac{\Delta t \cdot S}{\delta \cdot \lambda}, (1)$$

де Q – тепловий потік, Вт;

$\Delta t = t_1 - t_2$ – різниця температур в характерних точках після її стабілізації, °С;

S – площа поверхні теплообміну (площа поверхні пластини), м²;

δ – товщина елемента, м;

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт / (м·°С).

Для визначення теплового потоку який проходив через верхню пластину нагрівного елемента, яка виконана зі сталі Ст3 використано усереднений коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{\text{Ст3}} = 47 \text{ (Вт/м} \cdot \text{К)}$.

Знаючи величину теплового потоку, що проходив через верхню пластину нагрівного елемента визначали коефіцієнт теплопровідності солом'яного тюка за формулою (1). Результати обчислених значень коефіцієнту теплопровідності подано у табл. 1.

Таблиця 1 – Таблиця основних параметрів досліджу

Критерії	Густина зразка ρ , кг/м ³	Товщина зразка солом δ , м	Довжина випробувальної камери L , м	Ширина випробувальної камери B , м	Товщина металеві пластини δ_1 , м	Площа металеві пластини S , см ²	Температура гарячої сторони металеві пластини T_1 , °C	Температура гарячої сторони металеві пластини T_2 , °C	Температура холодні сторони зразка солом T_3 , °C	Теплопровідність λ , Вт/м°C	Вологість зразку W , %
Серія 1 (без зволоження) при значенні вологості 9.4%	60	0,05	0,25	0,25	0,012	0,0625	110,00	109,97	17,30	0,051	9,20
	80	0,055	0,25	0,25	0,012	0,0625	109,40	109,37	17,25	0,062	9,14
	100	0,054	0,25	0,25	0,012	0,0625	107,50	107,46	16,47	0,070	9,28
	120	0,052	0,25	0,25	0,012	0,0625	108,46	108,41	16,80	0,075	9,40
	140	0,053	0,25	0,25	0,012	0,0625	108,35	108,31	16,53	0,077	9,37
	160	0,052	0,25	0,25	0,012	0,0625	109,99	109,95	17,30	0,080	9,34
Серія 2 (зволоження до 20%)	60	0,05	0,25	0,25	0,012	0,0625	110,00	109,97	17,30	0,060	19,70
	80	0,055	0,25	0,25	0,012	0,0625	107,00	106,97	17,23	0,065	19,62
	100	0,054	0,25	0,25	0,012	0,0625	107,00	106,97	17,00	0,070	19,57
	120	0,052	0,25	0,25	0,012	0,0625	100,04	100,00	16,00	0,075	19,68
	140	0,053	0,25	0,25	0,012	0,0625	105,00	104,96	16,00	0,078	19,92
	160	0,052	0,25	0,25	0,012	0,0625	106,50	106,46	16,00	0,080	19,97
Серія 3 (зволоження до 30%)	60	0,05	0,25	0,25	0,012	0,0625	106,50	106,45	16,50	0,085	29,67
	80	0,055	0,25	0,25	0,012	0,0625	107,40	107,36	16,50	0,087	29,78
	100	0,054	0,25	0,25	0,012	0,0625	105,56	105,52	17,20	0,092	29,94
	120	0,052	0,25	0,25	0,012	0,0625	106,56	106,51	16,50	0,102	29,81
	140	0,053	0,25	0,25	0,012	0,0625	107,53	107,47	17,00	0,110	29,74
	160	0,052	0,25	0,25	0,012	0,0625	100,06	100,00	17,00	0,115	29,87

Аналіз результатів експериментальних досліджень для солом'яних тюків різних серій

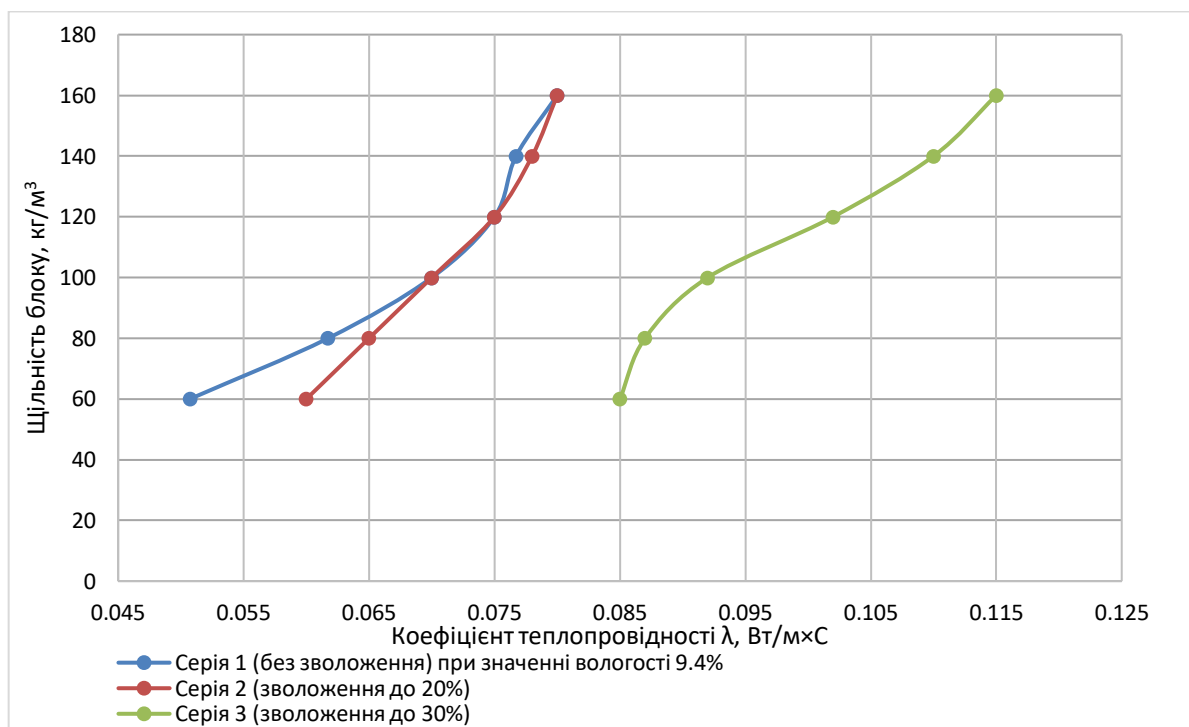


Рисунок 5 -Графік залежності теплопровідності солом'яного блоку від щільності та вологості

Аналіз отриманих даних (рис. 5) свідчить про однозначний вплив щільності та вологості на величину коефіцієнта теплопровідності солом'яного тюка. При цьому приріст щільності несуттєво впливає на

значення коефіцієнту теплопровідності λ . Вміст води, що є в соломі (серія 2 та серія 3 зразків) чинить більший вплив на зміну коефіцієнта теплопровідності соломи. Так, при додатковому зволоженні зразків до 30% (серія 3) виявлено, що максимальне значення коефіцієнту теплопровідності соломи буде 0,115, що на 30 % більше від значення коефіцієнту в серії 1 (із усередненим значенням вологості 9,4%).

Це можна пояснити тим, що теплопровідність води значно більше від теплопровідності соломи.

Чисельно-аналітичні дослідження взаємозв'язку щільності та вологості на теплопровідність солом'яного тюка

Графічну інтерпретацію отриманих експериментальних даних при порівнянні з даними інших науковців наведена на рис. 6

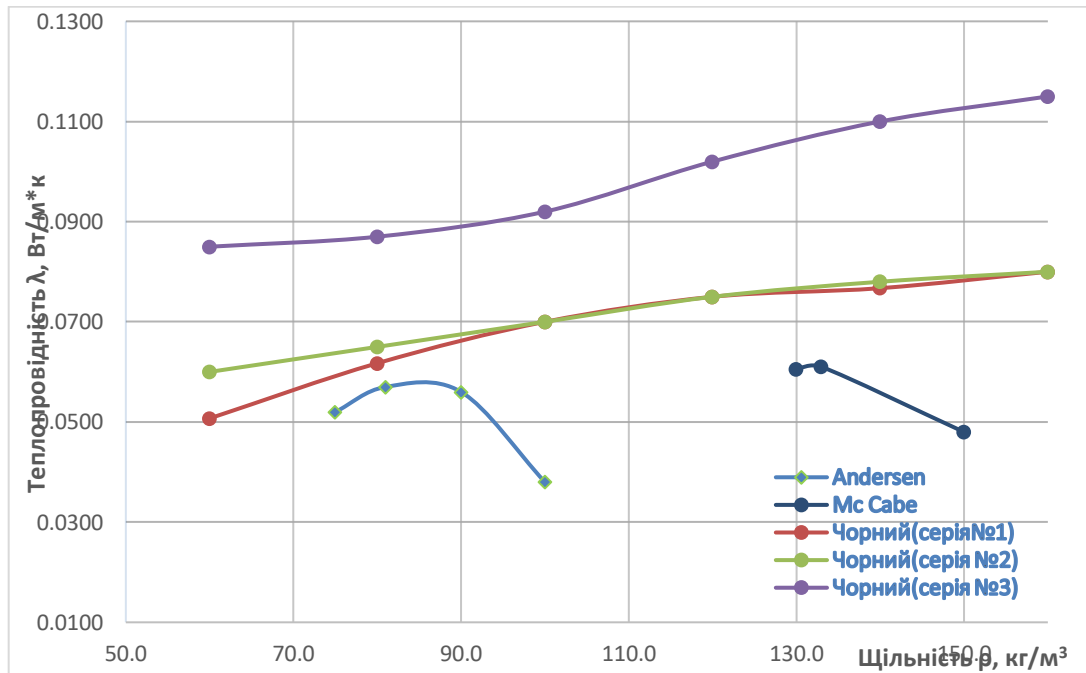


Рисунок 6– Зв'язок між щільністю солом'яного блоку та його теплопровідністю за дослідними даними та даними автора при розташуванні зразків перпендикулярно до теплового потоку

Статистичний аналіз даних, наведених на рис. 6 виконано за допомогою програми Excel та представлено у табл. 2

Таблиця 2 – Статистичний аналіз даних за рис.6 згідно [13]

Автор	Коефіцієнт кореляції, r	Коефіцієнт детермінації, R
Andersen [2]	-0.706	0.498
McCabe [1]	-0.985	0.970
Чорний (серія №1)	0.955	0.911
Чорний (серія №2)	0.988	0.977
Чорний (серія №2)	0.984	0.969

Аналіз даних табл. 3.4 свідчить про неоднозначність кореляційного зв'язку між досліджуваними характеристиками. Так, за даними авторів [1, 2] присутній зворотній зв'язок між щільністю та теплопровідністю (знак «-» коефіцієнта кореляції). Дані, отримані автором, мають високий коефіцієнт кореляції, що свідчить про однозначний домінуючий вплив щільності солом'яного тюка на її коефіцієнт теплопровідності.

Коефіцієнт кореляції даних для вибірок авторів [1, 2] свідчить, що щільність зумовлює теплопровідність в діапазоні від 23,2% до 97%, що також є неоднозначним показником для прогнозування фізико-механічних характеристик природного утеплювача соломи у використанні його в будівництві

Висновки

1. Розглядаючи напрямки теплових потоків, дослідження виконані різними науковцями [1-13] показують на нелінійний взаємозв'язок щільності, вмісту вологості, напрямку волокон на значення коефіцієнту теплопровідності. Різні початкові умовами проведення дослідів, способи визначення теплопровідності, різні габарити тюків, різні партії дослідних зразків, впливають на достовірність кореляційного зв'язку. Теплопровідність солом'яного тюку також обумовлена чинниками, серед яких можна назвати тип матеріалу (культури злакових), орієнтація волокон, тощо.

2. Дані, отримані в результаті дослідів, мають високий коефіцієнт кореляції, що свідчить про однозначний домінуючий вплив щільності солом'яного тюка на її коефіцієнт теплопровідності.

3. Виявлено однозначний вплив вологості на величину коефіцієнта теплопровідності солом'яного тюка. Вміст води, що є в соломі чинить більший вплив на зміну коефіцієнта теплопровідності соломи, ніж щільність. Це можна пояснити тим, що теплопровідність води значно більше від теплопровідності соломи. Так, при додатковому зволоженні зразків до 30% виявлено, що максимальне значення коефіцієнту теплопровідності соломи буде на 30 % більше від значення коефіцієнту із усередненим значенням вологості 9,4%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. McCabe, J. Thermal Resistivity of Straw Bales for Construction. Master's Thesis, University of Arizona, Tucson, AZ, USA, 1993.
2. Andersen, B.M.; Munch-Andersen, J. Halmballer og Muslinger som Isoleringmateriale; Report 2001-06-21; Statens Byggeforskningsinstitut: Copenhagen, Denmark, 2001.
3. Shea A., Wall K., Walker P. Evaluation of the thermal performance of an innovative prefabricated natural plant fibre building system. Building Services Engineering Research and Technology. 2013. Vol. 34, No. 4. P. 369-380.
4. Prüfbericht. Wärmeleitfähigkeit nach EN 12667; Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V.: München, Germany, 2010.
5. Deutsches Institut für Bautechnik (DIB). URL: https://www.dibt.de/index_eng.html (Last accessed: 14.05.2018).
6. Dubois, S.; Lebeau, F. Design, Construction and Validation of a Guarded Hot Plate Apparatus for Thermal Conductivity Measurement of High Thickness Crop-Based Specimens. Mater. Struct. 2015, 48, 407-421.
7. Douzane, O.; Promis, G.; Roucoult, J.-M.; Le, A.-D.T.; Langlet, T. Hygrothermal performance of a straw bale building: In situ and laboratory investigations. J. Build. Eng. 2016, 8, 91-98.
8. Conti, L.; Barbari, M.; Monti, M. Steady-State Thermal Properties of Rectangular Straw-Bales (RSB) for Building. Buildings 2016, 6, 44.
9. Wei, K.; Lv, C.; Chen, M.; Zhou, X.; Dai, Z.; Shen, D. Development and performance evaluation of a new thermal insulation material from rice straw using high frequency hot-pressing. Energy Build. 2015, 87, 116-122.
10. Grelat, A. Using Sustainable Materials as Walling for Individual Housing With Wood Structure; Final report; Centre D'expertise du Batiment et des Travaux Public: Saint-Remy-Les-Chevreuse, France, 2004.
11. Vincas Gurskis, Rytis Skominas. Investigation of physical and mechanical properties of straw as a building material, Latvia 2014.
12. Palumbo, M.; Lacasta, A.M.; Holcroft, N.; Shea, A.; Walker, P. Determination of hygrothermal parameters of experimental and commercial bio-based insulation materials. Constr. Build. Mater. 2016, 124, 269-275.
13. F. D'alessandro, F. Bianchi, G. Baldinelli, A. Rotili, S. Schiavoni: Journal of Building Engineering: Italy 2017 - 2-3 p., 26 p.

Чорний Павло Григорович – студент групи 2Б-17мі, факультет будівництва, теплоенергетики та газопостачання, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: 434786100@ukr.net

Співавтор **Бікс Юрій Семенович** – к. т. н., доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Chorniy Pavlo G. – a student of 2B-17mi, Department of Building Heating and Gas Supply, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: 434786100@ukr.net.

Co-author **Biks Yuriy S.** – Ph. D., assistant professor, Department of Construction, Urban Management and Architecture, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.