ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ НАН УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЧЕЙЛИТКО АНДРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ
КОШЛАК ГАННА ВОЛОДИМИРІВНА
НЕДБАЙЛО ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ
БІЛОУС ІННА ЮРІЇВНА

НАУКОВО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ Й ТЕПЛОВОГО ЗАХИСТУ

Запоріжжя 2020

Метою роботи є підвищення рівня ефективності енерговикористання будівель шляхом удосконалення існуючих і розробки нових наукових та управлінських методів оцінювання енергоефективності; урахування взаємозв’язку джерел енергії, теплового захисту та екологічних показників; розробки динамічних моделей теплового стану будівлі як енергетичної ситеми.

Об'єкт дослідження – процеси теплообміну в будівлях, енергоспоживання і енергозбереження та оцінювання ефективності енерговикористання об’єктами громадської сфери в умовах динамічної зміни характеристик середовища.

Предмет дослідження – методи і способи оцінювання показників енергоспоживання та енергетичної ефективності елементів та в цілому громадських будівель із використанням математичних моделей.

Наукова новизна одержаних результатів роботи. У представленій роботі розвинені теоретичні та технологічні основи енергетичної та екологічної ефективності систем теплопостачання, а також теплового захисту будівель на прикладі громадських об’єктів; запропоновано наукові принципи створення технологій виробництва будівельних та теплоізоляційних матеріалів з прогнозованими теплофізичними характеристиками; запропоновані методологічні основи та створені тривимірні нестаціонарні математичні моделі для визначення енергетичних характеристик будівель як енергетичних систем.

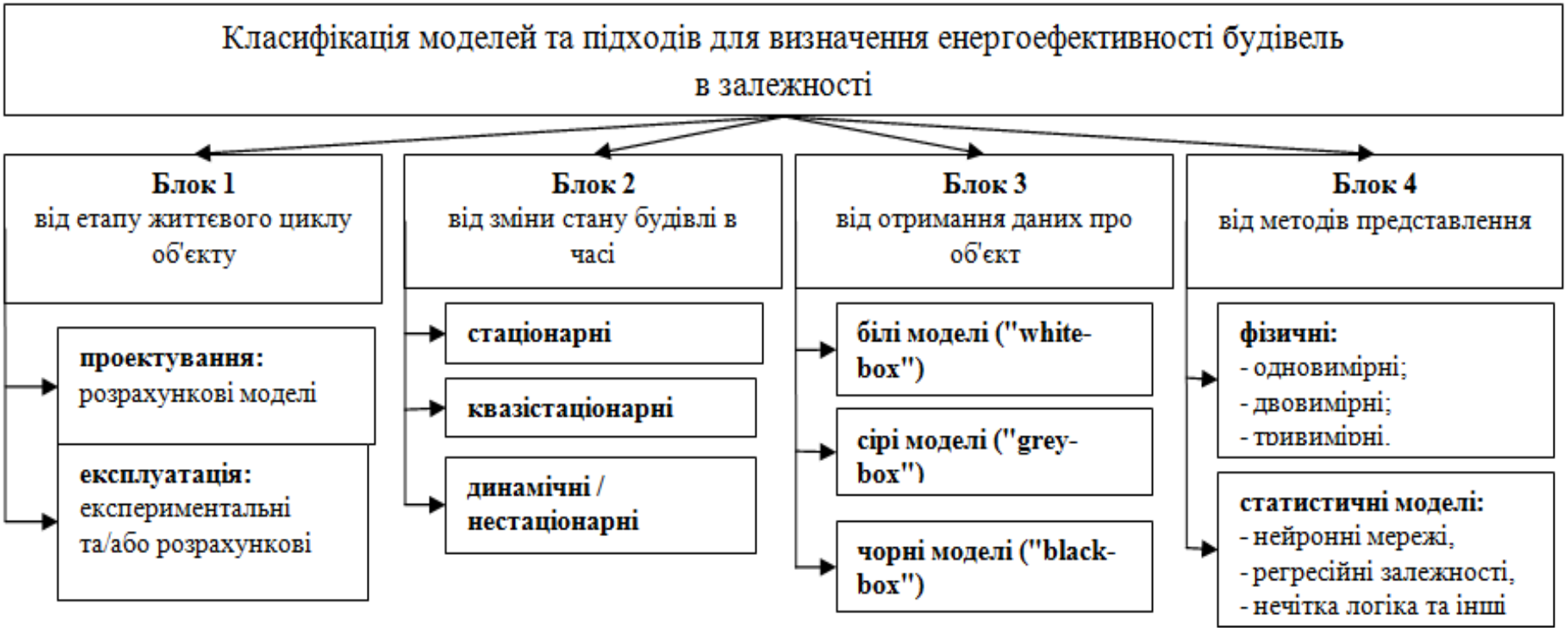
Практичне значення одержаних результатів

- розроблені математичні моделі для аналізу енергетичного стану будівлі дозволяють прогнозувати температурний стан приміщень та/або рівень опалення в приміщеннях з врахуванням динамічних особливостей огороджень та часової зміни погодних та експлуатаційних особливостей. В цілому для громадського сектору будівель України застосування режимів переривчастого опалення протягом опалювального сезону з врахуванням динаміки зміни умов середовища дозволить досягти економії - до 3,6 млн. Гкал.
- запропоновано технологічні процеси для створення пустотної цегли та керамзиту;
- розроблено та запатентовано установку для вимірювання електронної складової ефективного коефіцієнта теплопровідності металевих та електропровідних пористих конструкцій;
- обґрунтовані науково-технічні положення створення енергоефективної будівлі із використанням низки теплотехнічних рішень, серед яких є використання ґрунтових теплообмінників із повітряною тепловою завісою фасадів і даху будинку, а також комбінованої системи теплозабезпечення на основі залучення відновлювальних джерел енергії (теплоти ґрунту, інсоляції тощо);
-розраховані характерні експлуатаційні витрати типових будинків в залежності від джерела -теплопостачання, теплотехнічних параметрів огороджуючи конструкцій та витрати первинної енергії;
тощо

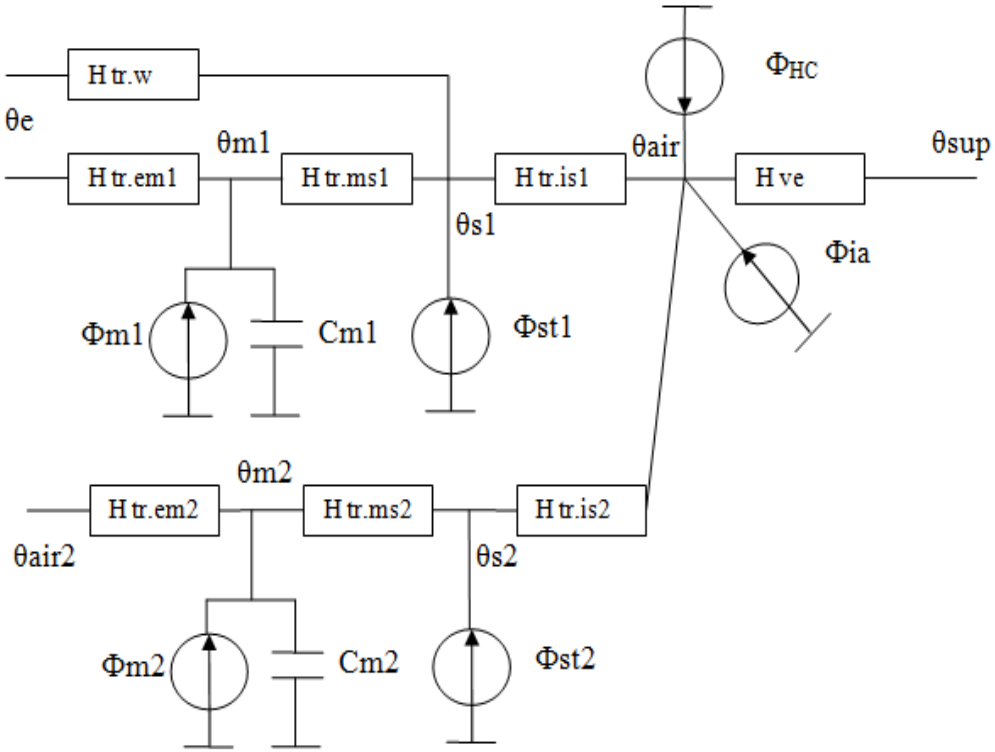
Практичну цінність підтверджено відповідними актами впровадження, наданими Державним підприємством «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (м. Київ); Українським фондом соціальних інвестицій (м. Київ); Міністерством освіти та науки України (м. Київ), Національним технічним університетом України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (м. Київ), Сумським державним університетом (м.Суми), ТОВ Завод енергетичного обладнання «ДАН» (м. Київ), ТОВ «Центр водоочищення» (м. Київ), СВПП «Факел» (м. Сміла), ТОВ «Компанія ВДЕ» (м. Бровари), ТОВ «Досконалий будинок» (м. Чернігів), ВАТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя), ТОВ «Екскавация» (м. Запоріжжя), ТОВ «Тера-Гарант» (м. Запоріжжя), ЗМЗ ім. В.І.Омєльченко АТ «МОТОР СІЧ» (м. Запоріжжя), ПАТ «МК Запоріжсталь» (м. Запоріжжя), Теоретичні та експериментальні результати роботи впроваджені також у навчальному процесі кафедри теплотехніки та енергозбереження КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Використання моделювання при визначенні та підвищенні енергоефективності будівель

В працях іноземних дослідників Ю. Табунщиков, В. Богословський, W. Perera, M. Mijakowski, P. Narowski, L. K. Norford, J.C. Lam, H. C.M. Sam. Українські науковці: Г. Фаренюк, Н. Фіалко, В. Дешко, В. Маляренко, Б. Басок, Б. Давиденко, С. Дубовський, П. Круковський.



Модифікації динамічних сіткових моделей з EN 13790



Особливості:

1. розрахунок з 10 хв. кроком;
2. дозволяє окремо враховувати теплоємність внутрішніх та зовнішніх огороджень;
3. враховує інженерні системи будівлі та їх інерційність;
4. враховує динаміку мінливості кліматичних даних.

Математичні моделі на базі програмного продукту EnergyPlus

Вхідні дані:

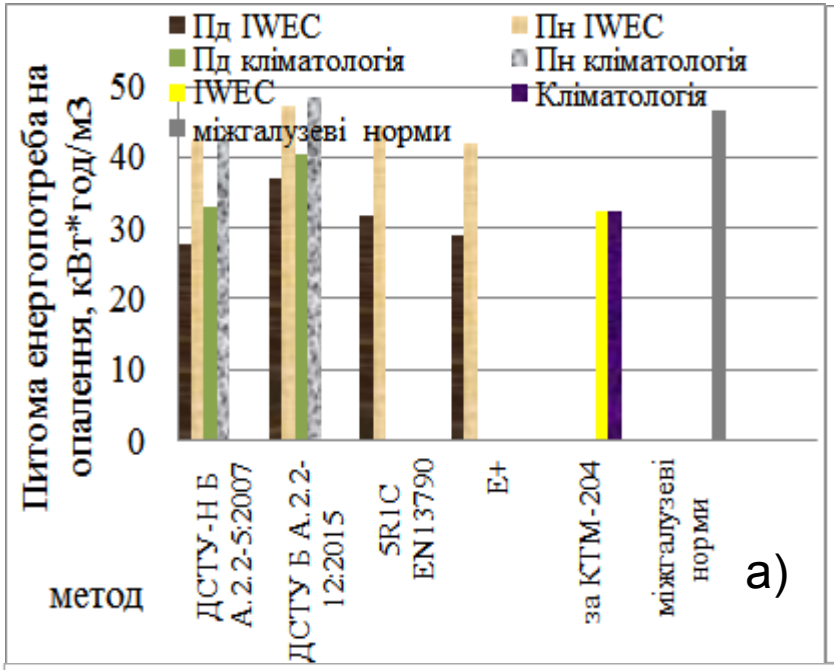
1. геометрія створюється на базі графічних редакторів GoogleSketchUp або Design Builder;
2. задаються: 1) теплофізичні властивості багатошарового огородження, 2) віконні конструкції з оптичними особливостями скління, 3) інженерні системи, 4) графік роботи та температурні режими роботи та інше;
3. використовує погодинні кліматичні дані типового року міжнародного погодного файлу IWEC.

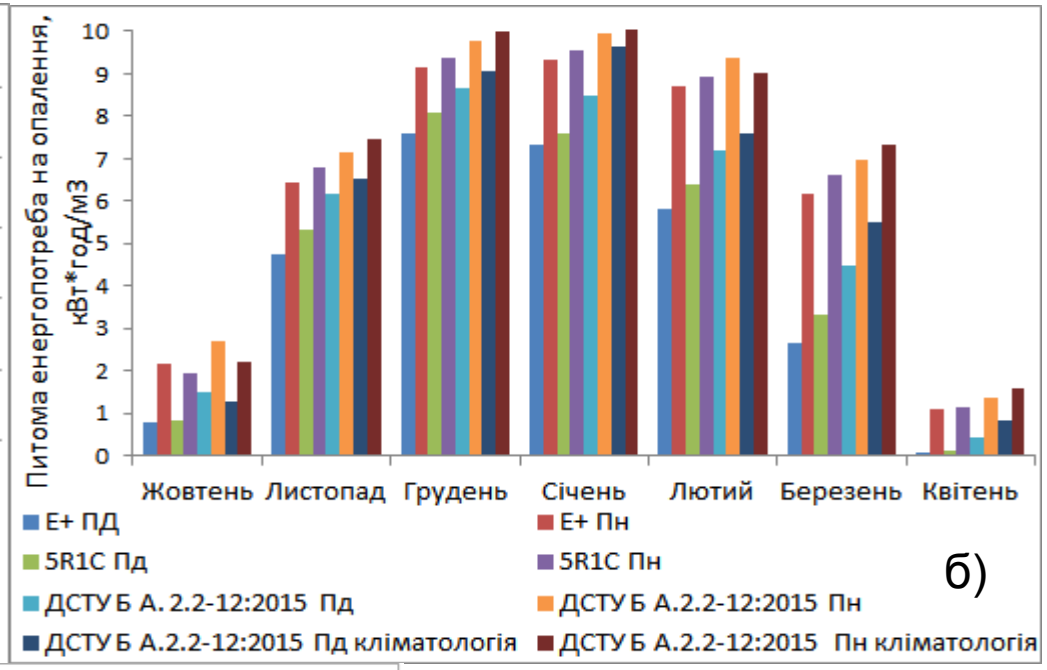
Результати:

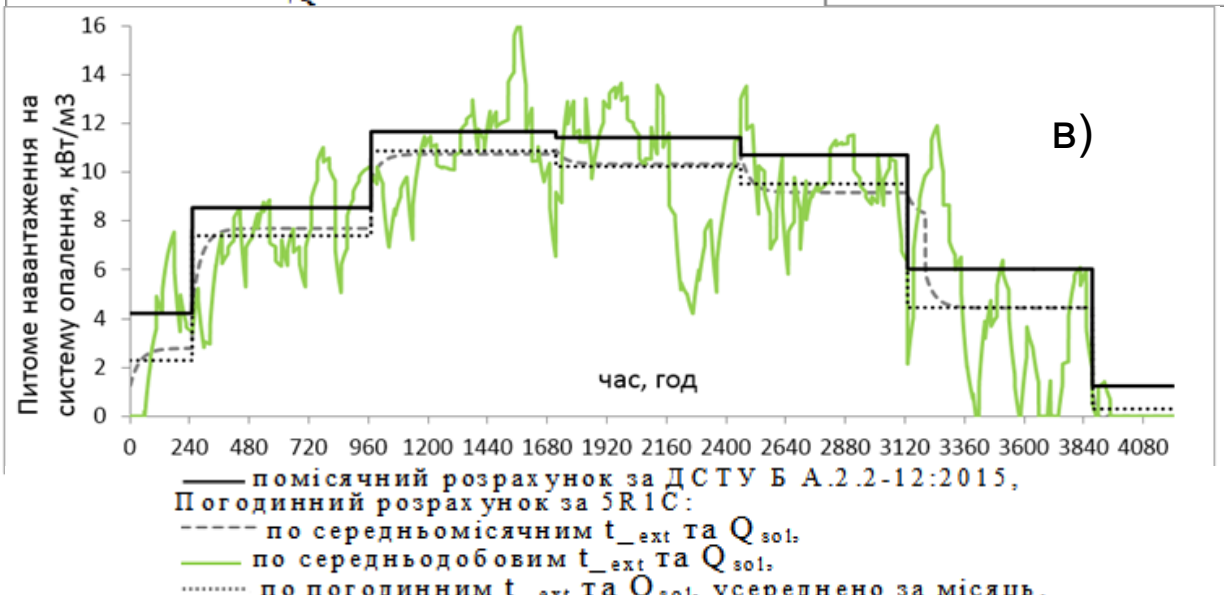
дозволяє отримувати:
1. температуру повітря,
2. радіаційну температуру поверхонь,
3. навантаження на систему опалення/охолодження та вентиляцію (HVAC-систему).

Застосування математичних моделей та баз кліматології для визначення енергопотреби будівлі

1) м. Київ



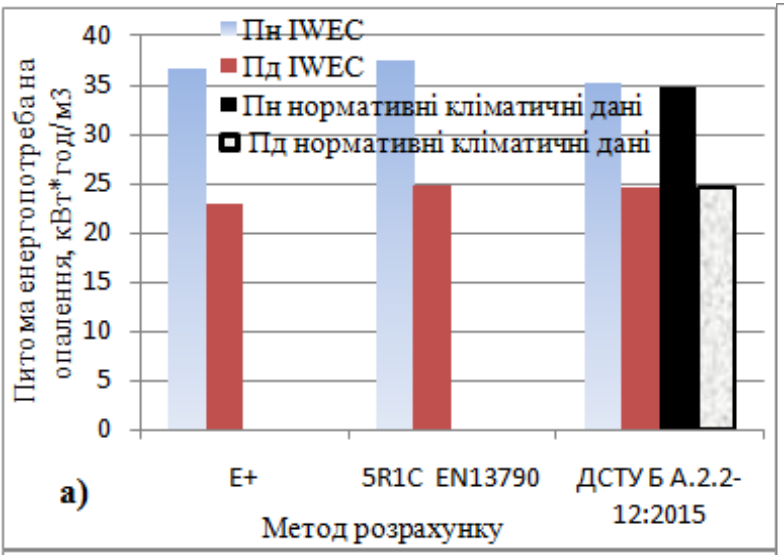


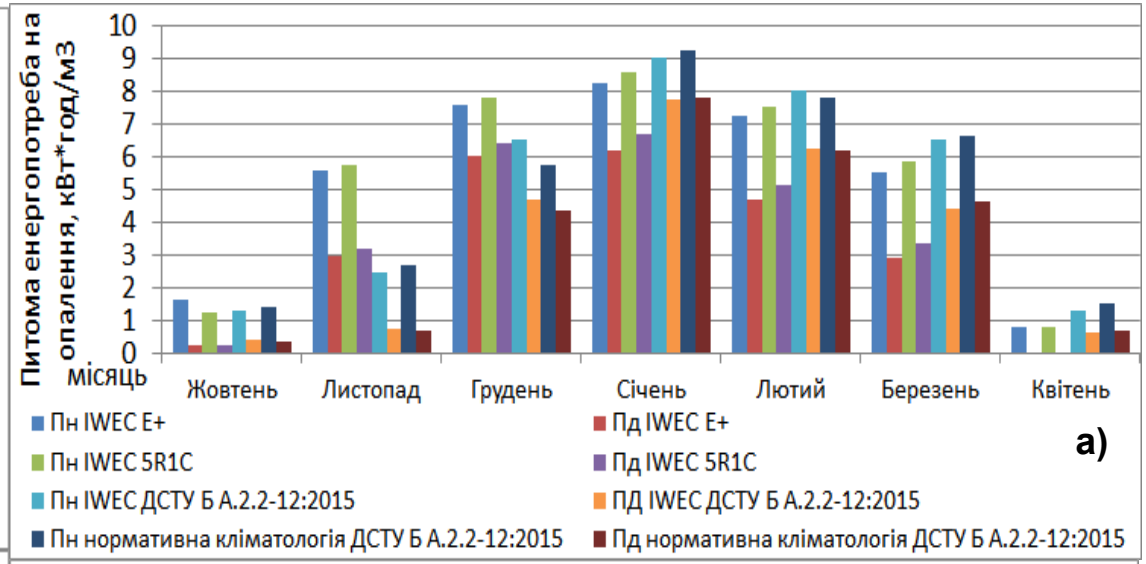


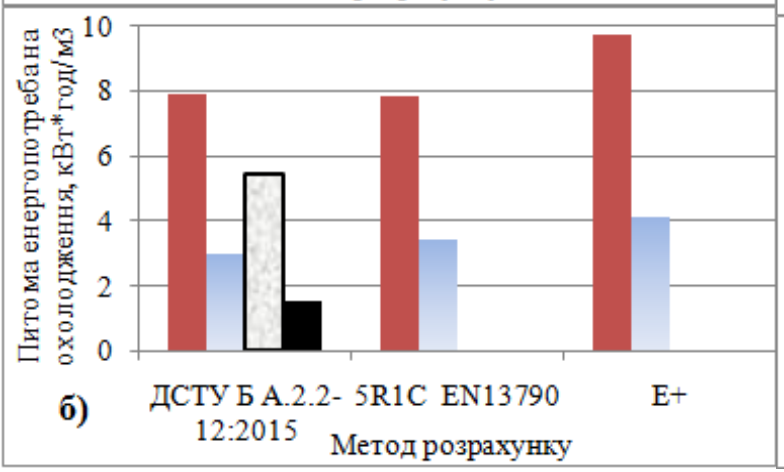
Питома енергопотреба на опалення в річному (а), помісячному (б) та погодинному (в) розрізі

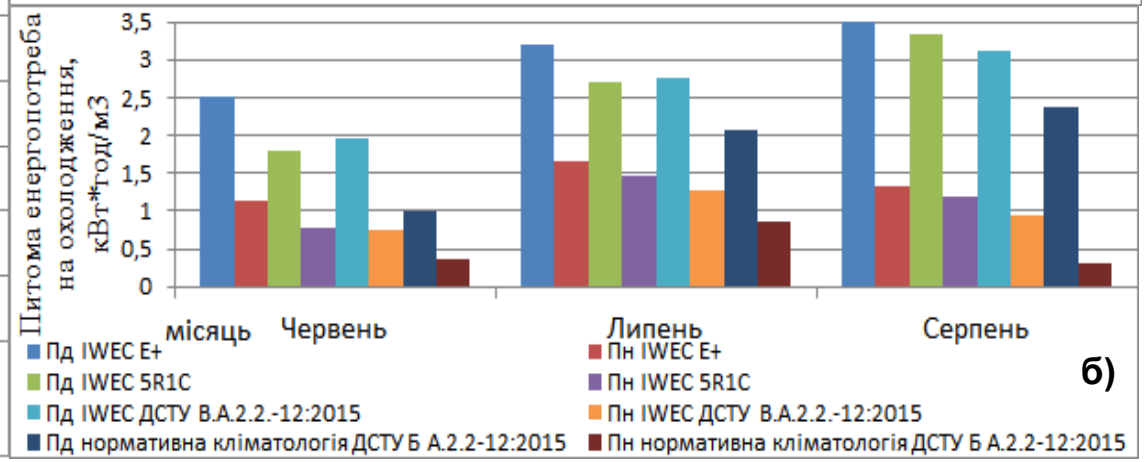
Застосування математичних моделей та баз кліматології для визначення енергопотреби будівлі

2) м. Одеса



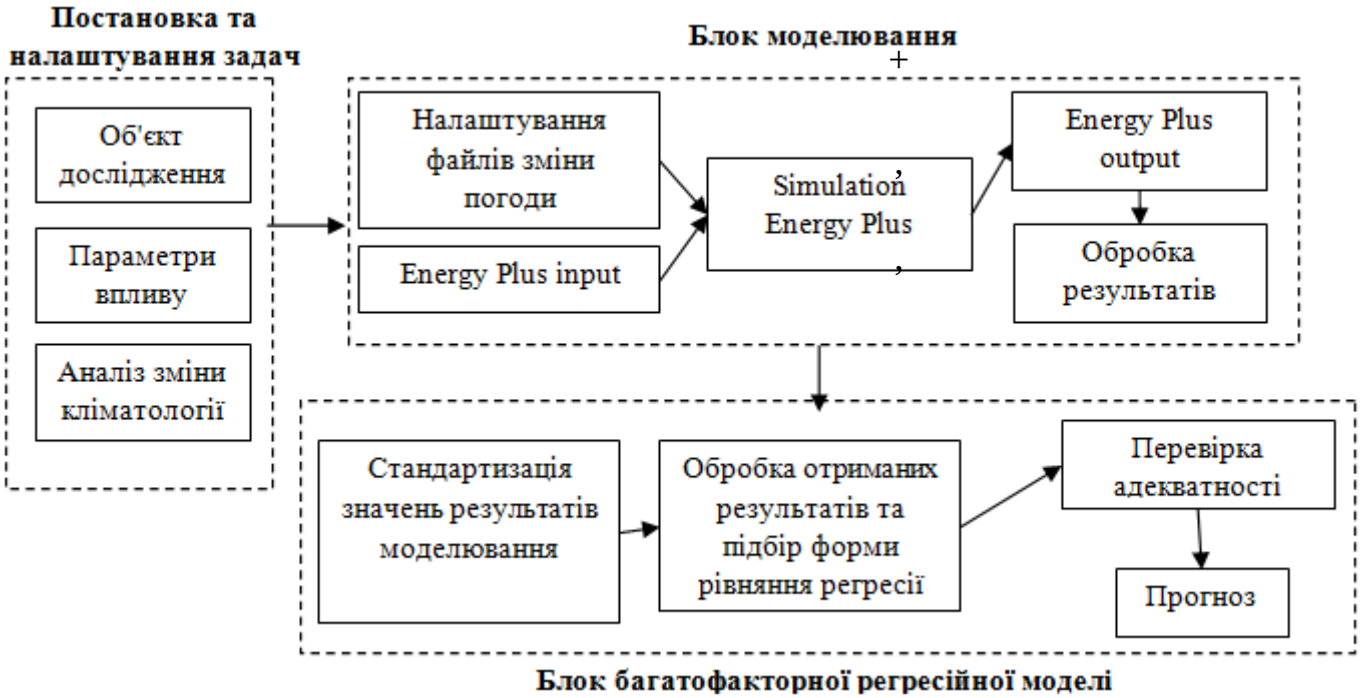






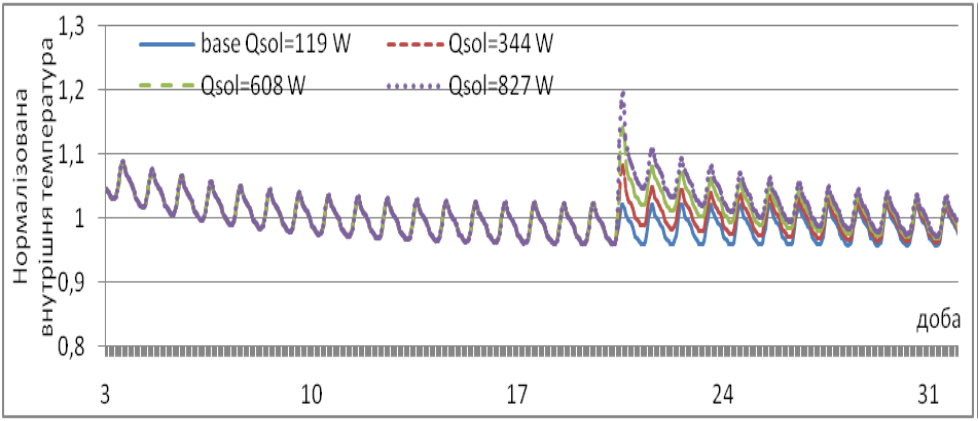
Питома енергопотреба будівлі на опалення (а) та охолодження (б)

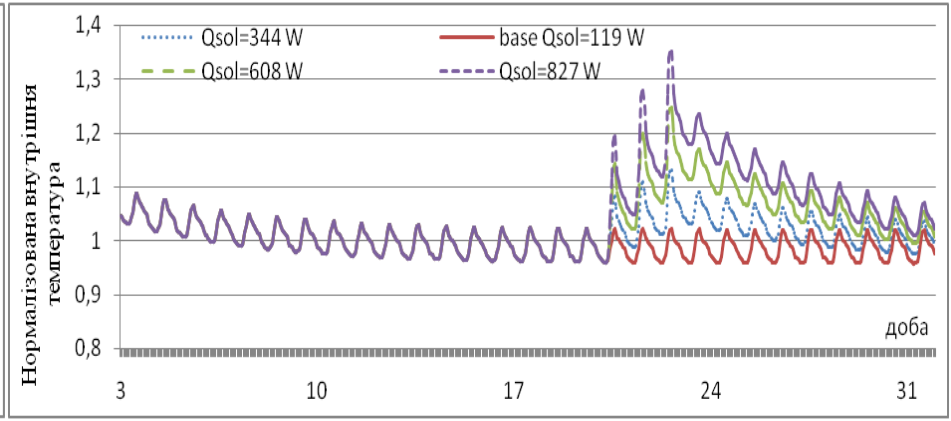
Багатофакторні регресійні залежності для визначення часових змін енергетичних характеристик будівель



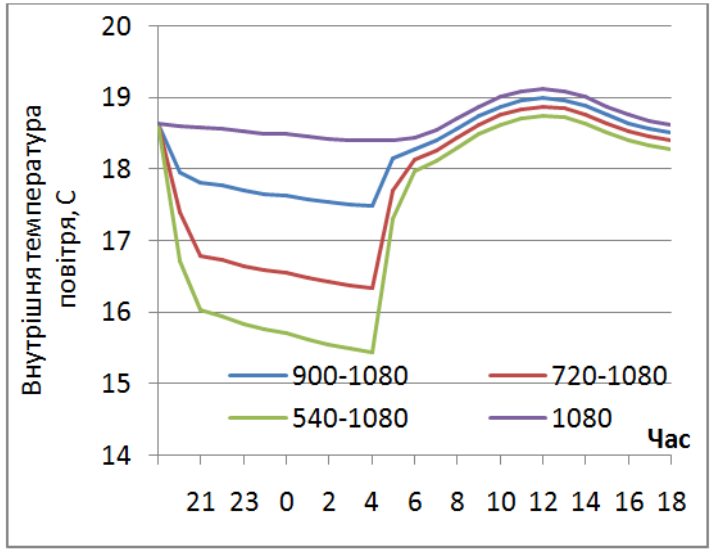
Впливові параметри:

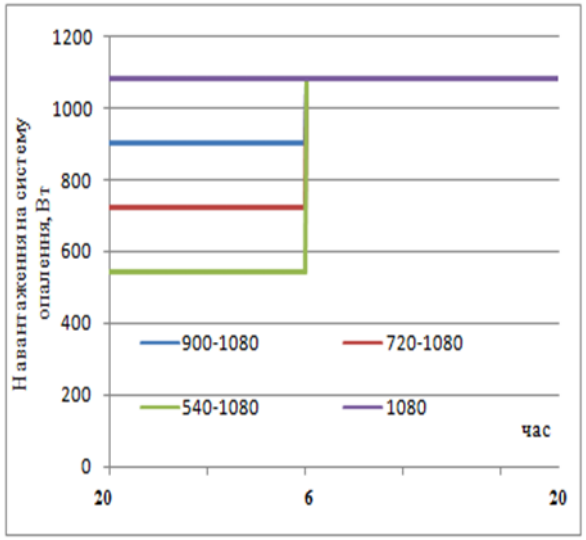
- зовнішня температура повітря,
- сонячні теплонадходження,
- кратність повітрообміну,
- рівень теплонадходжень.



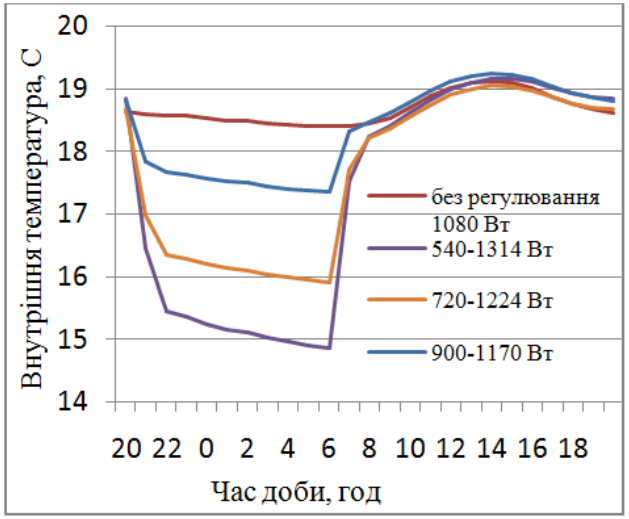


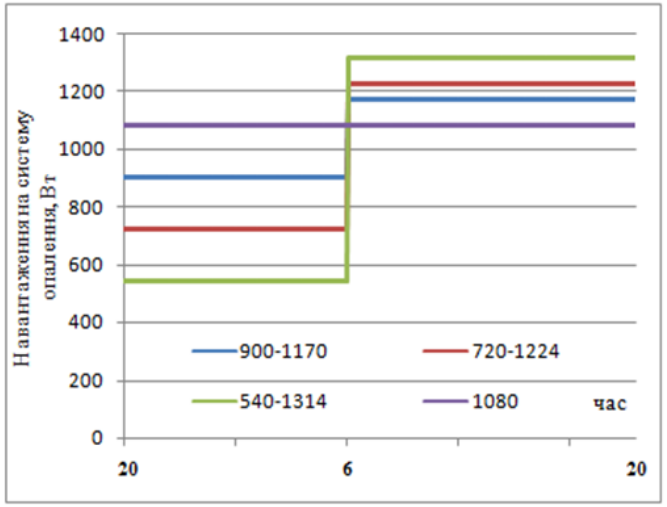
Моделювання теплового стану енергетичної системи будівлі при переривчастому опалені





знижується внутрішньої температура повітря в робочі години на 1,5–2 °С від нормативного рівня





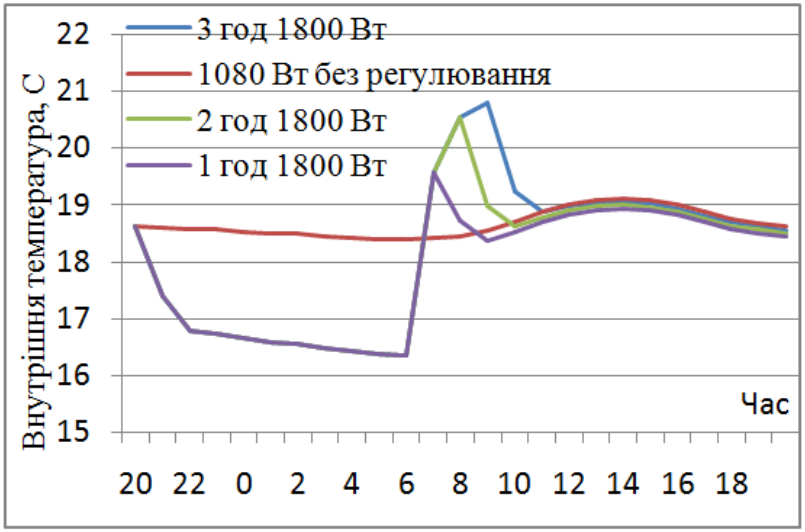
Економія:

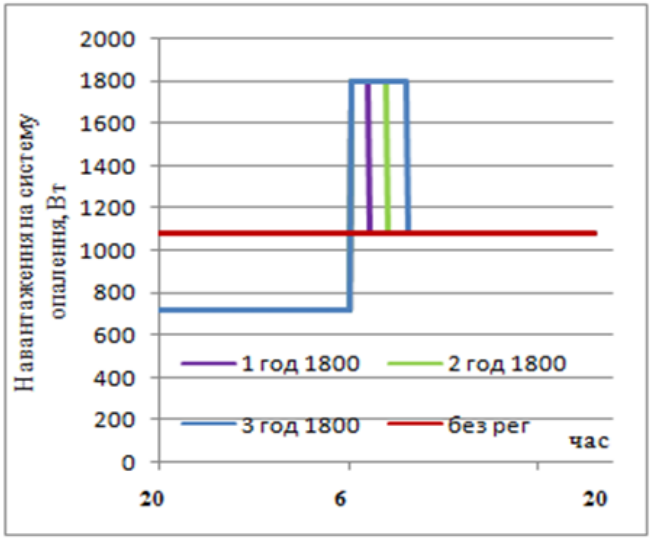
2% для графіка 900-1170 Вт;

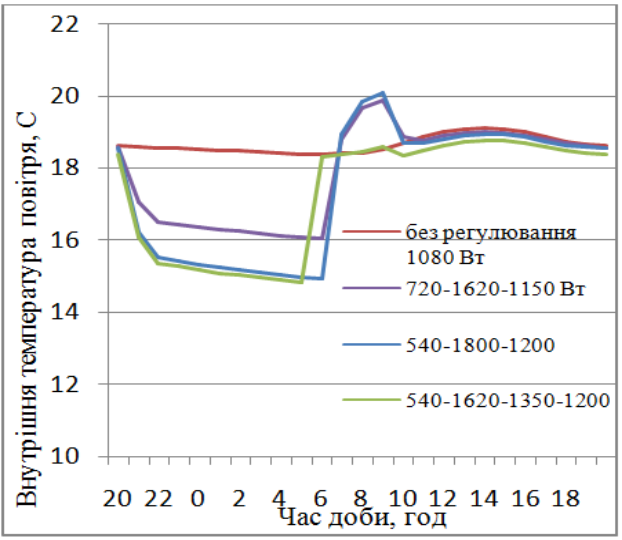
6% – для 720-1224 Вт;

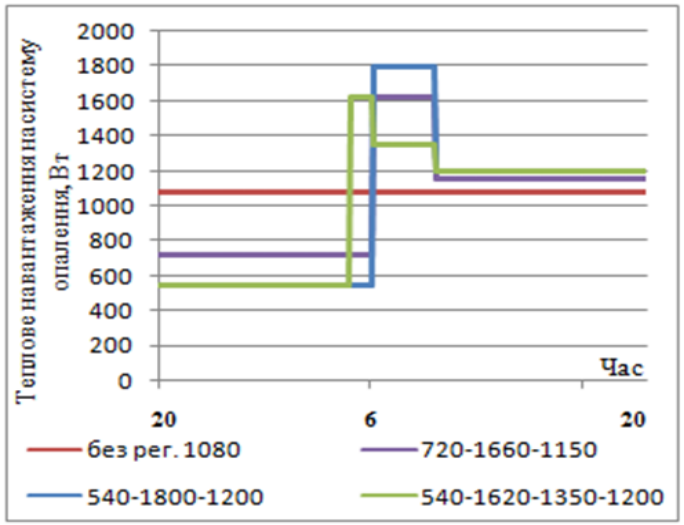
8,2% – для 540-1314 Вт.

Форсування системи опалення перед початком робочих годин









Економія:

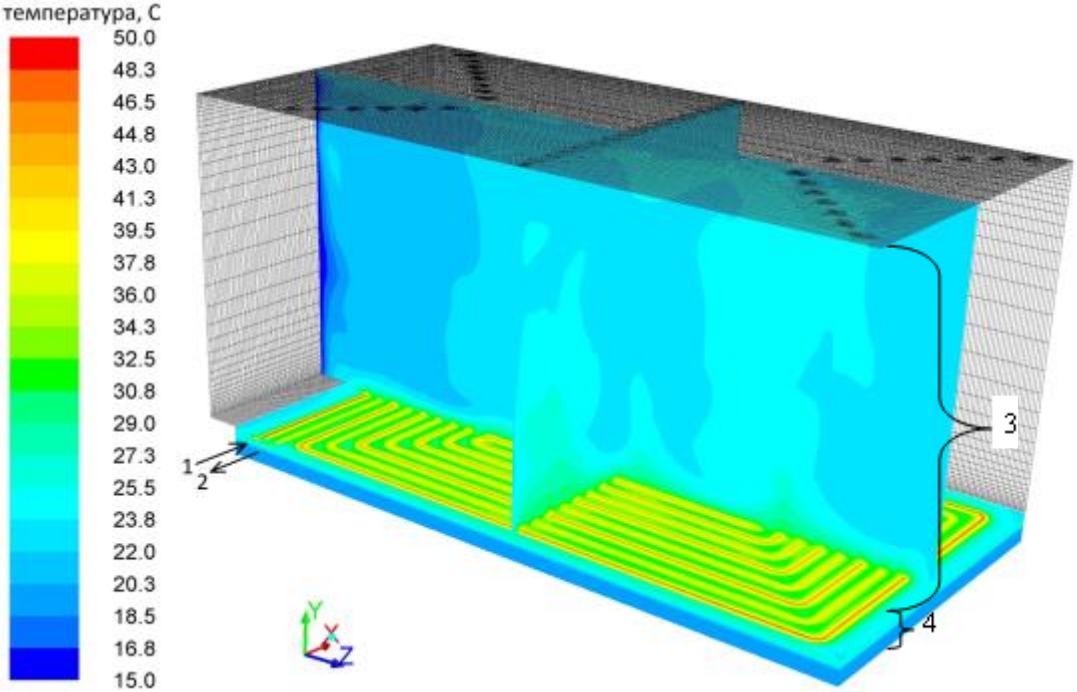
4,6% для графіку 720-1620-1150 Вт;

7,2% – для 540-1800-1200 Вт;

8,2% – для 540-1620-1350-1200 Вт.

Теплофізична модель приміщення з системою водяного підлогового опалення. Постановка задачі.

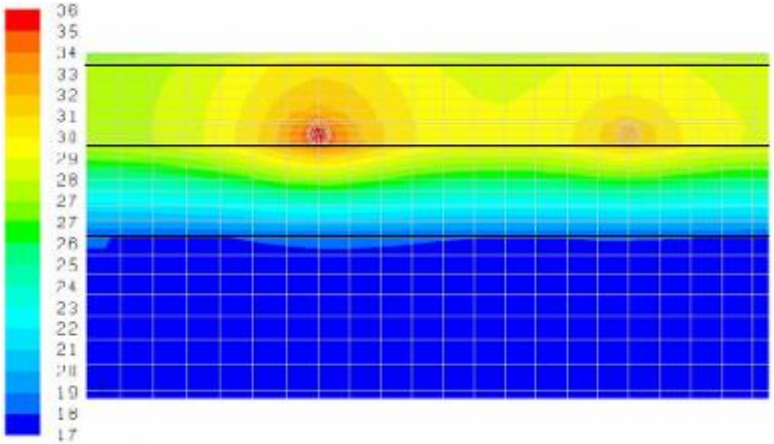
Розглянуті шість різних геометричних розрахункових областей для конструкцій системи підлогового опалення із кроками укладання опалювального контуру 0,125; 0,15; 0,175 м та діаметрами труби 0,008; 0,011; 0,015 м.



1 – вхід теплоносія в контур опалення; 2 – вихід теплоносія з контуру;
3 – повітря в приміщенні; 4 – система водяного підлогового опалення.

Розміри моделі: 5900 х 3000 х 3000 мм.
Теплоносій в контурі опалення – вода.
Масова витрата теплоносія G = 0,03 кг/с.
Температура теплоносія на вході
t = 35; 40; 45; 50; 55°С.
На межі розрахункової області задавались граничні умови I роду (експериментальні дані):
- температура внутрішніх стін: t = 20°С;
- температура стелі: t = 22°С;
- температура зовнішньої стіни: t = 15°С;
- температура вікна: t = 13°С;
- температура основи під підлогою: t = 18°С;

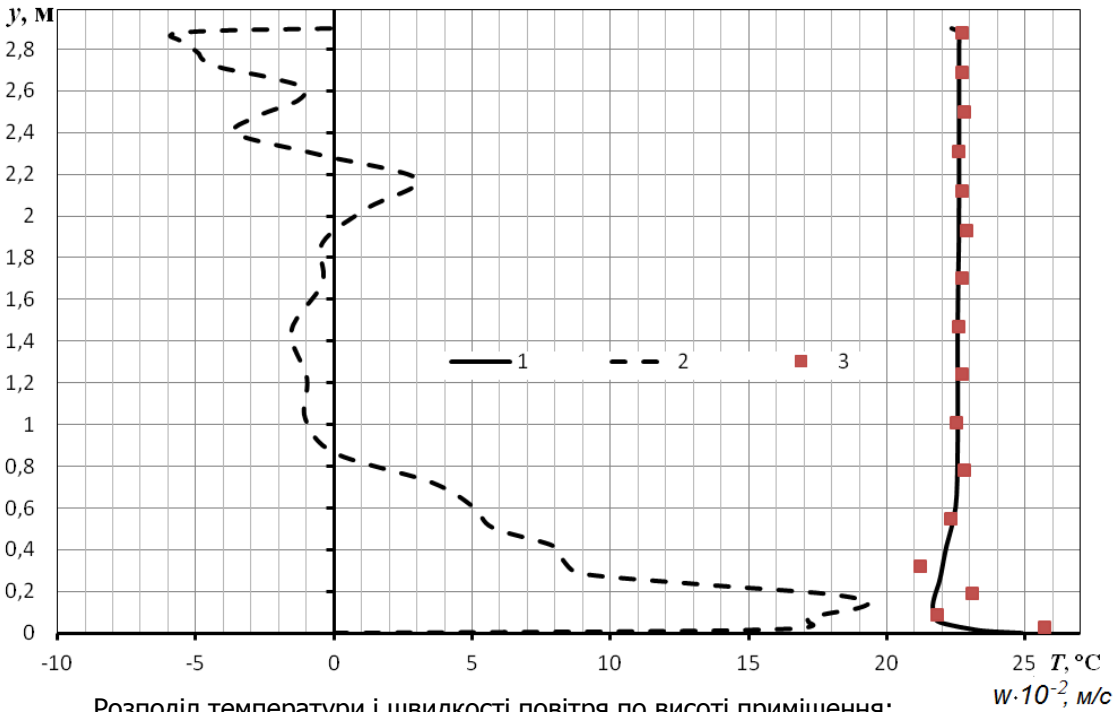
Бокові грані підлоги – адіабатні.
Коефіцієнт випромінювання стін – 0,9.
Коефіцієнт випромінювання скла вікна – 0,8.
Повітря вважається діатермічним середовищем.



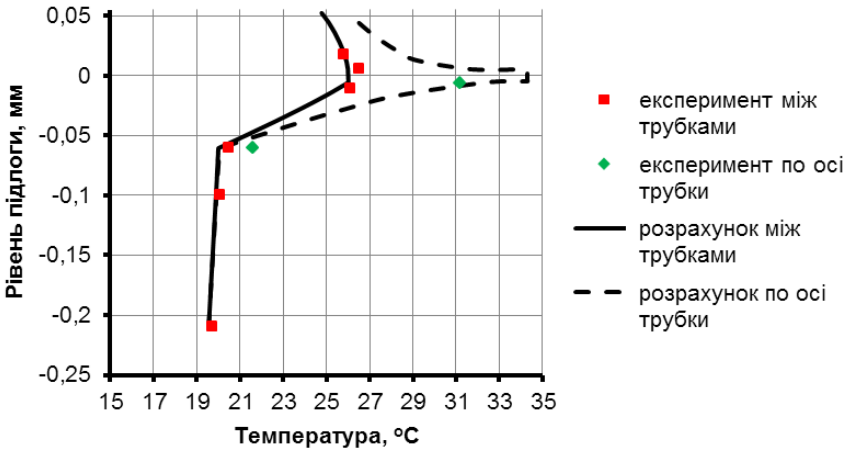
Теплофізичні властивості шарів підлоги за ДБН В.2.6-31:2006 Конструкція будівель і споруд. Теплова ізоляція будівель.

№ п/п	Найменування шару	Характеристика в сухому стані			Товщина шару, мм
		густина ρ_0, кг/м³	питома теплоємність c_0, кДж/(кг·К)	теплопровідність λ_0 Вт/(м·К)	
1	Плити керамічні для підлоги	2000	0,88	0,89	8
2	Розчин цементно-піщаний	1600	0,84	0,47	50
3	Плити пінополістирольні екструзійні	30	1,34	0,034	55
4	Бетон на гравії або щебені з природного каменю	2400	0,84	1,51	147
5	Труба ∅17х3, РЕХ-а	1500	2,3	0,43	3

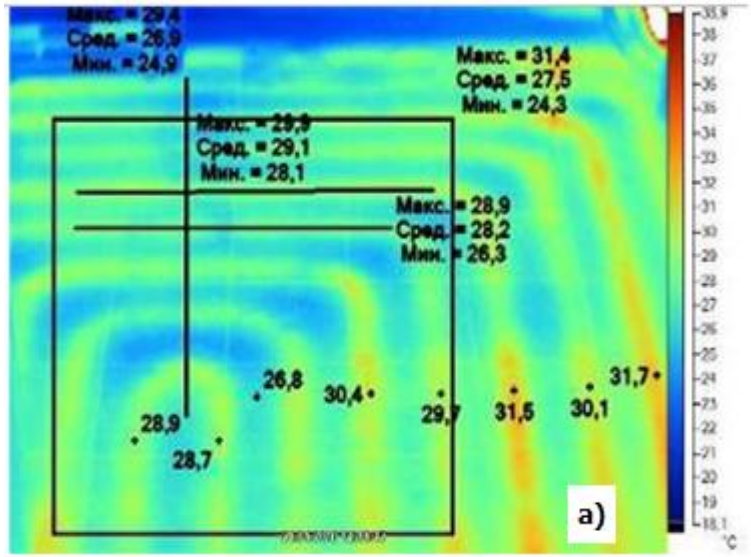
Зіставлення результатів розрахунку з експериментальними даними

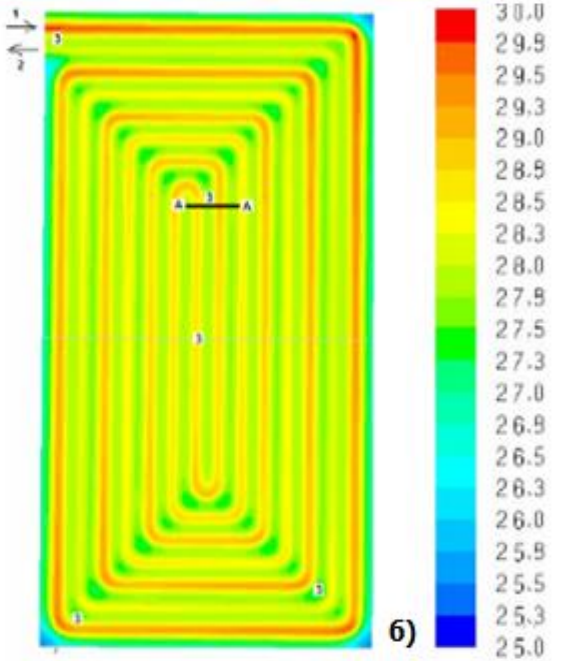


Розподіл температури і швидкості повітря по висоті приміщення:
1 - розрахункова температура повітря,
2 - розрахункова швидкість,
3 - експериментальні значення температури повітря.



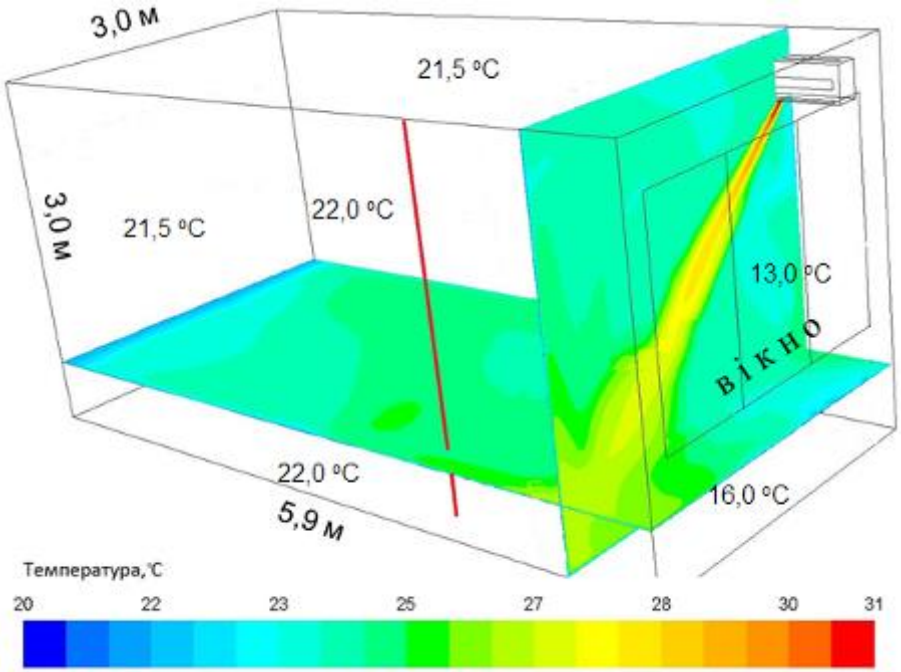
Розподіл температури по товщині підлоги





Температурне поле при експлуатаційному режимі:
а) термограма тепловізійного обстеження підлоги,
б) результат розрахунків за математичною моделлю.

Математичне моделювання квазістаціонарних процесів тепломасопереносу всередині об’єму приміщення із системою повітряного опалення фанкойлами. Постановка задачі. Граничні умови.



Розміри моделі: 5900x3000x3000 мм (кімната площею 18 м^2).
Масова витрата повітря через фанкойл G = 0,175 кг/с.
Температура повітря на виході з фанкойлу – t = 31,0 °C (експериментальне значення).
На границях моделі задані граничні умови I роду (експериментальні данні, середнє значення) температури:
- стіни (двері) t = 21,5 °C;
- стіни (фанкойл) t = 22,0 °C;
- стіни (навпроти фанкойла) t = 20,5 °C;
- стелі t = 21,5 °C;
- зовнішньої стіни t = 16,0 °C;
- вікна t = 13,0 °C;
- підлоги t = 22,0 °C.

1. Рівняння нерозривності: $$\frac{\partial(v)}{\partial x}+\frac{\partial(u)}{\partial y}+\frac{\partial(w)}{\partial z}=0$$

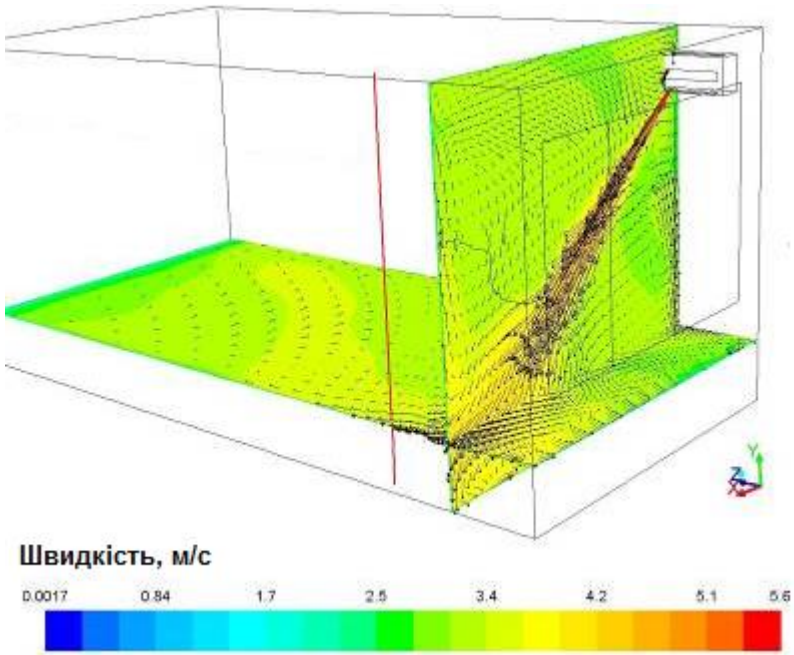
2. Рівняння збереження кількості руху:

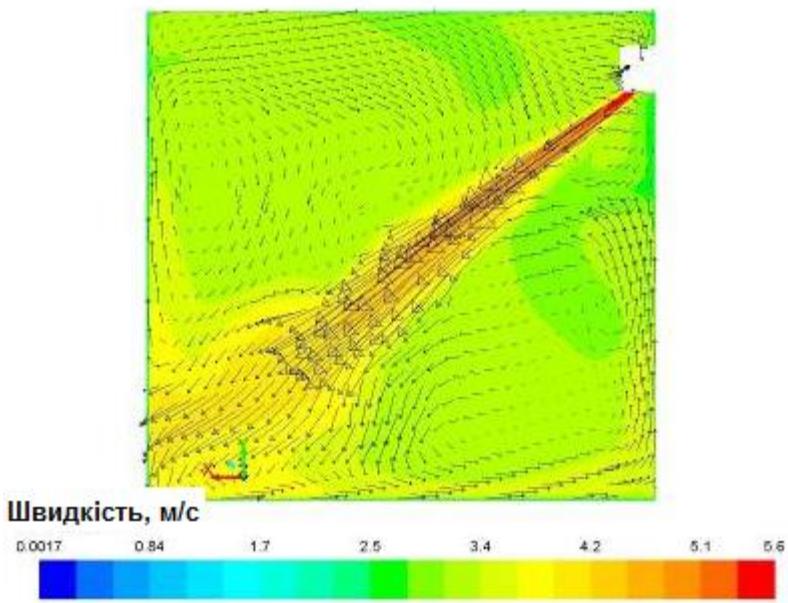
$$\begin{cases}
\rho\left(\frac{\partial u^2}{\partial x}+\frac{\partial uv}{\partial y}+\frac{\partial uw}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}+2\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)\right] \\
\rho\left(\frac{\partial vu}{\partial x}+\frac{\partial v^2}{\partial y}+\frac{\partial vw}{\partial z}\right)=-\rho g-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}\right)\right]+2\frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\frac{\partial v}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}\right)\right] \\
\rho\left(\frac{\partial wu}{\partial x}+\frac{\partial wv}{\partial y}+\frac{\partial w^2}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial z}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial w}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial z}\right)\right]+2\frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\frac{\partial w}{\partial z}\right]
\end{cases}$$

3. Рівняння збереження енергії для повітря в приміщенні: $$C_p\rho\left(\frac{\partial uT}{\partial x}+\frac{\partial vT}{\partial y}+\frac{\partial wT}{\partial z}\right)=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)$$

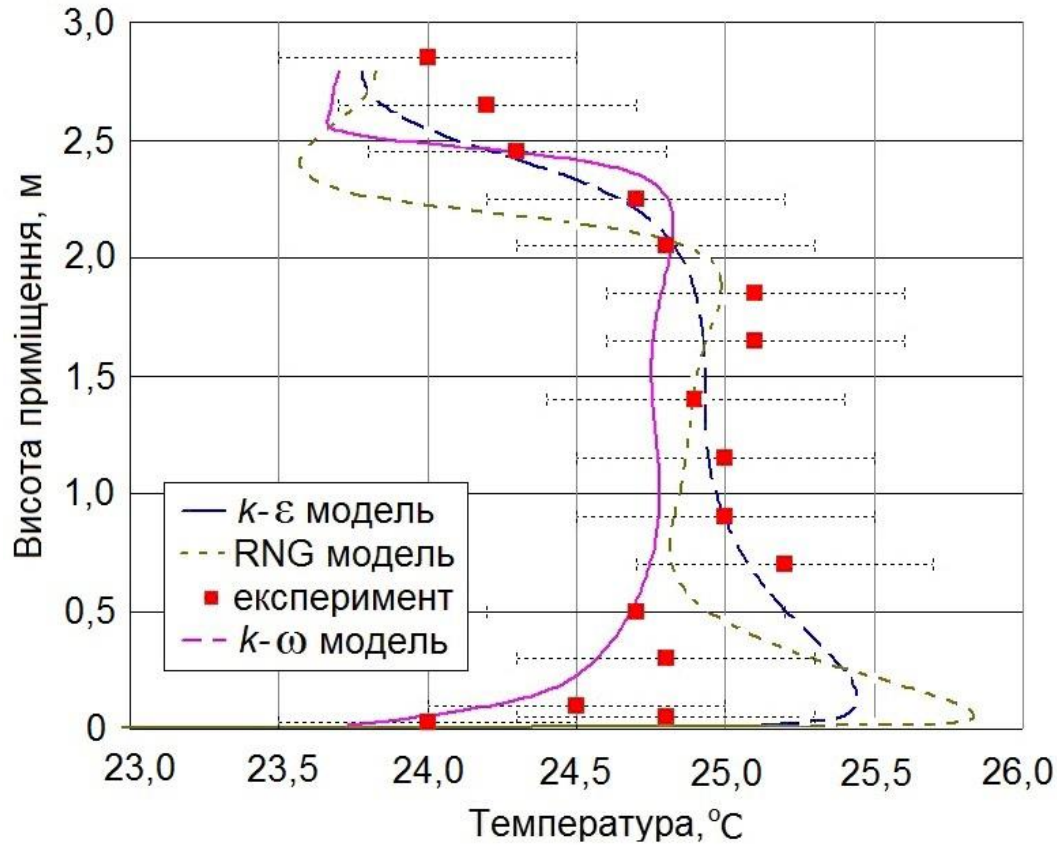
Моделювання проводилось методом контрольного об’єму. Для врахування впливу турбулентності використовувались стандартна $k-\varepsilon$ модель турбулентності, її ренормгрупова модифікація RNG і модель $k-\omega$. Тобто додатково вирішувались ще два рівняння для кінетичної енергії для k, швидкості дисипації ε і специфічної ω. У розрахунках густина повітря залежала від температури згідно наближенню Бусінеска - Обербека.

Розподіл полів швидкості в приміщенні





Зіставлення результатів розрахунку за різними моделями турбулентності з експериментальними даними

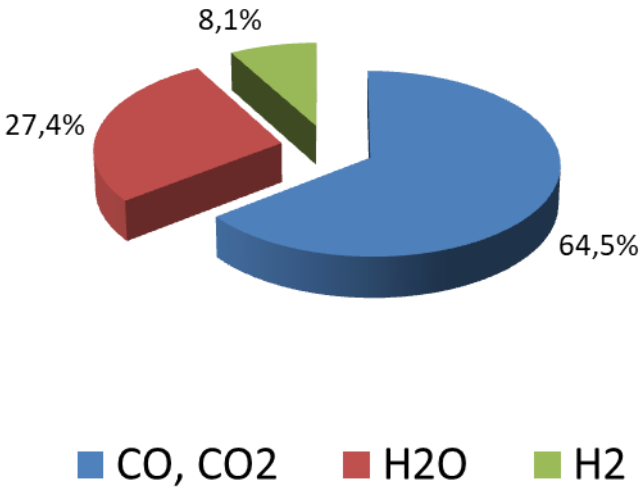


Розрахункові значення за *k* - ε моделлю Ansys найкраще корелюють з даними експерименту.

Формалізація завдань створення теплоізоляційних матеріалів

Пороутворювачі у сировинній суміші теплоізоляційних матерів

Для піноскла:



Вуглецеві пороутворювачі

$$3Fe + 2CO \xrightarrow{t} Fe_3C + CO_2,$$

$$Na_2SO_4 + 2C = Na_2S + 2\,CO_2$$

$$3Na_2SO_4 + Na_2S + 4SiO_2 = 4Na_2SiO_3 + 4SO_2$$

$$4Na_2SO_4 + 2C + 4SiO_2 = 4Na_2SiO_3 + 2CO_2 + 4SO_2$$

$$Na_2CO_3 + SO_2 + \frac{1}{2}O_2 = Na_2SO_4 + CO_2,$$

$$Na_2CO_3 + SiO_2 = Na_2SiO_3 + CO_2,$$

$$Na_2SO_4 + C + CaCO_3 + 6SiO_2 = Na_2O \bullet CaO \bullet 6SiO_2 + CO + CO_2 + SO_2,$$

Пара

$$Al_2O_3 \cdot 3H_2O \xrightarrow{140-200^\circ C} \gamma \cdot Al_2O_3 \cdot H_2O + 2H_2O.$$

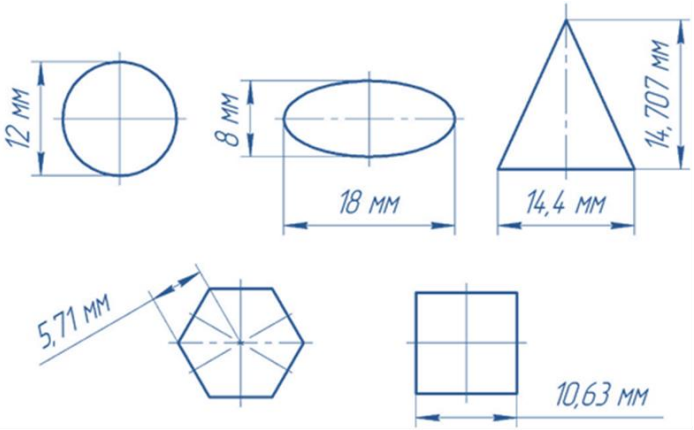
$$2Al(OH)_3 \xrightarrow{575^\circ C} Al_2O_3 + 3H_2O.$$

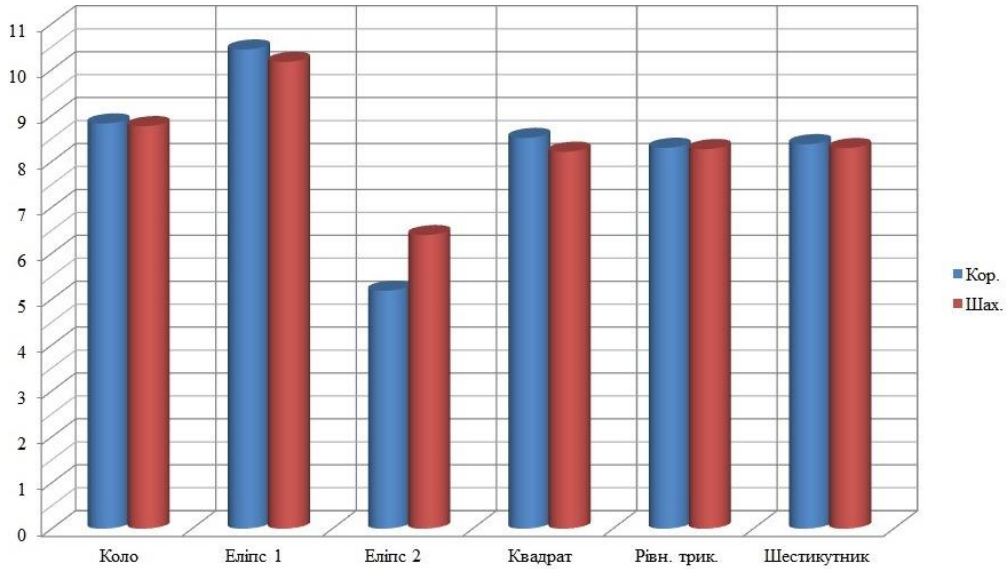
Водень

$$2Al + 3Ca(OH)_2 + 6H_2O = (3CaO) \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O + 3H_2$$

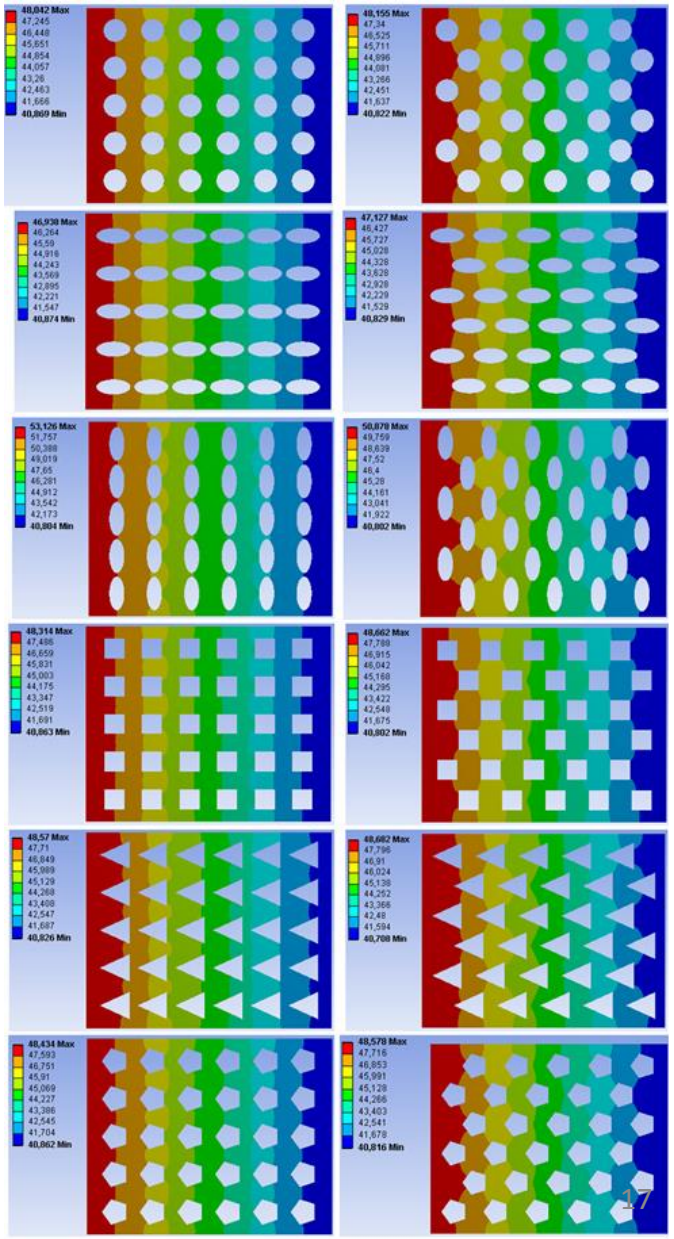
$$C + H_2O \xrightarrow{t} CO + H_2, \qquad C + 2H_2O \xrightarrow{t} CO_2 + 2H_2.$$

Дослідження впливу форми пір на коефіцієнт теплопровідності пористих структур та конструкцій теплового захисту без врахування конвекції всередині пір

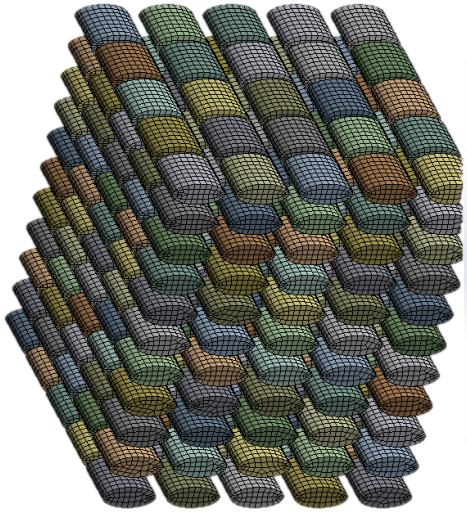


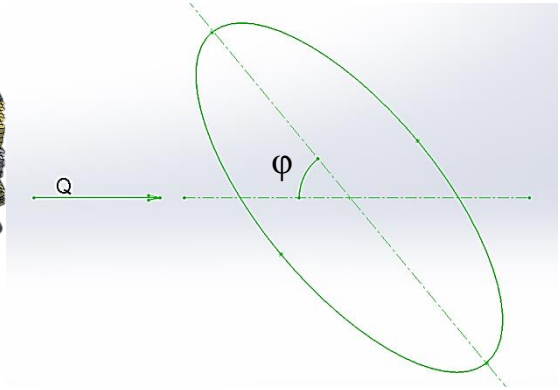


Коефіцієнти теплопровідності пористих матеріалів та виробів з різною формою пір

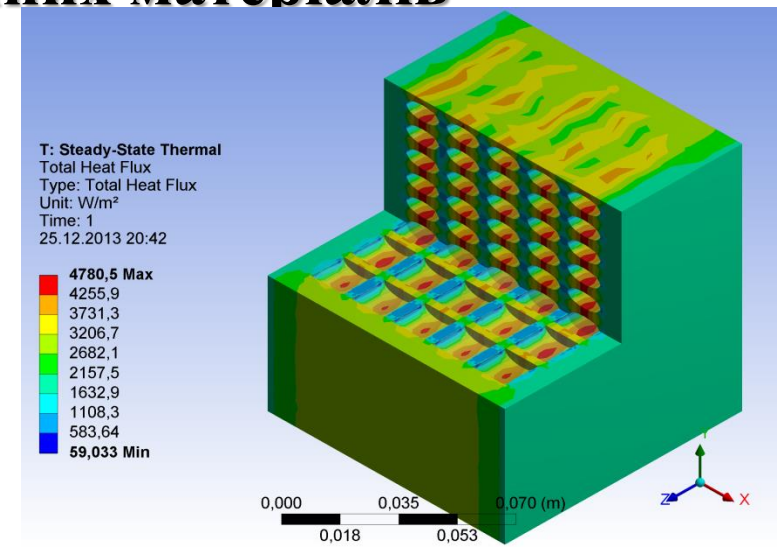


Дослідження впливу форми пір на тепловий опір пористих теплоізоляційних матеріалів



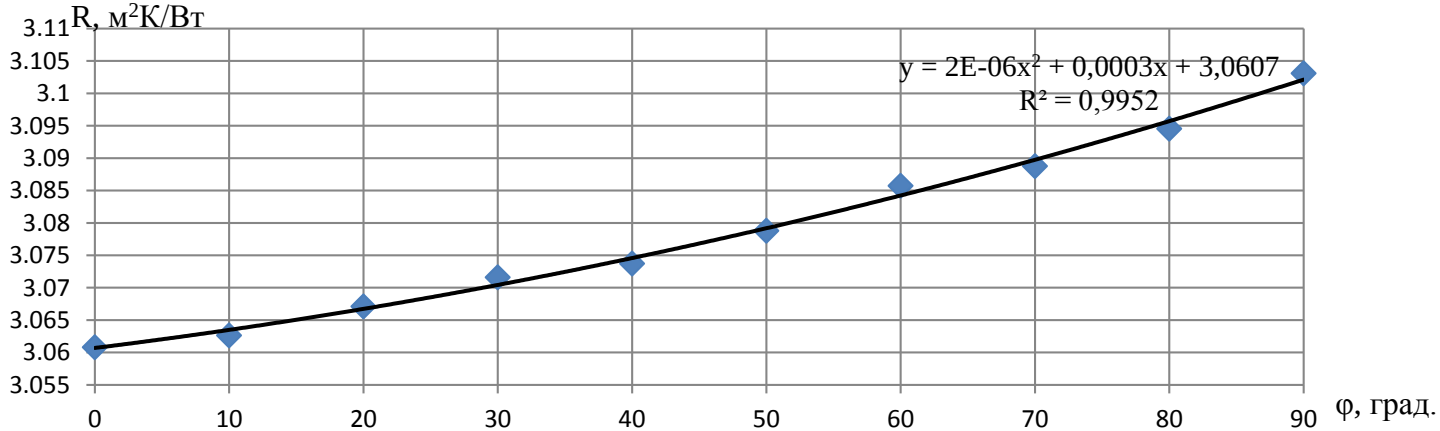


Комп'ютерна модель пір

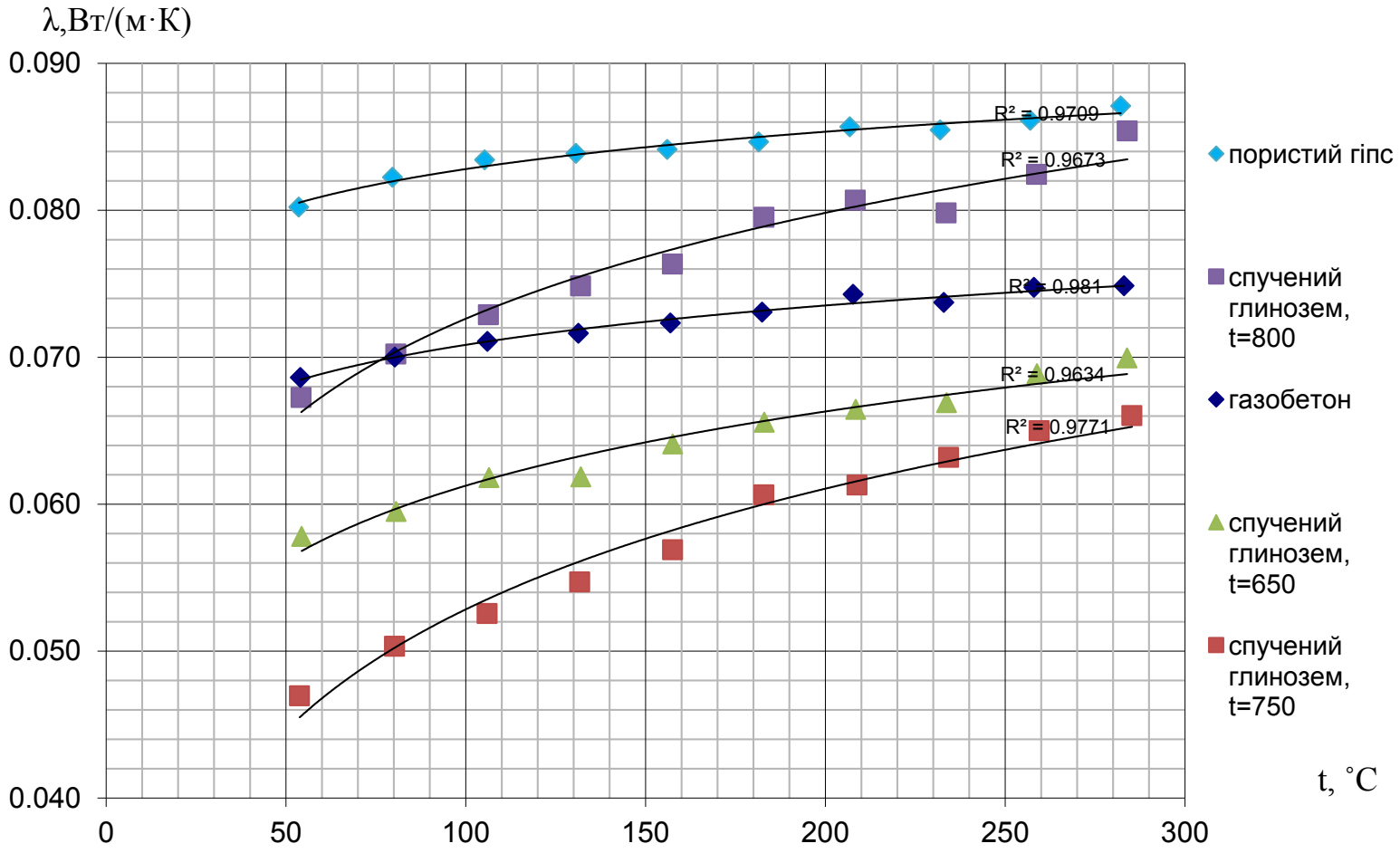


Розподіл теплового потоку по теплоізоляційному матеріалу

Тепловий опір пористого теплоізоляційного матеріалу при різному куті нахилу еліптичних пір (7 мм) до теплового потоку



Залежність коефіцієнту теплопровідності пористих теплоізоляційних зразків від температури



Висновки

В роботі розв’язана важлива науково-прикладна проблема підвищення енергетичної ефективності будівель на стадіях проектування нових та термомодернізації існуючих, що включає в себе поєднання архітектурних прийомів в рамках будівельної теплофізики із технологічними аспектами сучасних систем теплозабезпечення. Такий, концептуальний підхід, є актуальним та затребуваним в умовах існуючого енергодефіциту в країні, а також стрімкого розвитку технологій кліматизації приміщень.

1. Отримали розвиток математичні моделі для оцінювання енергоефективності будівель та методи їх використання для визначення показників енергоефективності за рахунок уточнення розділення теплоінерційних характеристик огороджень будівлі, зміни погодних умов, що дозволяє зменшити розбіжності визначення енергопотреби в умовах динамічної зміни характеристик середовища. Визначені умови застосування та проведено порівняня стаціонарних, квазістаціонарних та динамічних методів визначення енергетичних характеристик будівель для різних часових інтервалів розрахунку наприкладі різ континентального клімату України.

2. Розроблені методичні основи та створенні математичні моделі для прогнозування та регулювання рівня опалення на основі регресійного аналізу та врахування передісторії впливу чотирьох груп внутрішніх та зовнішніх факторів впливу. Для трьох днів передісторії лінійна багатофакторна регресійна модель потрібує визначення 13 коефіцієнтів рівняння регресії. Нелінійна багатофакторна регресія дозволяє використовувати один коефіцієнт при кожному з впливових параметрів незалежно від кількості діб врахування передісторії зміни параметру, для визначення яких достатньо по одному модельному експерименту.

3. Проведено багатофакторний параметричний аналіз факторів, які включені в енергетичну систему будівлі, та визначено вагомість та динаміку їх впливу. В розглянутому діапазоні зміни параметрів їх вплив на температуру внутрішнього повітря зменшується в ряду: кратність повітрообміну, рівень опалення, зовнішня температура повітря, сонячні теплонадходження.

4. Уточнені режими переривчастого опалення будівель з врахуванням теплоінерційних та погодних умов. Економія при впровадженні рекомендованої глибини зниження температури повітря в неробочі години може досягти до 9% для типових умов грудня. В цілому для громадського сектору будівель України застосування речимів переривчастого опалення протягом опалювального сезону з врахуванням динаміки зміни умов середовища дозволить досягти економії – до 3,6 млн. Гкал.

5. Обчислення, що виконані за розробленими математичними моделями теплообміну у програмному пакеті Ansys 14.0 задовільно корелюють (максимальне відхилення до 8%) із даними власних експериментів. Дослідження процесів складного теплообміну у системі водяного підлогового опалення дозволили розробити номограмну інженерну методику розрахунку теплотехнічних параметрів такої системи для різних режимів її експлуатації. Дана методика може бути рекомендована для проектування систем водяного підлогового опалення в широкому діапазоні теплової потужності при значенні густини теплового потоку на поверхні від 20 до 120 Вт/м^2, при витраті теплоносія від 0,001 до 0,012 м^3/с, монтажному кроці між осями труб від 125 до 200 мм і внутрішньому діаметрі труби контуру від 0,008 до 0,015 м.

6. Розроблено комплексну технологію виробництва пористих матеріалів різного призначення для будівельної галузі та теплоенергетичних об’єктів. Отримані матеріали мають нижчю вартість (в 2-2,4 рази), високу міцність і привабливі для використання у якості теплоізоляції теплофізичні характеристики. Отримані теплоізоляційні матеріали можна використовувати для теплового захисту будинків, як окремий шар теплоізоляції, так і у якості єнергоефективного будівельного матеріалу для формування стін, елементів стін, підлоги, перекриття ті в теплозахисних конструкціях.