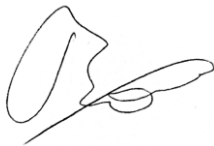


**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ**

**«ТЕПЛОФІЗИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВПЛИВУ СОНЯЧНОГО
ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ФОРМУВАННЯ ТЕПЛОВОЛОГІСНОГО
СТАНУ БУДІВЕЛЬ»**

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів та текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



Р.Я. Сороковий

Науковий керівник – Борис Вікторович Давиденко, доктор технічних наук,
с.н.с., головний науковий співробітник ІТТФ НАН України

Київ 2025

АНОТАЦІЯ

Сороковий Р.Я. Теплофізичне обґрунтування впливу сонячного випромінювання на формування тепловологісного стану будівель. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика» (технічні науки). – Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2025.

Дисертацію присвячено розробці теплофізичних підходів для аналізу впливу інтенсивності сонячного випромінювання на динаміку зміни тепловологісного стану будівельних конструкцій і мікроклімату в опалювальних приміщеннях з метою вирішення актуальної проблеми зниження навантаження опалювальних приладів, і як наслідок зменшення витрат природного палива, та покращенню умов експлуатації будівель.

В Україні витрати енергії на опалення і вентиляцію будівельних споруд значно вище, ніж в країнах ЄС. Це пояснюється недостатньо ефективними заходами по теплозбереженню будівель і нераціональним використанням енергоресурсів.

При проектуванні систем опалення та при оцінці потреб в тепловій енергії в процесі експлуатації будівель не враховуються зміна вологовмісту огорожувальних конструкцій та надходження теплоти сонячного випромінювання. Відомо, що в сонячні дні опалювального періоду до 30% теплоти в будівлі може генеруватись за рахунок сонячної радіації, а підвищення вологовмісту стінових конструкцій погіршує їх теплозахисні якості в зимовий період.

Результати експериментальних і розрахункових досліджень інтенсивності сонячного випромінювання, його впливу на тепловий стан огорожувальних конструкцій та теплонадходжень у внутрішні приміщення будівель демонструють роботи Б. Баска, В. Дешка, Л. Декуші, Л. Воробйова, С. Кудрі, В.

Кучинського, Н. Мхитаряна, О. Підгорного, Т. Суржик, О. Сергійчука, Г. Фаренюка, та інших. Однак дослідження впливу добової зміни інтенсивності сонячного випромінювання на динаміку тепловологісного стану огорожувальних конструкцій та радіаційно-конвективних теплових потоків у внутрішніх приміщеннях будівель потребують подальшого розвитку.

Відповідно до вищевикладеного метою роботи є теплофізичне обґрунтування та визначення характеру впливу сонячного випромінювання на тепловологісний стан огорожувальних конструкцій будівлі та мікроклімат приміщень.

Для досягнення зазначеної мети вирішенню підлягали наступні завдання:

1. На основі довгострокових експериментальних досліджень виявити закономірності зміни інтенсивності сонячного випромінювання на огорожувальних конструкціях різної орієнтації;
2. Розробити математичну модель перенесення теплоти і вологи через огорожувальну конструкцію будівлі за наявності сонячного випромінювання і виконати розрахунковий аналіз впливу сонячного випромінювання на температурний і вологий стан огорожувальних конструкцій;
3. З використанням запропонованої математичної моделі динаміки зміни тепловологісного стану приміщень при врахуванні додаткового надходження теплоти від сонячної радіації виявити залежність характеристик цього стану від величини променевих потоків;
4. Розробити розрахунково-експериментальний метод визначення рівноважного вологовмісту будівельних матеріалів огорожувальних конструкцій.

В дисертаційній роботі проаналізовано переваги і недоліки приладів для вимірювання сонячної радіації та при застосуванні піранометра СР-М1, розробленого в ІТТФ НАН України, проведено вимірювання інтенсивності сонячного випромінювання в м. Києві в різні пори року. Даний піранометр дозволяє визначати інтенсивність сонячного випромінювання на поверхні

різної орієнтації відносно сторін світу. Результати вимірювання показали істотну залежність надходжень енергії сонячної радіації від орієнтації сприймаючої поверхні упродовж доби і в різні пори року.

Для теоретичної оцінки зміни інтенсивності сонячного випромінювання застосовано математичну модель Американського товариства інженерів з опалення, охолодження та кондиціонування повітря ASHRAE, яка була чисельно реалізована для Північно-західної частини Києва. Порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними показує їх достатньо задовільний збіг в будь-який час року, що свідчить про можливість ефективного використання даного розрахункового підходу для оцінки інтенсивності сонячної радіації в регіонах України.

Щоб оцінити вплив вологовмісту пористих огорожувальних конструкцій та дії сонячного випромінювання на їх тепловий стан в роботі розроблено математичну модель динаміки тепло- і вологоперенесення в капілярно-пористій стінці. Модель включає диференційні рівняння волого- і теплоперенесення та вирази, що визначають фізичні параметри, які входять у рівняння. Вплив зміни інтенсивності сонячної радіації упродовж доби враховується при формулюванні граничних умов. Результати розрахункових досліджень показали значний вплив сонячної радіації на розподіл температури і вологовмісту по товщині стіни в денні часи. Встановлено, що в часи найбільшої інтенсивності сонячного випромінювання в холодний період року температура на зовнішній поверхні огорожувальної конструкції може суттєво перевищувати температуру у глибинних шарах стінки. Внаслідок цього спостерігається інверсія теплового потоку біля зовнішньої поверхні стіни, при якій тепловий потік надходить з зовнішньої поверхні в середину стіни.

Для зменшення тепловтрат в оточуюче середовище зовнішні поверхні огорожувальних конструкцій будівель оснащують шаром теплоізоляції. В роботі розроблена математична модель спряженої задачі динаміки тепловологоперенесення в багатошаровій огорожувальній конструкції, яка

враховує зміну температури і концентрацій рідкої і парової фаз в кожному шарі в залежності від стану оточуючого середовища та інтенсивності сонячного випромінювання. Результати розрахункових досліджень показали, що при наявності шару утеплювача на зовнішній поверхні стіни сонячне випромінювання переважно впливає на температурно-вологісний стан утеплювача. Температурно-вологісний режим несучої стінової конструкції за умов дії сонячного випромінювання змінюється несуттєво та наближає її вологовміст до рівноважного значення W_p , який залежить від температури і відносної вологості оточуючого середовища. Для визначення рівноважного вологовмісту будівельних матеріалів розроблений чисельний метод побудови ізотерм сорбції, який забезпечує задовільний збіг отриманих розрахункових результатів з експериментальними даними. Даний метод доцільно застосовувати на практиці, якщо для капілярно-пористого матеріалу відомі інтегральна або диференціальна функції розподілу пор по радіусу.

Формування мікроклімату у приміщеннях будівель відбувається в результаті аеродинамічних і теплообмінних процесів, які супроводжують теплопередачу від нагрівальних приладів та віконних конструкцій (при дії сонячної радіації) і тепловтрат в навколишній простір через огорожувальні конструкції будівлі. Конвекційний рух повітряного середовища в приміщенні, що виникає за рахунок нерівномірного розподілу температури, описується системою рівнянь динаміки турбулентної течії спільно з рівнянням енергії, які доповнюються рівняннями k - ε моделі турбулентності та граничними умовами для зовнішньої поверхні будівлі, на границі між склом вікна і повітряним прошарком та на внутрішніх поверхнях стін. В програму розрахунку інтегрувався алгоритм ASHRAE для визначення функції інтенсивності сонячного випромінювання. Результати чисельного моделювання показали, що в зимовий період за рахунок додаткового променевого теплонадходження, температура протилежної вікну стінки може підвищуватись на 15–17 °C, при цьому температура повітря в приміщенні збільшується 2–3 °C, що обґрунтовує

можливість зменшення теплового навантаження на опалювальні пристрої будівель.

Достовірність результатів забезпечується коректністю математичних постановок задач і фізичних припущень, а також порівняльним аналізом теоретичних і експериментальних результатів. Точність і надійність результатів експерименту зумовлена використанням сучасного приладу вимірювання з комп'ютерною обробкою даних.

Результати проведених досліджень впроваджено в будівельну практику на підприємстві ПП «Ірпін'ятеплосервіс» та у навчальному процесі Київського національного університету будівництва і архітектури за спеціальностями (ОП) «Теплогазопостачання та вентиляції», ОП «Теплоенергетика обладнання хімічних виробництв та підприємств будівельних матеріалів».

Ключові слова: інтенсивність сонячного випромінювання, процеси тепловолупереносу, огорожувальні конструкції, мікроклімат внутрішніх приміщень, капілярно-пористі матеріали, ізотерма сорбції, повітряно-температурний режим приміщення.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Basok, B.I., Novikov, V.G., Davydenko, B.V. Belyaeva T.G. Novitskaya M.P. Sorokovoi R. Y. Radiative-Convective Heat Exchange of a Building with the Environment on Exposure to Solar Radiation. Journal of Engineering Physics and Thermophysics 2020. V. 93. Issue 1. P.45–53. (Scopus, Web of Seiense)
2. Фіалко, Н., Басок, Б., Давиденко, Б., Сороковий, Р., Сорокова, Н., Новіков, В. Вплив сонячного випромінювання на температурний режим приміщення в зимовий період. Енергетичні технології та ресурсозбереження. 2024. Т.80, №3, С.135-145. DOI: 10.33070/etars.3.2024.09 (Scopus)
3. Басок Б.И., Давиденко Б.В., Новиков В.Г., Сороковой Р.Я. Моделирование солнечного излучения для использования в возобновляемой энергетике и в строительной теплофизике. Пром. теплотехника. 2018, Т.40. №1. С. 44–50.

4. Сорокова Н.М., Кольчик Ю.М., Сороковий Р.Я. Метод визначення рівноважного вологовмісту будівельних матеріалів огорожувальних конструкцій. *Energy Efficiency in Civil Engineering and Architecture*. 2018. Iss.10. С. 62 – 67. ISSN 2310-0516.
5. Тимощенко А.В., Беляєва Т.Г., Стецюк В.Г., Мороз М.В., Сороковий Р.Я. Конвективна сушка теплоізоляційних базальто-бентонітових виробів. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2018. №3 С.103–109. ISSN 1813-5420.
6. Basok B., Davydenko B., Timoshchenko A., Novikov V., Sorokoviy R., Moroz M. Influence of Solar Radiation on the Temperature Regime of Buildings Walls. No Conference Proceedings of Scientific Papers, «CASSOTHERM 2018» Technical University of Kosice. 2018. P. 70-76.
7. Fialko N., Basok B., Davydenko B., Sorokoviy R., Sorokova N., Novikov V. Comparative analysis of temperature conditions of rooms in the presence and absence of solar radiation. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. № 9 (164), 2024. С.62-65. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2024-9-10390>
8. Fialko N., Basok B., Davydenko B., Sorokoviy R., Sorokova N., Novikov V. Mathematical modeling of air flow in rooms taking into account solar radiation. *International scientific journal "Internauka"*. 2024. № 10. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2024-10-10412>

розділи колективних монографій

9. Sorokova N.N., Kolchik Yu.N., Sorokoviy R. Y. Mathematical modeling of sorption and desorption dynamics in adsorption systems *Chemical Technology and Engineering: Monograph*. (Atamanyuk V.M. et al., Eds.) Lviv: SPOLOM, 2021. 146 p. P.19-23. ISBN 978-966-919-760-3 <http://cte.org.ua/3rd-chemical-technology-engineering-2021/monograph>
10. Енергоефективність процесів сушіння Тематичний збірник статей у двох томах. Київ: Видавництво «Тропеа», 2021. I том. 343 с.; С. 137-140; 272-274; 283-298. ISBN 978-617-7894-24-6 (загальний) ISBN 978-617-7894-25-3 (том 1). Ум. друк.арк. 24,7. <http://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2021/04/snezhkin-zbirnik-statej-2021.pdf>

які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

11. Чаласєв Д.М., Сороковий Р.Я. Аналіз ефективності холодильних установок за різними типами конденсаторів. Роб. прогр. та тези доп. І всеукр. наук.-практ. конф. мол. вчених, асп. і студ. «буд-майстер-клас-2015» 26-27 листопада 2015 р. в КНУБА.
12. Сорокова Н.М., Шапар Р.О., Безгін М.М., Сороковий Р.Я. Математичне моделювання тепломасопереносу і фазових перетворень при сушінні біомаси в умовах рівномірного омивання сушильним агентом. Збірник матеріалів IV Міжнародного конгресу «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», Львів. 2016. С. 77.
13. Давиденко Б.В., Декуша Л.В., Воробйов Л.Й., Кравченко В.П., Новіков В.Г., Гончарук С.М., Сороковий Р.Я. Експериментальні дослідження сонячної радіації на поверхнях різної орієнтації. «Проблеми теплофізики та теплоенергетики»: Х міжн. конф. Київ, 2017. Промислова теплотехніка. 2017. Т. 39, № 7. С. 57.
14. Нікітенко М.І., Сорокова Н.М., Кольчик Ю.М., Сороковий Р.Я. Алгоритм чисельного визначення ізотерми адсорбції на базі інтегральної функції розподілу пор по розмірах. Зб. тез доп. Міжн. наук.-практ. конф. «Хімічна технологія та інженерія» Львів, Нац. університет «Львівська політехніка», 26–30 червня 2017 р., С. 62–63.
15. Давиденко Б.В., Сороковий Р.Я. Вплив сонячного випромінювання на тепловологісний стан огорожуючих конструкцій будівель. Збірник тез доповідей XV міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання", Київ, НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2018. С. 84–85.
http://ci.kpi.ua/METODA/15_teza_mizhnarodna.pdf
16. Сороковий Р.Я., Сорокова Н.М., Кольчик Ю.М. Чисельний метод визначення ізотерми сорбції капілярно-пористих матеріалів. Теплофізика та теплоенергетика, 2019. Т. 41, № 5. С. 38. ISSN 2663-7235.

17. Sorokovoi R, Sorokova N, Julia Kolchyk Ju. Numerical method of determination of sorbtion isotherm capillary-porous materials. XI Int. Conf. «Problems of thermophysics and heat engineering» May 21-22, 2019. http://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2019/05/22_abst..pdf
18. Сорокова Н.М., Корінчук Д.М., Сороковий Р.Я. Математичне моделювання динаміки сушіння і термодеструкції торфу. Тези доп. XVIII міжн. наук. конф. «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв». Одеса 12-16 жовтня 2020, ОНАХТ. С. 26-29: <https://card-file.onaft.edu.ua/handle/123456789/16075>.
19. Natalia Sorokova, Julia Kolchyk, Rodion Sorokovoi. Mathematical modeling of sorption and desorption dynamics in adsorption systems. 3rd International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering»»: Proceedings. June 21–24th, 2021, Lviv, Ukraine. Lviv Polytechnic National University. P. 51-55. <http://cte.org.ua/3rd-chemical-technology-engineering-2021/proceedings>
20. Sorokova N.N., Kolchik Yu.N. Sorokoviy R. Y. Theoretical basis of continuous drying of dispersed materials. 4th Int. Sc. Conf. «Chemical Technology and Engineering»: Proceedings June 26–29th, 2023, Lviv, Ukraine. Lviv Polytechnic Nat. University, pp. 41–44.
21. Fialko N., Basok B., Davydenko B., Sorokovyi R. Air-thermal conditions of the rooms in the winter period of the year in the presence and absence of solar radiation. 2nd International scientific and practical conference “Science and technology: challenges, prospects and innovations” (October 4-6, 2024) CPN Publishing Group, Osaka, Japan. P.65-70.

Публікації, що додатково відображають наукові результати дисертації

22. Sorokova N.N., Snezhkin, Yu. F. Shapar R. A., Sorokoviy R. Mathematical Simulation and Optimization of the Continuous Drying of Thermolabile Materials. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2019, V.92, Issue 5, P.1180–1190. DOI 10.1007/s10891-019-02032-3. (Scopus, Web of Seience)

23. Сорокова Н.М., Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О., Сороковий Р.Я. Способ сушки термолабильных материалов в ленточной сушильной установке с применением теплового насоса. Наукові праці ОНАХТ, 2015. Вип. 47. Т.2. С. 91 – 97.

SUMMARY

Sorokovyi R.Ya. **Thermophysical Justification of the Influence of Solar Radiation on the Formation of the Thermal and Moisture State of Buildings.** – A qualification research work in the form of a manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.14.06 "Technical Thermophysics and Industrial Thermal Power Engineering" (technical sciences). – Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2024.

The dissertation is devoted to the development of thermophysical approaches for analyzing the influence of solar radiation intensity on the dynamics of changes in the thermal and humidity state of building structures and the microclimate in heated premises in order to solve the urgent problem of reducing the load on heating devices, and as a consequence, reducing natural fuel consumption, and improving the operating conditions of buildings.

In Ukraine, energy costs for heating and ventilation of buildings are significantly higher than in EU countries. This is due to insufficiently effective measures for heat conservation of buildings and irrational use of energy resources.

When designing heating systems and assessing thermal energy needs during the operation of buildings, changes in the moisture content of enclosing structures and the inflow of heat from solar radiation are not taken into account. It is known that on sunny days of the heating season, up to 30% of the heat in a building can be generated due to solar radiation, and an increase in the moisture content of wall structures worsens their heat-shielding qualities in the winter.

The results of experimental and computational studies of the intensity of solar radiation, its impact on the thermal state of enclosing structures and heat input into the interior of buildings are demonstrated by the works of B. Bask, V. Deshko, L.

Dekushi, L. Vorobyov, S. Kudri, V. Kuchynsky, N. Mkhitarian, O. Pidgorny, T. Surzhyk, O. Serhiychuk, G. Farenjuk, and others. However, research into the impact of daily changes in solar radiation intensity on the dynamics of the thermal and moisture state of enclosing structures and radiative and convective heat flows in the interior of buildings requires further development.

In accordance with the above, the purpose of the work is to provide a thermophysical justification and determine the nature of the impact of solar radiation on the thermal and hygrological state of the building's enclosing structures and the microclimate of the premises. To achieve this goal, the following tasks were to be solved:

1. Based on long-term experimental studies, identify patterns in the change in the intensity of solar radiation on enclosing structures of different orientations;
2. Develop a mathematical model of heat and moisture transfer through the building envelope in the presence of solar radiation and perform a computational analysis of the impact of solar radiation on the temperature and moisture state of the envelope;
3. Using the proposed mathematical model of the dynamics of changes in the thermal and humidity state of premises, taking into account the additional heat input from solar radiation, identify the dependence of the characteristics of this state on the magnitude of the radiant fluxes;
4. Develop a computational and experimental method for determining the equilibrium moisture content of building materials of enclosing structures.

The dissertation analyzes the advantages and disadvantages of devices for measuring solar radiation and, using the SR-M1 pyranometer developed at the Institute of Photovoltaic Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, measures the intensity of solar radiation in Kyiv at different times of the year. This pyranometer allows you to determine the intensity of solar radiation on surfaces of different orientations relative to the cardinal points. The measurement results showed

a significant dependence of the solar radiation energy receipts on the orientation of the receiving surface throughout the day and at different times of the year.

To theoretically estimate the change in the intensity of solar radiation, the mathematical model of the American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) was used, which was numerically implemented for the Northwestern part of Kyiv. Comparison of the calculation results with experimental data shows their fairly satisfactory coincidence at any time of the year, which indicates the possibility of effective use of this calculation approach for estimating the intensity of solar radiation in the regions of Ukraine.

To assess the influence of the moisture content of porous enclosing structures and the action of solar radiation on their thermal state, a mathematical model of the dynamics of heat and moisture transfer in a capillary-porous wall was developed in the work. The model includes differential equations of moisture and heat transfer and expressions that define the physical parameters that are included in the equations. The influence of changes in the intensity of solar radiation during the day is taken into account when formulating boundary conditions. The results of computational studies have shown a significant influence of solar radiation on the distribution of temperature and moisture content along the wall thickness during the daytime. It has been established that during the times of greatest intensity of solar radiation in the cold season, the temperature on the outer surface of the enclosing structure can significantly exceed the temperature in the deep layers of the wall. As a result, there is an inversion of the heat flux near the outer surface of the wall, in which the heat flux flows from the outer surface to the middle of the wall.

To reduce heat loss to the environment, the external surfaces of building envelopes are equipped with a layer of thermal insulation. The paper develops a mathematical model of the conjugate problem of heat and moisture transfer dynamics in a multilayer enclosing structure, which takes into account the change in temperature and concentrations of the liquid and vapor phases in each layer depending on the state of the environment and the intensity of solar radiation. The

results of computational studies showed that in the presence of a layer of insulation on the outer surface of the wall, solar radiation mainly affects the temperature and humidity state of the insulation. The temperature and humidity regime of the load-bearing wall structure under the action of solar radiation changes insignificantly and brings its moisture content closer to the equilibrium value W_p , which depends on the temperature and relative humidity of the surrounding. To determine the equilibrium moisture content of building materials, a numerical method for constructing sorption isotherms has been developed, which ensures a satisfactory agreement of the obtained calculation results with experimental data. This method is advisable to apply in practice if the integral or differential functions of the pore distribution along the radius are known for a capillary-porous material.

The formation of the microclimate in the premises of buildings occurs as a result of aerodynamic and heat exchange processes that accompany heat transfer from heating devices and window structures (under the influence of solar radiation) and heat loss to the surrounding space through the building's enclosing structures. The convection movement of the air environment in a room, which occurs due to the uneven temperature distribution, is described by a system of equations of turbulent flow dynamics together with the energy equation, which are supplemented by the k - ϵ equations of the turbulence model and boundary conditions for the outer surface of the building, at the boundary between the window glass and the air layer, and on the inner surfaces of the walls. The ASHRAE algorithm for determining the solar radiation intensity function was integrated into the calculation program. The results of numerical modeling showed that in winter, due to additional radiant heat input, the temperature of the wall opposite the window can increase by 15–17 °C, while the air temperature in the room increases by 2–3 °C, which justifies the possibility of reducing the thermal load on building heating devices.

The reliability of the results is ensured by the correctness of the mathematical statements of the problems and physical assumptions, as well as by a comparative analysis of theoretical and experimental results. The accuracy and reliability of the

experimental results are due to the use of a modern measuring device with computer data processing.

The results of the research were implemented in construction practice at the enterprise PE "Irpinteploservice" and in the educational process of the Kyiv National University of Construction and Architecture in the specialties (OP) "Heat and Gas Supply and Ventilation", OP "Heat Power Engineering of Equipment for Chemical Production and Building Materials Enterprises".

Keywords: solar radiation intensity, heat and moisture transfer processes, enclosing structures, indoor microclimate, capillary-porous materials, sorption isotherm, indoor air-temperature regime.

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Basok, B.I., Novikov, V.G., Davydenko, B.V. Belyaeva T.G. Novitskaya M.P. Sorokovoi R. Y. Radiative-Convective Heat Exchange of a Building with the Environment on Exposure to Solar Radiation. Journal of Engineering Physics and Thermophysics 2020. V. 93. Issue 1. P.45–53. (Scopus, Web of Science)
2. Fialko, N., Basok, B., Davydenko, B., Sorokovy, R., Sorokova, N., Novikov, V. The influence of solar radiation on the temperature regime of the room in the winter period. Energy technologies and resource conservation. 2024. Vol. 80, No. 3, pp. 135-145. DOI: 10.33070/etars.3.2024.09 (Scopus)
3. Basok B.I., Davydenko B.V., Novikov V.G., Sorokova R.Ya. Modeling of solar radiation for use in renewable energy and in building thermal physics. Industrial Heat Engineering. 2018, Vol. 40. No. 1. P. 44–50.
4. Sorokova N.M., Kolchik Yu.M., Sorokov R.Ya. Method for determining the equilibrium moisture content of building materials of enclosing structures. Energy Efficiency in Civil Engineering and Architecture. 2018. Iss. No. 10. P. 62 – 67. ISSN 2310-0516.

5. Tymoshchenko A.V., Belyaeva T.G., Stetsyuk V.G., Moroz M.V., Sorokovy R.Ya. Convective drying of thermal insulation basalt-bentonite products. Energy: economics, technologies, ecology. 2018. No. 3 P. 103 –109. ISSN 1813-5420.
6. Basok B., Davydenko B., Timoshchenko A., Novikov V., Sorokoviy R., Moroz M. Influence of Solar Radiation on the Temperature Regime of Buildings Walls. No Conference Proceedings of Scientific Papers, «CASSOTHERM 2018» Technical University of Kosice. 2018. P. 70-76.
7. Fialko N., Basok B., Davydenko B., Sorokovyi R., Sorokova N., Novikov V. Comparative analysis of temperature conditions of rooms in the presence and absence of solar radiation. International scientific journal "Internauka". № 9 (164), 2024. P.62-65. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2024-9-10390>
8. Fialko N., Basok B., Davydenko B., Sorokovyi R., Sorokova N., Novikov V. Mathematical modeling of air flow in rooms taking into account solar radiation. International scientific journal "Internauka". 2024. № 10. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2024-10-10412>

sections of collective monographs

9. Sorokova N.N., Kolchik Yu.N., Sorokoviy R. Y. Mathematical modeling of sorption and desorption dynamics in adsorption systems Chemical Technology and Engineering: Monograph. (Atamanyuk V.M. et al., Eds.) Lviv: SPOLOM, 2021. 146 p. P.19-23. ISBN 978-966-919-760-3 <http://cte.org.ua/3rd-chemical-technology-engineering-2021/monograph>
10. Energy efficiency of drying processes. Thematic collection of articles in two volumes. Kyiv: Tropea Publishing House, 2021. I vol. 343 с.; C. 137-140; 272-274; 283-298. ISBN 978-617-7894-24-6 (загальний) ISBN 978-617-7894-25-3 (vol 1). Conditional print. sheets 24,7. <http://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2021/04/snezhkin-zbirnik-statej-2021.pdf>

which certify the approval of the dissertation materials

11. Chalaev D.M., Sorokovy R.Ya. Analysis of the efficiency of refrigeration units for different types of condensers. Working program and theses of the First All-

Ukrainian Scientific-Practical Conference of Junior Scientists, Asst. and Students "Bud-Master-Class-2015" November 26-27, 2015 at the KNUBA.

12. Sorokova N.M., Shapar R.O., Bezgin M.M., Sorokovy R.Ya. Mathematical modeling of heat and mass transfer and phase transformations during biomass drying under conditions of uniform washing with a drying agent. Proceedings of the IV International Congress "Environmental Protection. Energy Efficiency. Balanced Nature Management", Lviv. 2016. P. 77.

13. Davydenko B.V., Dekusha L.V., Vorobyov L.Y., Kravchenko V.P., Novikov V.G., Goncharuk S.M., Sorokovy R.Ya. Experimental studies of solar radiation on surfaces of different orientation. "Problems of thermal physics and thermal energy": X int. conf. Kyiv, 2017. Industrial Heat Engineering, 2017. Vol. 39, No. 7. P. 57.

14. Nikitenko M.I., Sorokova N.M., Kolchyk Y.M., Sorokovy R.Ya. Algorithm for numerical determination of adsorption isotherm based on the integral function of pore size distribution. Collection of abstracts of the International Scientific and Practical Conference "Chemical Technology and Engineering" Lviv, National University "Lviv Polytechnic", June 26–30, 2017, pp. 62–63.

15. Davydenko B.V., Sorokovy R.Ya. The influence of solar radiation on the thermal state of building envelopes. Collection of abstracts of the XV international scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists "Resource-energy-saving technologies and equipment", Kyiv, NTUU KPI named after Igor Sikorsky, 2018. P. 84–85. http://ci.kpi.ua/METODA/15_teza_mizhnarodna.pdf

16. Sorokovy R.Ya., Sorokova N.M., Kolchyk Y.M. Numerical method for determining the sorption isotherm of capillary-porous materials. Thermal Physics and Thermal Power Engineering, – 2019. Vol. 41, No. 5. P. 38. ISSN 2663-7235.

17. Sorokovoi R, Sorokova N, Julia Kolchyk Ju. Numerical method of determination of sorbtion isotherm capillary-porous materials. XI Int. Conf. «Problems of thermophysics and heat engineering» May 21-22, 2019. http://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2019/05/22_abst..pdf

18. Sorokova N.M., Korinchuk D.M., Sorokovy R.Ya. Mathematical modeling of the dynamics of drying and thermal destruction of peat. Abstracts of the 18th International Scientific Conference "Improvement of processes and equipment of food and chemical industries". Odesa, October 12-16, 2020, ONAHT. P. 26-29: <https://card-file.onaft.edu.ua/handle/123456789/16075>.
19. Natalia Sorokova, Julia Kolchyk, Rodion Sorokovoi. Mathematical modeling of sorption and desorption dynamics in adsorption systems. 3rd International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering»: Proceedings. June 21–24th, 2021, Lviv, Ukraine. Lviv Polytechnic National University. P. 51-55. <http://cte.org.ua/3rd-chemical-technology-engineering-2021/proceedings>
20. Sorokova N.N., Kolchik Yu.N. Sorokoviy R. Y. Theoretical basis of continuous drying of dispersed materials. 4th Int. Sc. Conf. «Chemical Technology and Engineering»: Proceedings June 26–29th, 2023, Lviv, Ukraine. Lviv Polytechnic Nat. University, pp. 41–44.
21. Fialko N., Basok B., Davydenko B., Sorokovyi R. Air-thermal conditions of the rooms in the winter period of the year in the presence and absence of solar radiation. 2nd International scientific and practical conference “Science and technology: challenges, prospects and innovations” (October 4-6, 2024) CPN Publishing Group, Osaka, Japan. P.65-70.

Publications that additionally reflect the scientific results of the dissertation

22. Sorokova N.N., Snezhkin, Yu. F. Shapar R. A., Sorokoviy R. Mathematical Simulation and Optimization of the Continuous Drying of Thermolabile Materials. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2019, V.92, Issue 5, P.1180–1190. DOI 10.1007/s10891-019-02032-3. (Scopus, Web of Seience)
23. Sorokova N.M., Snezhkin Y.F., Shapar R.O., Sorokovy R.Ya. The method of drying thermolabile materials in a belt dryer using a heat pump. Scientific works of ONAKHT, 2015. Vol. 47. T.2. P. 91-97.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	20
ВСТУП.....	37
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ В ОБЛАСТІ ВИМІРЮВАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	29
1.1 Сонячна енергія та перспективи її використання.....	29
1.1.1 Пасивне використання сонячної енергії.....	32
1.1.2 Активне використання сонячної енергії.....	37
1.2 Методи дослідження інтенсивності сонячного випромінювання.....	45
1.2.1 Експериментальні методи дослідження. Прилади для вимірювання сонячної радіації.....	45
1.2.2 Піранометр СР-М1 з декількома сприймаючими сонячне випромінювання поверхнями.....	56
1.2.3 Розрахункові методи визначення інтенсивності сонячного випромінювання.....	59
1.2.3.1 Сонячна постійна.....	63
1.2.3.2 Рівняння часу і сонячний час.....	64
1.2.3.3 Сонячне випромінювання на поверхню Землі.....	66
1.3 Розрахункові методи дослідження тепловологісного стану приміщень будівель.....	68
1.4 Тепло- і масоперенос в огорожувальних конструкціях будівель.....	72
1.4.1 Фактори, що впливають на тепло- і вологоперенесення в будівельних конструкціях.....	73
1.4.2 Математичні моделі тепло- і вологопереносу в капілярно-пористих матеріалах.....	79
1.5 Висновки. Постановка задач дослідження.....	88
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ	91

2.1 Експериментальне дослідження інтенсивності сонячної радіації в різні пори року.....	91
2.2 Результати експериментального та розрахункового дослідження інтенсивності сонячної радіації	102
2.3 Висновки.....	104
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ТА ВОЛОГІСНОГО СТАНУ СТІНОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІД ВПЛИВОМ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ	106
3.1 Розрахунковий метод дослідження температурного стану будівельних конструкцій з урахуванням впливу сонячного випромінювання	107
3.2 Температурно-вологісний стан стінових конструкцій будівлі при дії сонячного випромінювання	110
3.3 Скінчено-різницевий метод розв'язання рівнянь тепломасопереносу	133
3.4 Результати чисельного моделювання температурно-вологісного стану цегляної стіни з урахуванням сонячного випромінювання.....	140
3.5 Метод визначення рівноважного вологовмісту будівельних матеріалів огорожувальних конструкцій.....	150
3.5.1 Сутність методу побудови ізотерм сорбції.....	153
3.5.2 Результати чисельного визначення ізотерм сорбції.....	155
3.6 Висновки.....	158
РОЗДІЛ 4 ВПЛИВ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ТЕМПЕРАТУРНИЙ РЕЖИМ ПРИМІЩЕННЯ В ЗИМОВИЙ ПЕРІОД.....	159
4.1. Математична модель температурного режиму приміщення в зимовий період з урахуванням інтенсивності сонячного випромінювання	160
4.2. Результати чисельного моделювання	165
4.3 Висновки.....	170
ВИСНОВКИ.....	172
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	175
ДОДАТКИ.....	189

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

a – температуропровідність, $\text{м}^2/\text{с}$;

A – енергія активації, Дж;

B – денний кут;

C – питома ізобарна теплоємність, Дж/(кгК);

D – коефіцієнт дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$;

E_τ – питома ентальпія в момент часу τ , Дж/кг;

E_{sc} – сонячна постійна, Вт/м²;

f_V – диференційна функція розподілу пір по об'єму;

H – годинний кут, год;

H_1 – питома об'ємна інтенсивність випаровування, кг/(м³с);

H_v – питома об'ємна інтенсивність конденсації, кг/(м³с);

j – густина потоку маси, кг/(м²с);

K_1 – коефіцієнт проникності середовища для рідини;

m – коефіцієнт паропроникності, кг/(м·с·Па)

n – поточний день року;

P – тиск, Па;

q_{sol} – інтенсивність сонячного випромінювання, Вт/м²;

r – питома теплота випаровування (конденсації), Дж/кг;

R_v , R_a – питомі газові сталі пари і повітря, Дж/(кгК);

S – площа, м²;

T_s – явний сонячний час, год;

T – температура, К;

u – швидкість, м/с;

V – об'єм, м³;

w – об'ємний вміст компонента, кг/м³;

W – вологовміст, %;

Y_{v-a} – відносна масова концентрація водяної пари в повітрі, кг/кг;

α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²К);

β – кут висоти Сонця в градусах.

β_c – коефіцієнт масовіддічі, кг/(м²с);

δ – схилення Сонця;

ε – швидкості дисипації кінетичної енергії турбулентності;

ζ – коефіцієнт опору дифузії парів води в пористому матеріалі;

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(мК);

μ – молекулярна маса речовини, кг/моль;

Π – об'ємна пористість тіла;

ρ – густина, кг/м³;

σ – частка пор, що зайнята рідкою вологою;

τ – час, с;

φ – ступінь насичення парогазової суміші;

Le – число Л'юїса

Індекси:

a – повітря;

c – конвекційний;

cap – капілярний;

ef – ефективне значення;

g – газ;

gl – скляна огорожувальна конструкція;

i, j і k – порядкові номери кроків різницевої сітки по координатах і часу;

l – рідина;

$\min$ і $\max$ – мінімальне і максимальне значення параметра;

n – нормаль до поверхні;

p – рівноважний стан;

r – радіаційний;

ra – радіатор;

sat – насичений стан;

s – тверде пористе тіло;

sol – сонячний;

sur – тверда поверхня;

v – пара;

V – внутрішній об'єм матеріалу;

w – цегляна огорожувальна конструкція;

x, y, z – проєкції на осі декартової системи координат;

0 – початкове значення;

∞ – відстань від стіни.

ВСТУП

Актуальність роботи. В Україні витрати енергії на опалення і вентиляцію будівельних споруд складають більше 40% від загального споживання енергії, що значно вище, ніж в країнах ЄС. Це пояснюється недостатньо ефективними заходами по теплозбереженню огорожувальними конструкціями і нераціональним використанням енергоресурсів.

На практиці, при проектуванні систем опалення будівель та при оцінці потреб в тепловій енергії в процесі експлуатації будівель не враховуються зміна вологовмісту огорожувальних конструкцій та надходження теплоти сонячного випромінювання. Енергія Сонця істотно впливає на тепловологісний стан огорожень і внутрішніх приміщень будівель. Відомо, що в сонячні дні опалювального періоду в залежності від орієнтації будівлі до 30% теплоти в приміщеннях може генеруватись за рахунок сонячної радіації.

Результати експериментальних і розрахункових досліджень інтенсивності сонячного випромінювання, його впливу на тепловий стан огорожувальних конструкцій та теплонадходжень у внутрішні приміщення будівель демонструють роботи Б. Баска, Н. Фіалко, В. Дешка, Б. Давиденка, Л. Декуші, Л. Воробйова, С. Кудрі, В. Кучинського, Н. Мхитаряна, О. Підгорного, Т. Суржик, О. Сергійчука, Г. Фаренюка, та інших. Однак дослідження впливу добової зміни інтенсивності сонячного випромінювання на динаміку тепловологісного стану огорожувальних конструкцій та радіаційно-конвективних теплових потоків у внутрішніх приміщеннях будівель потребують подальшого розвитку.

Всі будівельні матеріали володіють сорбційними властивостями і при зміні температури і вологості оточуючого середовища, їх температура і вологовміст теж істотно змінюються. Підвищення вологовмісту матеріалів огорожувальних конструкцій погіршує теплозахисні характеристики будівель (ДБН В.2.6-31:2021).

Використання експериментальних методів для дослідження тепломасообмінних процесів в гетерогенних пористих системах, якими є огорожувальні конструкції, та у приміщеннях будівель, що знаходяться в умовах постійної зміни стану оточуючого середовища, спряжено з істотними технічними труднощами і матеріальними витратами.

Отже, розробка теплофізичних підходів та методів математичного моделювання для аналізу впливу інтенсивності сонячного випромінювання на динаміку зміни тепловологісного стану будівельних конструкцій і мікроклімату в опалювальних приміщеннях становить актуальну проблему, вирішення якої слугує зниженню навантаження опалювальних приладів та покращенню умов експлуатації будівель.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Представлені в дисертаційній роботі наукові результати були отримані в Інституті технічної теплофізики Національної Академії Наук України в процесі виконання науково-дослідних робіт: № 1. 1.7.1.863. «Енергомодельовання будівлі з врахуванням її конструктивних особливостей, систем енергозабезпечення, зовнішнього середовища та клімату». № ДР: 0115U003364 (2015р. – 2019 р.); № 2.1.7.1.899 «Розроблення науково-технічних засад модернізації систем централізованого тепlopостачання України згідно з вимогами до четвертого покоління цих систем», № ДР: 0120U101006; № 3.1.7.1.906 «Розроблення теплофізичних засад енергокліматичної безпеки систем енергозабезпечення у житловому секторі», № ДР: 0123U101696.

Мета і задачі дослідження. *Метою дисертаційної роботи є теплофізичне обґрунтування впливу сонячного випромінювання на тепловологісний стан огорожувальних конструкцій будівлі та мікроклімат приміщень.*

Виходячи з поставленої мети, були визначені *основні задачі дослідження:*

- на основі довгострокових експериментальних досліджень виявити закономірності зміни інтенсивності сонячного випромінювання на огорожувальних конструкціях різної орієнтації;

- розробити математичну модель перенесення теплоти і вологи через огорожувальну конструкцію будівлі за наявності сонячного випромінювання і виконати розрахунковий аналіз впливу сонячного випромінювання на температурний і вологий стан огорожувальних конструкцій;

- з використанням запропонованої математичної моделі динаміки зміни тепловологісного стану приміщень з урахуванням додаткового надходження теплоти від сонячної радіації виявити залежність характеристик цього стану від величини променевих потоків;

- розробити розрахунково-експериментальний метод визначення рівноважного вологовмісту будівельних матеріалів огорожувальних конструкцій.

Об'єкт дослідження – процеси тепло- і вологопереносу в стінових конструкціях будівель та опалюваних приміщеннях, що знаходяться під впливом сонячної радіації.

Предмет дослідження – вплив інтенсивності сонячної радіації на тепловологісний стан будівель.

Методи досліджень. Робота заснована на використанні експериментальних і теоретичних методів дослідження: експериментальний метод з використанням сучасного піранометра СР-М для дослідження інтенсивності сонячної радіації; методи математичного моделювання для дослідження процесів перенесення теплоти та вологи через стінову конструкцію будівлі з урахуванням дії сонячного випромінювання та температурного стану приміщення із застосуванням сучасних чисельних методів. Реалізація побудованих математичних моделей виконувалася за допомогою сучасної електронної обчислювальної техніки.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. На основі результатів комплексу виконаних експериментальних досліджень встановлено залежність інтенсивності сонячного випромінювання від орієнтації сприймаючої поверхні у різні пори року на широті м. Києва.

2. Вперше встановлено закономірності формування тепловологісного стану багатошарової стінової конструкції за умов зміни потоків сонячної радіації та теплового режиму зовнішнього середовища в добовому циклі.

3. Вперше теоретично виявлено і обґрунтовано ефект обернення теплового потоку в огорожувальній конструкції будівлі під впливом сонячного випромінювання в результаті зміни положення температурного мінімуму від зовнішньої поверхні стіни до її внутрішніх шарів. 4. Запропоновано новий розрахунково-експериментальний метод визначення рівноважного вологовмісту капілярно-пористих матеріалів і побудови ізотерм сорбції-десорбції.

5. Побудовано математичну модель температурного режиму приміщення в опалювальний період з урахуванням додаткового теплового надходження на внутрішні поверхні стін та підлогу від сонячного випромінювання через віконні прорізи;

6. На основі запропонованої математичної моделі одержано нові дані щодо впливу сонячної радіації на аеродинаміку повітряних потоків і тепловий стан приміщення. Встановлено, що в зимовий період за рахунок вказаного додаткового теплонадходження, підвищення температури протилежної вікну стінки може підвищуватись на 15–17 °С, при цьому температура в приміщенні збільшується 2–3 °С.

Достовірність результатів. Забезпечується коректністю математичних постановок задач і фізичних припущень, а також порівняльним аналізом теоретичних і експериментальних результатів. Точність і надійність результатів експерименту зумовлена використанням сучасного приладу вимірювання з комп'ютерною обробкою даних.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Одержано експериментальні дані про надходження потоків сонячної радіації є базовою інформацією при проєктуванні та ефективній експлуатації активних і пасивних сонячних систем.

2. Результати виконаних досліджень тепловологісного стану огорожувальних конструкцій з урахуванням сонячної радіації слугують підвищенню рівня адекватності як оцінок теплових втрат через огорожувальні конструкції так і вибору матеріалу та товщини шару ізоляції стінових конструкцій.

3. На основі досліджень впливу сонячного випромінювання на температурний стан приміщень обґрунтовано можливість зменшення теплового навантаження на опалювальні пристрої.

4. Запропонований метод побудови ізотерми сорбції-десорбції може широко використовуватись для визначення рівноважного вологовмісту пористих, зокрема, будівельних матеріалів для встановлення температурно-вологісних умов їх виробництва, зберігання та експлуатації.

5. Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі Київського національного університету будівництва і архітектури в освітніх програмах «Теплогазопостачання та вентиляції» та «Теплоенергетика обладнання хімічних виробництв та підприємств будівельних матеріалів», а також впроваджено підприємством ПП «Ірпіньтеплосервіс» в робочому проєкті «Капітальний ремонт будівлі спортивного залу Державного закладу професійної (професійно-технічної) освіти зі специфічними умовами навчання «Академія патрульної поліції» за адресою м. Київ, вул. Святослава Хороброго, 9»: при проєктуванні на даху спортивного залу сонячної фотовольтаїчної станції для визначення кута нахилу панелей, з пріоритетом роботи в зимовий період, що уточнювався на основі даних експериментальних досліджень по інтенсивності сонячного випромінювання на поверхні різної орієнтації; при розробці заходів з енергозбереження для визначення товщини шару захисних покриттів огорожувальних конструкцій на базі математичної моделі тепловологопереносу в огорожувальних конструкціях з урахуванням сонячної радіації, що підтверджується відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. Аналіз стану проблеми, алгоритми та обчислювальні програми, результати чисельного моделювання, формулювання та обґрунтування методики обробки даних обчислювальних експериментів та зіставлення їх з експериментальними даними інших авторів, фізичне моделювання та обробка результатів експерименту належать здобувачу. Вибір напрямку досліджень, постановка завдань, розробка математичних моделей та методів розрахунку, формулювання наукових положень та висновків, підготовка матеріалів до публікації здійснювалися під керівництвом доктора технічних наук, старшого наукового співробітника Б.В. Давиденко.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи доповідалися й обговорювалися на Міжнародному конгресі «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», Львів, 2016; на X, XI Міжнародних конференціях «Проблеми промислової теплотехніки», Київ, 2017, 2019; на I, II, III, IV Міжнародних науково-практичних конференціях «Хімічна технологія та інженерія», Львів, 2017, 2019, 2021, 2023; на XV міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання", Київ, НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018; на XVIII міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв» Одеса, 2020; 2nd International scientific and practical conference "Science and technology: challenges, prospects and innovations", Osaka, Japan, 2024.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи викладені у 26 друкованих працях, з яких 3 статті, що входять до наукометричної бази Scopus і Web of Science, 5 статей у наукових фахових виданнях України, 2 колективні монографії, 10 тез доповідей на наукових конференціях.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел із __ найменувань. Обсяг дисертації становить __120__ сторін, 22__ рисунка, 2 таблиці.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ В ОБЛАСТІ ВИМІРЮВАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

1.1 Сонячна енергія та перспективи її використання

В Україні витрати енергії на опалення, вентиляцію і кондиціювання будівель складають більше 40% від загального споживання енергії, що значно вище, ніж в країнах ЄС. Це пояснюється недостатньо ефективними заходами по збереженню теплової енергії будівельними конструкціями і нераціональним використанням енергоресурсів [1].

Сучасною тенденцією енергозбереження є створення і використання альтернативних джерел енергії, серед яких енергія Сонця за обсягами ресурсів та поширеності займає значуще місце [2 – 4] в першу чергу тому, що сонячне випромінювання представляє практично невичерпне джерело енергії. Потужність випромінювання Сонця складає 175000 ТВт [3,4] і електромагнітне випромінювання фотосфери Сонця поширюється у космічному просторі зі швидкістю світла. Біля 30 % сонячного випромінювання – це [4] 52000 ТВт – відбивається в космічний простір, решта, близько 70 % сонячного випромінювання, потужністю 122410 ТВт є основною складовою енергетичного балансу Землі [3, 4]. Загальна енергія, що поглинається атмосферою та поверхнею Землі протягом року, майже в 11000 разів перевищує річне споживання енергії на планеті. Частково ця енергія поглинається атмосферою, сушею та океаном і перетворюється в теплову енергію, невисокий потенціал якої можна трансформувати за допомогою різних технічних засобів [4], наприклад термосифонів або теплових насосів. Значна частина енергії, близько 40000 ТВт, витрачається на випаровування, циркуляцію і випадання води у вигляді дощів, чим обумовлюється течія річок, течій морів та океанів. Водні потоки живлять гідроелектростанції. Близько 370 ТВт сонячної енергії

спричиняє температурні перепади, завдяки яким виникає вітер, необхідний для вітрових турбін. Найменша частина енергії Сонця – 0,03 % від загального потоку енергії що складає приблизно 40 ТВт, поглинається рослинами і, завдяки проходженню в них процесу фотосинтезу, накопичується у вигляді органічних сполук. Згодом деякі з них можуть бути перероблені на біомасу для отримання теплової та електричної енергії. Таким чином, енергія вітру, води і біомаси є похідними сонячної енергії.

Можливості для використання сонячної енергії є сприятливими на більшій частині поверхні Землі і в якості місцевого джерела теплоти, і після перетворення її в інші види енергії. На території України сумарне річне надходження сонячної радіації оцінюється на рівні $720 \cdot 10^{12}$ кВт·год. Цей потенціал є еквівалентним 88,4 млрд т у.п. [4]. Інтенсивність сонячного випромінювання не є рівномірною по всій території України (рис. 1.1, [4, 5]), але навіть для IV зони, яка охоплює центральну та північну частини нашої країни є доволі високою і достатньою для розвитку впровадження геліосистем для генерування тепло- та електроенергії.



Рисунок 1.1 – Потенціал сонячної енергії в Україні

Період активного використання сонячної енергії в північних регіонах України триває з квітня по вересень, а у південних – з березня по жовтень. Це складає 1900–2400 годин в рік [4].

Взагалі, величина густини потоку сонячної радіації залежить від широти місцевості, прозорості атмосфери, хмарності, характеристик земної поверхні, від часу доби і пори року. Відповідно річне потрапляння сонячної радіації на 1 м² поверхні Землі збільшується з Півночі на Південь. Річний технічно-досяжний енергетичний потенціал сонячної енергії в Україні є еквівалентним 6 млн т. умовного палива і його використання дозволить заощадити біля 5 млрд. м³ природного газу [3].

Отже, збільшення споживання сонячної енергії в нашій країні дозволить зменшити обсяги використання традиційних джерел енергії на потреби електро- та гарячого водопостачання в теплу пору року, а врахування теплонадходжень за рахунок сонячної радіації при проектуванні систем опалення і вентиляції – в опалювальний період.

Теплову енергію Сонця через пряме нагрівання акумулюючих поверхонь використовують двома способами – через *пасивні* і *активні* сонячні системи [5]. Термін «сонячні системи» характеризує різні технічні або архітектурно-конструктивні рішення, спрямовані на використання енергії Сонця для потреб опалення, охолодження і гарячого водопостачання.

Принципова особливість *пасивних* сонячних систем полягає у тому, що вони не потребують використання обладнання, працюючого із використанням зовнішніх джерел енергії, таких як вентилятори, насоси, і в яких акумулювання і подача теплоти здійснюється виключно природньою циркуляцією, теплопровідністю і випромінюванням.

Пасивна сонячна система сприймає сонячне випромінювання прямо всередині приміщень і трансформує його в низькотемпературне тепло для обігрівання внутрішнього простору [5]. Енергоефективні вікна, оранжереї, сонцезловлювальні поверхні розташовують у максимально вигідному відносно

сонця положенні, Стіни, підлогу, стелі виготовляють з теплоізоляційних матеріалів з якомога меншим значенням ефективного коефіцієнта теплопровідності.

До **активних** сонячних систем відносяться системи, в яких за допомогою технічних пристроїв здійснюється перетворення сонячної радіації або в теплоту – для цього використовуються *сонячні колектори*, або в електричну енергію, що здійснюють *фотоелектричні системи* [3, 6].

Існують різні типи сонячних колекторів, але всі вони базуються на однаковому принципі функціонування: використовується поверхня темного кольору, що наближає її до абсолютно чорного тіла, яка поглинає сонячну енергію і передає теплову енергію рідкому або газовому теплоносію [2].

Фотоелектричні сонячні системи перетворюють в електроенергію напівпровідниковими перетворювачами, які володіють селективною спектральною чутливістю [4].

Розглянемо питання трансформації і використання сонячного випромінювання більш детально.

1.1.1 Пасивне використання сонячної енергії

Використання сонячних систем у будівництві дозволяє створювати енергозберігаючі «сонячні будинки» з достатньо малим енергоспоживанням. Якщо комфортні тепловологісні умови в приміщеннях будівлі, а також гаряче водопостачання забезпечуються виключно функціонуванням пасивних сонячних систем, використовується термін «пасивні будинки».

Пасивні сонячні системи не мають спеціальних “активних” механізмів для перетворення сонячної енергії в інші види енергії. В основі їх функціонування лежать фізичні закони акумулювання і передачі теплоти. Деякі типи пасивних сонячних систем представлено на рис. 1.2 [5].

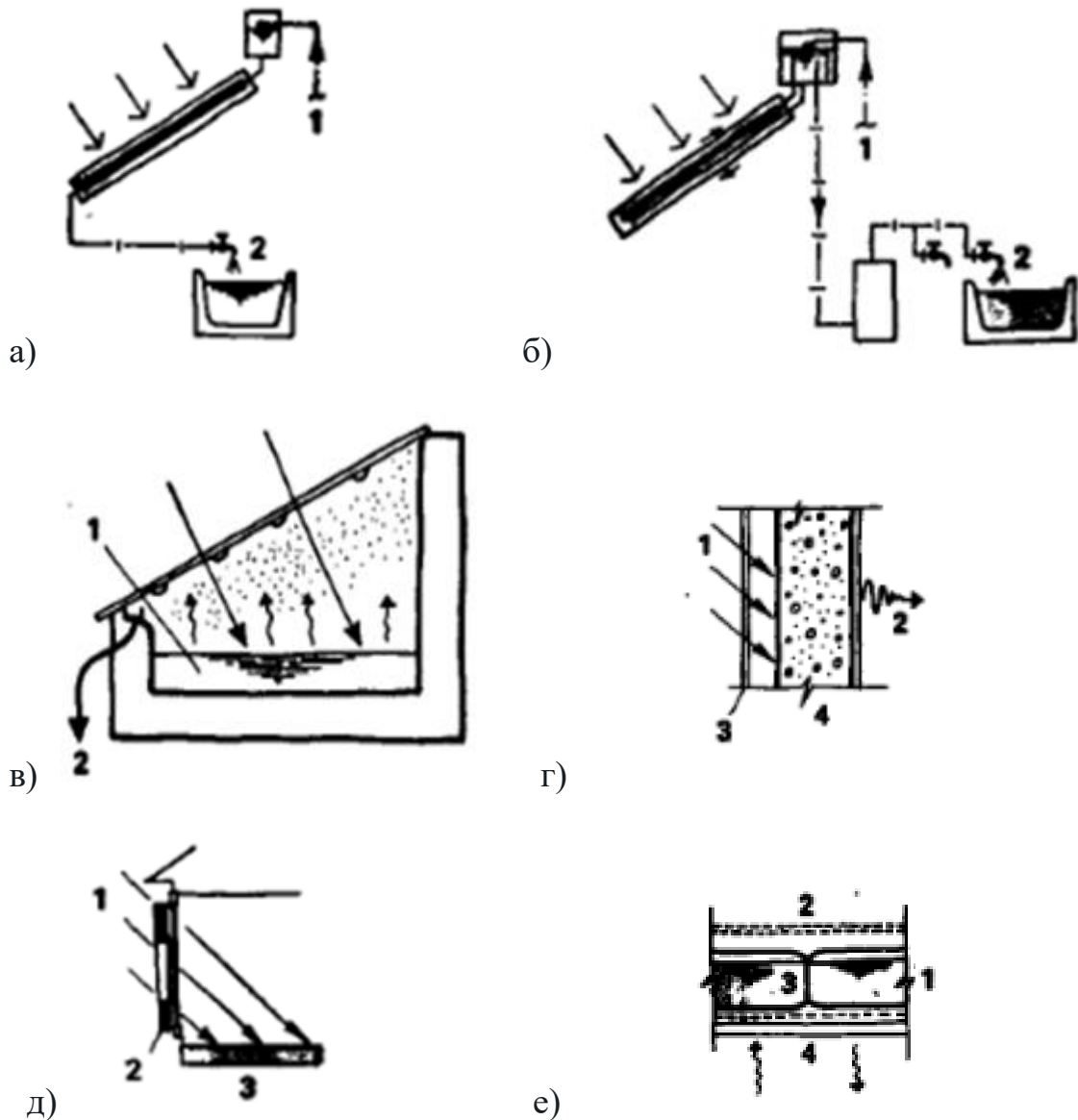


Рисунок 1.2 – Типи пасивних сонячних систем опалення і
теплохолодопостачання [5]:

а) водонагрівач з розімкненою системою безперервної подачі води (1 – подача живильної води; 2 – розподіл гарячої води); **б)** водонагрівач з природньою циркуляцією води (1 – подача живильної води; 2 – розподіл гарячої води); **в)** опріснювач сонячний (1 – морська вода; 2 – дистильована вода); **г)** елемент теплоакumuлюючий – стіна Тромба (1 – сонячне випромінювання; 2 – теплове випромінювання; 3 – скло; 4 – бетон); **д)** система накопичення тепла (1 – скляне вікно; 2 – теплоізоляційна перегородка, яка вночі зачинена; 3 – акумулююча поверхня); **е)** теплоакumuлюючо-випромінююча водяна система (1 – пластмасова ємність; 2 – пересувна теплоізоляційна панель; 3 – вода; 4 – стеля).

Вдале поєднання різних пасивних систем, а також підбору спеціальних матеріалів для стін, стелі, підлоги, застосування потужної теплоізоляції, виконання масивної підлоги, спрямування віконних конструкцій на південь [6] і т.і. дозволяє створювати комфортні пасивні сонячні будинки з мінімальними витратами енергії на опалення, вентиляцію і гаряче водопостачання. Збільшення масиву стіни (або підлоги), що освітлюється і нагрівається сонцем зможе накопичувати більшу кількість теплової енергії, надлишок якої буде віддаватись в приміщення вночі.

Перші будинки з залученням пасивних сонячних систем почали з'являтися у 30-х роках минулого століття. Це були переважно великі віконні конструкції, орієнтовані на південь [8]. Розробка нових ефективних способів пасивного акумулювання сонячної енергії (рис. 1.2) і розширення напрямків її використання (опалення, гаряче водопостачання) дозволила вдосконалювати проекти сонячних будинків, суттєво зменшуючи енерговитрати на їх експлуатацію [8–10]. Початком пасивного будівництва вважається травень 1988 року [11]. В цей період публікуються роботи [12, 13] німецьких вчених В. Феїста (*Wolfgang Feist*) та Б. Адамсона (*Bo Adamson*), метою яких було дослідження існуючих підходів підвищення енергоефективності сонячних будівель та встановлення чітких критеріїв пасивного будівництва. У 1991 році В. Феїст і Б. Адамсон розпочали будівництво першого демонстраційного проекту енергозберігаючого будинку в Дармштадті на чотири родини, який і до сьогодні експлуатується з використанням не більше 15 кВт-год/м² електроенергії на рік, що еквівалентно 1,5 л дизельного палива або 1,5 м³ газу. Будинок оснащений комп'ютерною системою збору даних вимірювань.

Після суворої зими у 1997 році В. Феїст у Звіті [10] по результатах аналізу «міцності» пасивного будинку зазначає, що сформульовані в [8, 9] критерії енергозбереження потребують перегляду і визначає дві концепції енергоефективного будівництва:

низькоенергетичний будинок (NEH), в якому завдяки покращеній теплоізоляції огорожуючих конструкцій, двокамерному теплоізоляційному склінню з $k \approx 1,3 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ та температурним перепадом $25 \text{ }^\circ\text{C}$ при температурі зовнішнього повітря $-10 \text{ }^\circ\text{C}$, економічній системі витяжної вентиляції можна зменшити річне енергоспоживання від 30 до 70 кВт-год/м². Однак забезпечити комфортні теплові умови таких будинків без використання радіатора під вікном та традиційної системи водяного опалення не представлялось можливим.

пасивний будинок – з оптимізованим пасивним використанням сонячної енергії, в якому теплоізоляція огорожуючих конструкцій ще більш покращена, трикамерне теплоізоляційне скління з криптоновим наповненням ($k \approx 0,7 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$) забезпечує температурний перепад $27 \text{ }^\circ\text{C}$ при температурі зовнішнього повітря $-10 \text{ }^\circ\text{C}$) не потребує встановлення радіатора під вікном, якщо висота вікна не перевищує 2,5 м, вентиляція з рекуперацією відпрацьованого тепла гарантують комфортні умови навіть без водяного опалення.

Сучасні стандарти пасивного будинку [11] були розроблені в [12 – 14] і передбачають (рис. 1.3):

1. використання тільки високотеплоізоляційних матеріалів;
2. надійну ізоляцію віконних рам та потрібне скління;
3. якісні матеріали, дизайн та будівництво;
4. відсутність містків холоду;
5. герметизацію всіх конструкцій будівлі;
6. вентилявання з рекуперацією теплоти.

Дані стандарти є актуальними у всіх кліматичних зонах та забезпечують мінімальне споживання енергії.

Дотримання зазначених стандартів при проєктуванні пасивних будинків передбачає проведення детальних досліджень теплового стану приміщень, з урахуванням теплопровідності багат шарових стінових і стельових конструкцій

[14], потужності внутрішніх і зовнішніх теплонадходжень через віконні і огороджувальні поверхні.

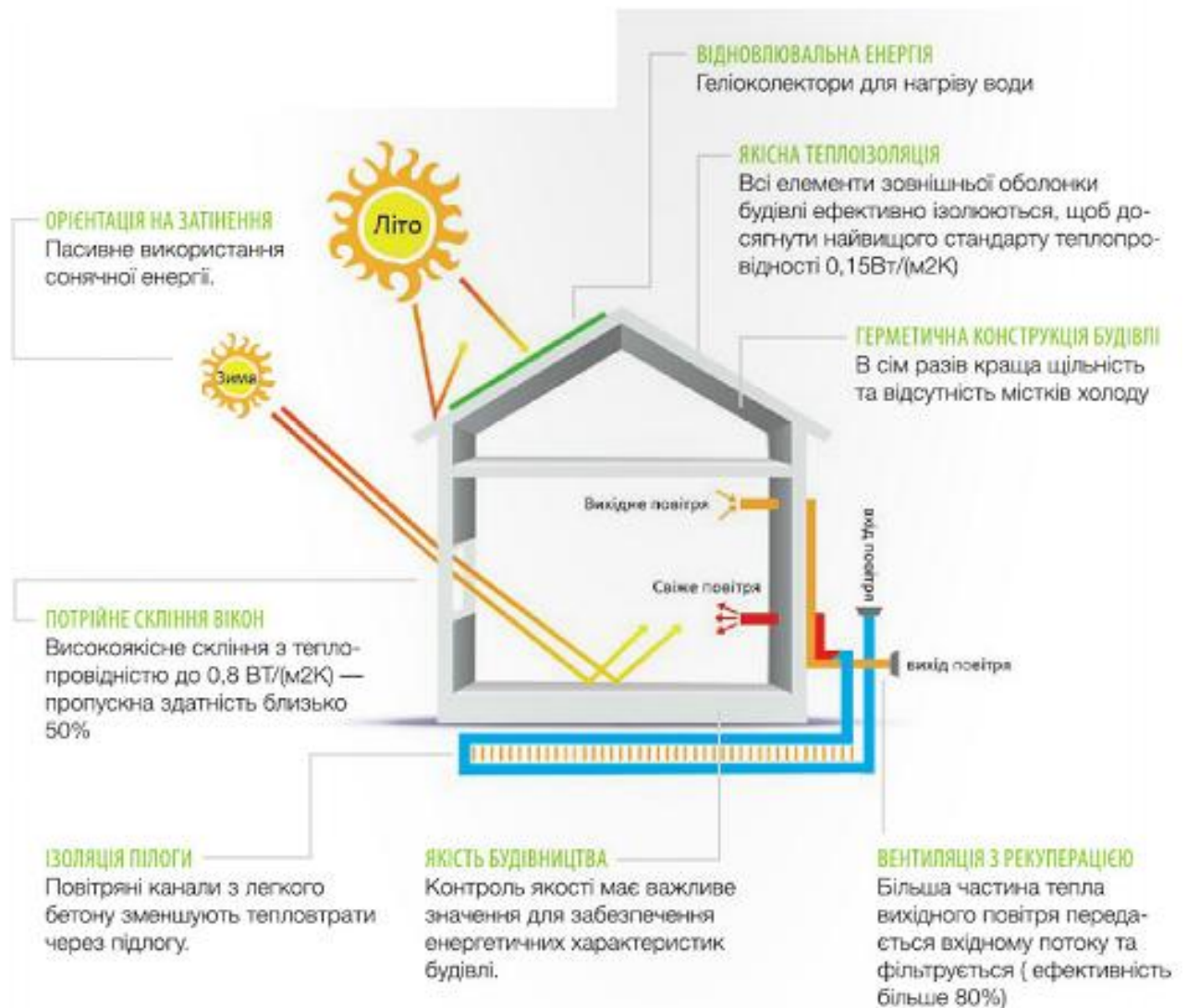


Рисунок 1.3 – Основні елементи сонячного пасивного будинку [11].

Короткочасні прогнози світового будівництва [2] передбачають, що 70% приватних і 60 % комерційних будівель будуть застосовувати пасивну систему обігріву. Ці припущення базуються на статистичних даних про зведення до 2000 року в Північній Америці близько 250 000 будинків з повним сонячним обігрівом і понад 1 млн споруд, які використовують пасивні методи обігріву частково. Обладнання будинків геліоустановками пасивного типу здорожує

будівництво в середньому на 5–10 %, проте експлуатаційні витрати знижуються на 30–40 %, що забезпечує окупність таких будівель за 3–7 років [2].

В Україні на даний час значна кількість проєктних організацій пропонує послуги у створенні пасивних будинків. Цей напрямок будівництва набирає обертів і потребує створення нормативної та державної підтримки.

1.2.2 Активне використання сонячної енергії

Сонячні колектори і їх види. Сонячні колектори застосовують для підігріву води та підтримання опалення, крім того перетворена сонячна енергія активно використовується для сушіння деревини [15] сільськогосподарської продукції [16], функціонування пересувних холодильних установок [17], та практично у всіх процесах, що базуються на використанні теплоти [4].

Основним принципом класифікації сонячних колекторів є класифікація їх за конструкцією [3] – плоскі низькотемпературні колектори, вакуумні колектори середньо та високотемпературні колектори та фокусуючі сонячні колектори.

Плоскі сонячні колектори є досить поширеними для побутових водонагрівальних і опалювальних систем є плоскі сонячні колектори. Конструкція плоского колектору показана на рис. 1.4.

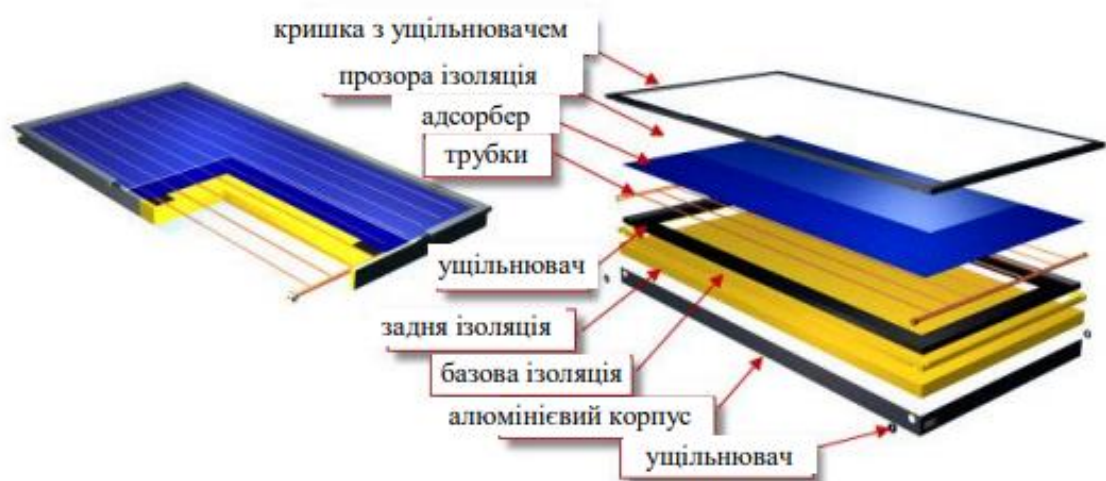


Рисунок 1.4 – Основні елементи плоского сонячного колектору [3]

Абсорбер сонячного колектору покривається спеціальним покриттям, яке наближає його властивості до абсолютно чорного тіла, поглинає сонячну енергію і розігрівается, віддаючи теплоту теплоносію, що циркулює в трубках (рис. 1.5). В якості теплоносія можуть використовуватись і рідини, і повітря. Прозора ізоляція з гартованого скла з низьким вмістом заліза та теплоізоляційний шар знижують втрати теплової енергії.

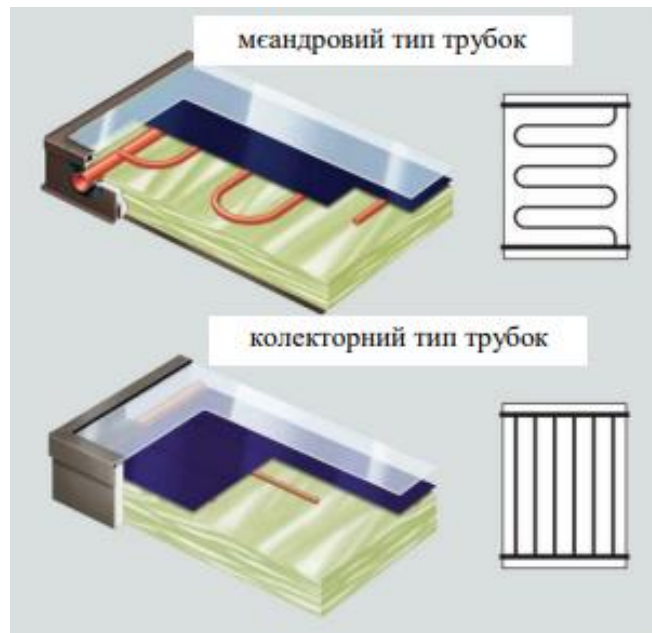


Рисунок 1.4 – Типи трубок плоских сонячних колекторів [3]

До недоліків традиційних плоских сонячних колекторів можна віднести істотну залежність ефективності їх роботи від погодних умов, яка в холодну, похмуру і вітряну погоду істотно знижується, що робить доцільним застосування плоских колекторів у регіонах з теплим сонячним кліматом. Крім того, добові перепади температур викликають конденсацію в системі, яка призводить до передчасного зносу внутрішніх матеріалів, погіршення експлуатаційних якостей системи та виходу її з ладу [18].

Ці недоліки усуваються шляхом використання вакуумованих колекторів.

Сонячні трубчасті вакуумні колектори є найбільш поширеними в побутовому секторі [3, 18] і забезпечують нагрівання води до достатньо високих температур. Їх класифікують за конструктивними особливостями

скляних трубок і теплових каналів. Використовуються коаксіальні і пір'яні трубки (рис. 1.5).

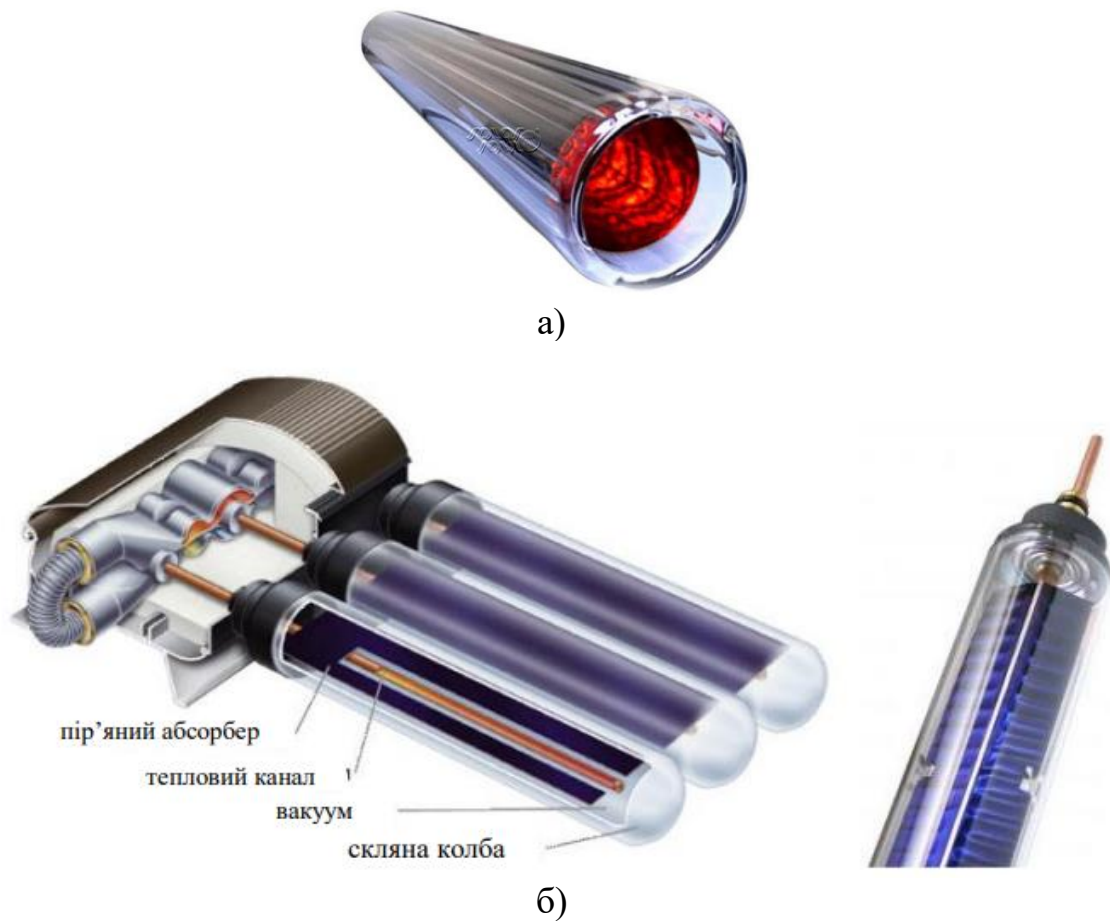


Рисунок 1.5 – Види трубок сонячних трубчастих вакуумних колекторів:

а) коаксіальні; б) пір'яні

Коаксіальна трубка представляє вакуумовану в середині подвійну скляну колбу, з поглинальним покриттям її внутрішньої стінки. Відповідно теплота передається безпосередньо від скляної колби. Пір'яна трубка є моностінною скляною колбою, в середині якої проходить вакуумований тепловий канал. Теплові канали можуть бути звичайні прямоточні або типу «теплова труба».

В першому випадку сонячна радіація потрапляє крізь зовнішню скляну трубку на внутрішню трубку-поглинач, яка нагрівається і передає теплоту теплоносію через оребрену поверхню зазвичай алюмінієвої трубки. Гаряча рідина циркулює через теплообмінник і нагріває воду в баку-накопичувачі.

Сонячний трубчастий вакуумний колектор з тепловим каналом типу «теплова труба» займає більшу частину ринку сонячних колекторів [3]. Передача теплоти в таких колекторах відбувається шляхом фазових перетворень: нагрітий під дією сонячного випромінювання теплоносіїв випаровується на нижній частині зазвичай оребреної мідної теплової трубки, поглинаючи при цьому теплоту в кількості теплоти випаровування теплоносія і конденсується у верхній частині, де віддає цю теплоту воді, що нагрівається. Сконденсований теплоносіїв знову перетікає вниз і процес повторюється.

Поєднання різних типів вакуумних скляних трубок і теплових каналів може бути будь-яким [3].

Вакуум в скляній трубці створює надійну теплоізоляцію, мінімізуючи тепловтрати колектору, а також захищає поглинач і тепловий канал від несприятливих зовнішніх впливів. В той же час, досить складний процес теплопередачі обумовлює показники оптичного ККД η колектора в межах 65 % – 80 %. Найбільш ефективним поєднанням є пір'яна трубка з прямоточним тепловим каналом [3] (рис. 1.6). Але при заміні пошкоджених трубок потрібно зливати теплоносіїв всієї геліосистеми. Крім того, ці колектори мають досить високу ціну.

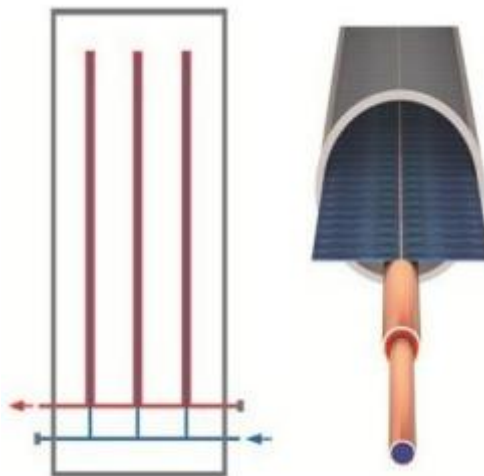


Рисунок 1.6 – Схема циркуляції теплоносія в вакуумному колекторі з пір'яною трубкою і прямоточним тепловим каналом [3].

Фокусуючі сонячні колектори застосовують різноманітні системи дзеркал складної конфігурації або лінз для концентрації потоків сонячного випромінювання, що спрямовуються на поглинальну поверхню плоских або трубчастих поглиначів (рис. 1.7) [3]. Форма дзеркал може бути параболічною або циліндричною.

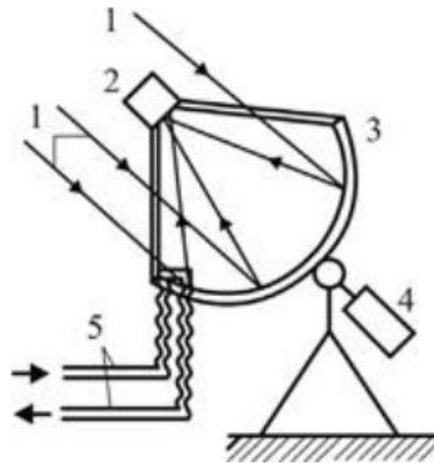


Рисунок 1.7 – Конструкція концентруючого параболічного геліоприймача: 1 – сонячні промені; 2 – сонячний колектор; 3 – дзеркало; 4 – механізм приводу системи стеження; 5 – трубопроводи подачі і відведення теплоносія [3]

Концентруючі сонячні колектори характеризуються малими габаритами. Для ефективної роботи вони повинні бути орієнтовані перпендикулярно до напрямку падіння сонячних променів, тому оснащені системами стеження і пристроями, які обертають колектори за рухом сонця.

Перевагою концентруючих колекторів є здатність нагрівати воду до температур 100 °С. Недоліками є висока вартість конструкції; необхідність постійного очищення відбиваючих поверхонь від пилу, можливість функціонувати лише вдень і відповідно потреба використання акумуляторів великої ємності, досить значні енерговитрати на привід системи стеження. Зазначені недоліки стримують широке використання концентруючих сонячних колекторів.

На принципі концентрування сонячних променів створюють значно дешевші технологічно нескладні сонячні колектори вузького призначення [20], такі як сонячні печі для приготування їжі або кип'ятіння води, сонячні дистилятори для отримання дистильованої води практично з будь-якого джерела, що є актуальними пристроями для польових умов в зоні бойових дій.

Найбільш високотехнологічним елементом в конструкції сонячних колекторів є поглинаюче покриття [21]. Пофарбований у чорний колір абсорбер забезпечує поглинання сонячної енергії до 90 %. Підвищити цей відсоток дозволяє використання додаткових селективних покриттів, до складу яких входить шар аморфного напівпровідника, який наноситься на металеву основу пластини.

Ефективність поглинаючих покриттів сонячних колекторів оцінюється *коефіцієнтом поглинання α* – що представляє відношення поглиненої енергії до падаючої і зазвичай лежить в межах $0,8 \leq \alpha \leq 0,98$ та *коефіцієнтом випромінювання ε* – відношення енергії, що випромінюється до енергії, що була поглинена поверхнею, $0,95 \leq \varepsilon \leq 0,02$. Для порівняння характеристик різних видів поглинаючих покриттів залучається *коефіцієнт селективності*, що представляє відношення α/ε , значення якого чим вище, тим кращими характеристиками володіє поглинаюча поверхня.

Сучасні селективні покриття мають високі значення α/ε , що сприяє підвищенню ККД сонячних колекторів і більш ефективному їх функціонуванню в холодний період року.

Фотоелектричні сонячні системи. Фотоелектричні сонячні системи дозволяють забезпечувати електрикою будь-які віддалені райони або окремі господарства.

Перетворення сонячного світла в електричну енергію відбувається в фотоелементах, виготовлених з напівпровідникових матеріалів. До 90% фотоелементів, що виробляються у світі – виробляються з використанням кристалічного кремнію. Також використовується технологія тонких плівок, в

яких тонкий шар напівпровідникового матеріалу наноситься на скляну, полімерну або металічну поверхню [2–4, 22, 23]. Напівпровідникові перетворювачі володіють селективною спектральною чутливістю. Робота фотоелементів базується на фотоэффекті у напівпровідникових структурах з р-n переходами. У шарі n-типу присутній надлишок електронів, а в шарі р-типу – надлишок позитивно заряджених дірок [4–7, 24].

Сонячний фотоелектричний елемент представляє дві тонкі монокристалічні або полікристалічні напівпровідникові пластинки n-типу і р-типу з металевого кремнію, що з'єднані між собою. Фотони сонячного світла, попадаючи на n-пластину (рис.1.8), активізують атоми кремнію обох пластинок, що починають випускати електрони, на місці яких залишаються вакансії – позитивно заряджені дірки. Таким чином утворюються нерівноважні електрон-діркові пари. Електрони, що генеруються в р-пластинці проходячи крізь площину контакту пластин (площини р-n переходу) під дією потенціалу існуючого у цій площині внутрішнього електричного поля, виносяться у n-пластину.

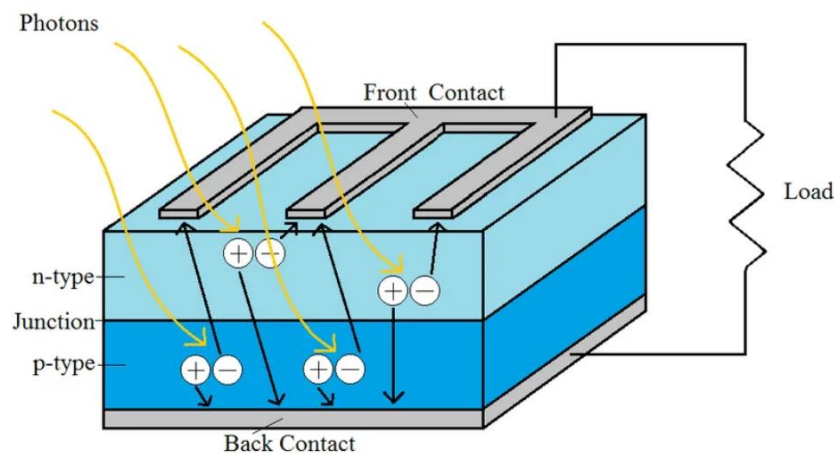


Рисунок 1.8 – Схема фотоелектричного елемента

При переміщенні електрони втрачають енергію і заповнюють дірки у n-пластині, яка набуває надлишкового негативного заряду, р-дірки переміщуються у р-пластину, збільшуючи її позитивний заряд і у зовнішньому ланцюзі з'являється напруга U , що призводить до виникнення постійного

електричного струму I [5, 7], який надалі необхідно перетворювати на змінний [6]. Величина електричного струму, що виникає за рахунок фотоефекту, є пропорційною інтенсивності сонячного випромінювання. Для посилення сили струму з великої кількості фотоелементів, що паралельно і послідовно з'єднані, збирають сонячні батареї.

Коефіцієнт корисної дії фотоелектричної сонячної системи визначається відношенням електричної потужності N_e , Вт до інтенсивності сонячного випромінювання q , Вт/м²

$$\eta = \frac{N_e}{q \cdot S} \cdot 100\% = \frac{U \cdot I}{q \cdot S} \cdot 100\%,$$

де S – площа поверхні фотоелементу, що сприймає сонячне випромінювання.

Ефективність перетворення енергії у фотоелектричних елементах, створених на основі кристалічного кремнію є найбільшою і досягає 22% [6]. Покриття кремнієвих пластин хімічними речовинами, що зменшують світло відбиття (нітридом кремнію або діоксидом титану) [6, 23] забезпечує додаткове підвищення ККД.

Сонячні фотоелектричні системи прості у використанні і не мають рухомих механізмів, забезпечують екологічно безпечний спосіб вироблення електричної енергії в різних діапазонах потужності. До недоліків таких систем слід віднести те, що зростання потужності сонячної електростанції потребує збільшення кількості сонячних батарей, для розміщення яких необхідні великі площі відкритих сонцю територій [6, 7]. Проблема зменшення площ територій вирішується проектуванням автономних сонячних електростанцій баштового типу [25], баштового типу що розміщуються на поверхонь водойм [26].

В умовах сьогодення, коли зруйновано значну частину українських ТЕЦ, впровадження сонячних колекторів і сонячних електричних станцій дозволять принаймні частково вирішити проблему теплоелектрозабезпечення комунальної і промислової галузей. При проектуванні сонячних колекторів необхідно спиратись на дані по інтенсивності сонячного випромінювання, яку можна очікувати в різні пори року у даній кліматичній області.

1.2 Методи дослідження інтенсивності сонячного випромінювання

1.2.1 Експериментальні методи дослідження. Прилади для вимірювання сонячної радіації

Експериментальні методи дослідження інтенсивності сонячної радіації дозволяють оцінювати кількісні характеристики випромінювання в залежності від визначальних факторів, таких як напрямок поширення сонячного випромінювання, кліматичних зон, нахилу теплосприймаючих поверхонь, пори року, часу протягом доби. Важливість цієї проблеми підтверджує значна кількість модифікацій спеціальних приладів та пристроїв для вимірювання потоків сонячного випромінювання.

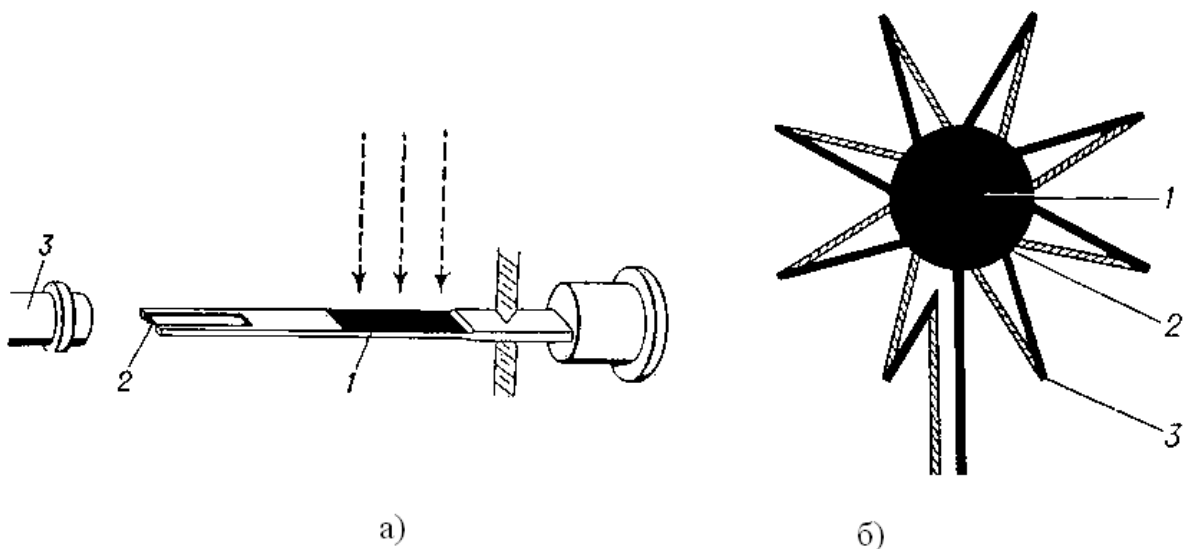
Сумарна сонячна енергія складається з прямої сонячної радіації, яка безпосередньо досягає поверхні Землі, і дифузної (розсіяної) сонячної радіації, яка спочатку поглинається атмосферним повітрям і вже у розсіяному вигляді досягає поверхні Землі. В залежності від того, який тип сонячної радіації фіксується, розрізняються вимірювальні прилади.

Вимірювання прямої сонячної радіації здійснюється **піргеліометрами**. Інтенсивність повного потоку сонячної енергії може бути виміряна **піранометрами** або **соляриметрами**, а інтенсивність прямої сонячної радіації – **актинометрами**.

Принцип дії **актинометра** [27] заснований на поглинанні падаючої сонячної радіації зачерненою поверхнею і перетворенні її енергії на теплоту. Актинометри є «відносними приладами», оскільки про інтенсивність випромінювання судять по різним явищам, які відбуваються під впливом дії сонячного випромінювання. Наприклад, принцип дії актинометру Міхельсона (рис. 1.9(а)) заснований на нагріванні сонячними променями зачерненої сажею біметалічної пластинки (1), спресованої з заліза і інвару. При нагріванні залізна частина пластини подовжується, а інвар майже не відчуває теплового розширення, внаслідок чого пластинка вигинається і по величині вигону

оцінюють інтенсивність сонячної радіації. Зафіксувати переміщення кварцової нитки (2), розташованої на кінці пластинки, допомагає мікроскоп (3).

У термоелектричному актинометрі Савінова-Янишевського приймальною частиною (рис.1.9 б) є тонкий зачернений із зовнішнього боку срібний диск (1), до внутрішньої сторони якого прикріплюються центральні спаї (2) термоелементів. Термоелемент представляє зигзагоподібно з'єднані смужки манганіну і константану. Периферійні спаї (3) прикріплюються до мідного кільця в корпусі приладу. Прикріплені на приймальну поверхню сонячних променів центральні спаї нагріваються, в той час як периферійні – затінені. В результаті виникає термоелектричний струм, пропорційний різниці температур центральних і периферійних спаїв, який в свою чергу є пропорційним потоку сонячної радіації, що вимірюється. Для проведення спостережень, актинометр слід орієнтувати так, щоб теплоприймальний срібний диск був націлений на Сонце. Відповідно для визначення сумарної кількості сонячного випромінювання протягом тривалого часу, прилад кожні 7 хв повинен корегувати положення диску відносно сонця [28].

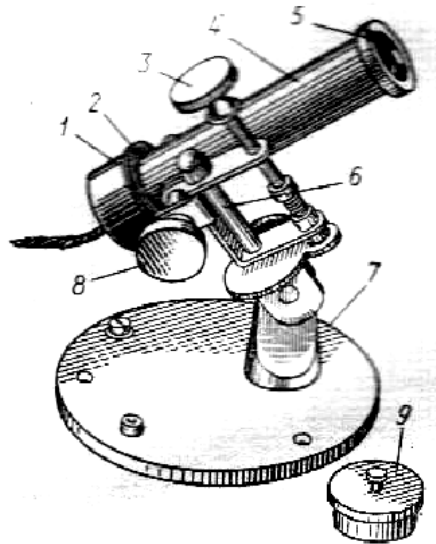


1 – біметалічна пластинка,
2 – кварцова нитка; 3 – мікроскоп

1 – зачернений срібний диск,
2 і 3 – центральні і периферійні спаї

Рисунок 1.9 – Чутливі елементи актинометрів Міхельсона (а) та Савінова-Янишевського (б).

Конструкція актинометру Савінова – Янишевського (рис. 1.10) підходить для метеоспостережень [29], однак у разі необхідності визначення кількості сонячної енергії, що надходить на нерухому поверхню, наприклад, поверхню сонячного колектору, результати вимірювання не відповідають реальним потокам сонячного випромінювання на плоску поверхню колектору [30, 31].



1 – чашка, 2 – нижнє кільце, 3 – ручка для правильного встановлення актинометра, 4 – трубка, 5 – верхнє кільце, 6 – паралактичний штатив, 7 – стійка, 8 – ручка для правильного встановлення актинометра, 9 – знімна кришка

Рисунок 1.10 – Актинометр Савінова-Янішевського [29]

У [30] запропоновано конструкцію термочуттєвого елементу актинометру, в якому спаї послідовно з'єднаних відрізків ізолюваного дроту (мідного і константанового) розташовуються на діаметрально протилежних сторонах сферичного корпусу, і гарячі спаї постійно обернені на сонце, а холодні – до поверхні Землі. Така конструкція на думку автора істотно підвищує чуттєвість приладу, оскільки забезпечує більшу різницю температур між гарячими і холодними спаями термочуттєвого елементу, є більш простою у порівнянні з конструкцією Савінова-Янишевського і, відповідно, меншовартісною. У [31] було запропоновано конструкцію актинометру для прямого цілорічного моніторингу сумарної сонячної радіації, що падає на

пласку поверхню, розташовану у фіксованому положенні під кутом до Землі. Дія актинометру базується на контрольованому відборі теплоти сонячного випромінювання від затемненої мідної поверхні датчика, при нагріванні якого вмикається термомодуль Пельтьє і охолоджує його до визначеної температури, відбираючи теплоту і скидаючи її через радіатор у атмосферу. Кількість сонячної енергії, яка потрапляє на мідну поверхню датчика і відводиться термомодулем буде пропорційною кількості пропущеної через нього електричної енергії. Незалежно від того, що термомодулі Пельтьє досить компактні, конструкція актинометру представляється громіздкою і потребує електроживлення і додаткового обладнання з підключенням до ПЕВМ для обробки і запису величини електричного струму. Проходження електричного струму крізь будь-яку речовину супроводжується внутрішніми тепловиділеннями, які можуть вносити похибку в оцінку теплового ефекту сонячного випромінювання при роботі термомодулів Пельтьє.

Приладами абсолютного вимірювання *прямої сонячної радіації* є **піргеліометри**. Першими стандартними піргеліометрами були піргеліометр Ангстрема, розроблений в Стокгольмі, і проточний піргеліометр Аббота зі Смітсонівського інституту у Вашингтоні [32].

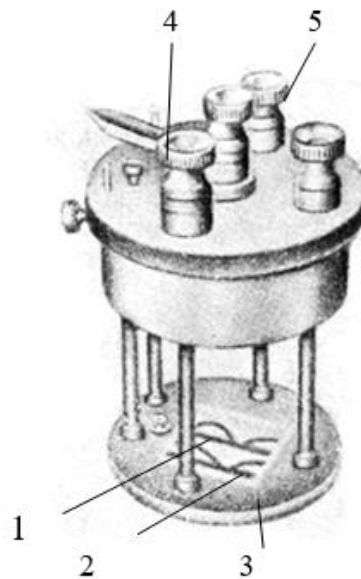
Зовнішній вигляд **піргеліометра** Ангстрема представлений на рис. 1.11, а конструкція чутливого елементу на рисунку 1.12. Він вважається зразковим для вимірювання прямої сонячної радіації.



Рисунок 1.11 – Зовнішній вигляд піргеліометра Ангстрема DR01 [32]

Принцип дії піргеліометра Ангстрема заснований на вимірюванні кількості теплоти, що утворюється при поглинанні сонячного випромінювання однією з двох затемнених тонких (0,01 мм) манганінових смужок 1, 2 розміром $0,2 \times 2 \text{ см}^2$, кінці яких припаяні до латунних сегментів на ебонітовій рамі 3 [32]. Зі сторони, що обернена до Сонця, смуги зачорнені платиновою черню і закопчені сажею з коефіцієнтом поглинання $\delta = 0,985$. Із зворотної сторони до середини кожної смужки наклеєні по спаю термоелемента з константану і міді. До клем термоелемента 4 і 5 підключається гальванометр, який замикає термоелектричний ланцюг, що дає можливість порівняти температуру смужок.

Кількість сонячної радіації, поглиненої першою смужкою визначається за значенням струму, що подається на другу смужку для компенсації різниці температур. Так, коли права пластина залишається освітленою пучком сонячної радіації, а ліва – затінена щитком, гальванометр показує термострум.



1 і 2 – прийомні смуги; 3 – ебонітова рамка; 4 і 5 – клемі термоелемента

Рисунок 1.12 – Чутливий елемент компенсаційного піргеліометра Ангстрема [29]

Щоб визначити густину потоку сонячної радіації затінену ліву пластину нагрівають пропусканням через неї електричного струму, причому сила струму підбирається так, щоб температура затіненої пластини дорівнювала температурі

опромінюваної пластини і щоб струм через гальванометр знову зник. Відповідно обидві пластинки отримають однакову кількість теплоти за 1 хв. Тоді температура пластин буде знову однакова, а отже, дорівнюватиме кількості тепла, що отримується обома пластинами за $t = 1$ хв і розраховується за допомогою $Q = I^2 R t$, де I – сила струму, що пропускається через затемнену пластинку, R – її електричний опір. Звідси випливає, що інтенсивність радіації пропорційна квадрату сили струму. Всі величини, що входять у формулу Ленца-Джоуля визначаються в результаті фізичних вимірювань. Відповідно піргеліометр – прилад, що вимірює абсолютну кількість сонячної радіації.

Проточний водоструминний піргеліометр Аббота [33] являє собою порожнину, яка поглинає сонячне випромінювання. Підвищення температури циркуляційної води, що охолоджує калориметр, пропорційне інтенсивності падаючого випромінювання. Піргеліометр Аббота зі срібним диском є ще одним стандартним приладом, в якому швидкість зміни температури диска наближено пропорційна інтенсивності падаючого випромінювання.

В сучасних піргеліометрах (рис. 1.13) в якості сенсора використовуються термобатареї – ряд послідовно з'єднаних термоелементів – напівпровідникових елементів, які використовують термоелектричні явища. Структура термобатареї: поверхня прийому випромінювання розділена на декілька блоків, кожен з яких з'єднаний з термопарою, і вони з'єднані послідовно, утворюючи термобатарею. Піргеліометри вимірюють лише сонячне світло від невеликої області навколо сонця, що характеризується півкутом відкриття, що являє собою кутову відстань розглянутої точки на небі відносно кутового положення Сонця, що може встановлюватись у межах $0 \div 10^\circ$ [33, 34]. Півкут розкриття є основною характеристикою для опису поля зору піргеліометра [34, 35] яка впливає на точність вимірювань – різні напівкути відкриття призводять до різних вимірних значень.

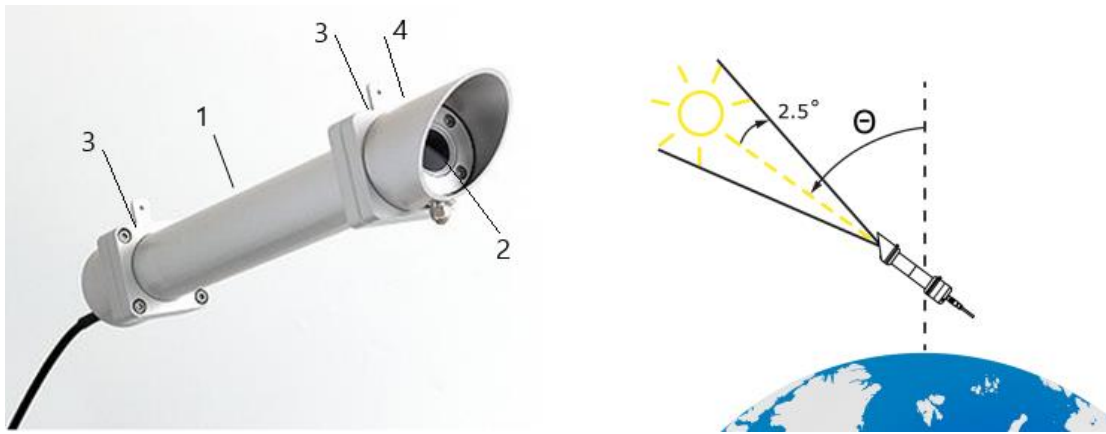


Рис.1.13 – Вигляд і основні елементи сучасного піргеліометра: 1 – корпус приладу, 2 – вікно з обігрівачем; 3 – приціл; 4 – захисний ковпачок [33]

Відмінності між приладами, які створює навколосонячний ефект, далеко не незначні, особливо за наявності перистих хмар. Ангстрем [36] досліджував набір піргеліометрів із напівкутами розкриття до 10° та оцінював їхні типові ефекти посилення навколо Сонця. У роботі [37] рекомендується півкут відкриття $2,5^\circ$. Оптимальна ефективність цього значення півкута розкриття була доведена результатами чисельного моделювання переносу випромінювання, проведеного у роботах [38, 39].

Піргеліометр (рис. 1.13) має прецизійне відшліфоване та поліроване кварцове вікно, компактну колімовану трубку та датчик термобатареї з чорним покриттям. Наприклад піргеліометр DR15-A1 пропонує аналоговий вихід у мілівольтах [40]. Він може бути підключений безпосередньо до поширених систем реєстрації даних. Висока доступність даних досягається підігрівом переднього скла. Це запобігає утворенню роси та інею за дуже низького споживання електроенергії: DR15 потребує лише 1 Вт, щоб захистити його вікна від роси та інею. Покриття поглинає все сонячне випромінювання і в момент поглинання, перетворює його на тепло. Тепло протікає через датчик до тіла приладу. Датчик термобатареї генерує вихідний сигнал напруги, пропорційний сонячному випромінюванню.

Вікно на піргеліометрі діє як фільтр [41], який пропускає сонячне випромінювання з довжиною хвилі приблизно від 200 нм до 4000 нм, що включає ближнє інфрачервоне, видиме, УФ-А та частину УФ-В випромінювання, але блокує теплове випромінювання з довжиною хвилі понад 4 мкм. Пропускання сонячного випромінювання через вікно [41] в ідеалі близько до 100 %, але на практиці ближче до 95 %. Вікно також служить для захисту чорного поглинача і термобатарей від негоди (дощу, снігу тощо).

Відфільтроване випромінювання поглинається чорною поверхнею піргеліометра та перетворюється на тепло. Якщо пропускання через вікно дорівнює τ , площа чорної поверхні дорівнює A , а коефіцієнт поглинання чорної поверхні дорівнює α , тоді поглинання теплоти $P_{\text{абсорб}}$:

$$P_{\text{абсорб}} = \alpha \cdot \tau \cdot A \cdot E, \quad (1.1)$$

де E – пряме сонячне випромінювання.

При цьому виникає градієнт температури від чорної поверхні через термобатарею до корпусу піргеліометра, який діє як радіатор: $\Delta T = R_{\text{т.б.}} \cdot P_{\text{абсорб}}$, де $R_{\text{т.б.}}$ – термічний опір датчика термобатарей, який залежить від конкретного складу та геометрії датчика термобатарей.

Термобатарея складається з N з'єднаних між собою термопар, кожна з яких генерує напругу, пропорційну температурі різниці між чорною поверхнею та тілом:

$$U = N \cdot \zeta \cdot \Delta T, \quad (1.2)$$

де ζ – коефіцієнт Зеєбека (наприклад, для мідь-константанової термопари $\zeta = 41$ мкВ/К), а напруга U на виводах термобатарей дорівнює сумі напруг u_i ($i = 1, 2, \dots, N$) термопар. Тоді загальна чутливість S піранометра визначається як $S = U/E$. Тоді виміряне пряме нормальне опромінення дорівнює:

$$E = U/S. \quad (1.3)$$

На практиці чутливість S визначається калібруванням за еталонним піргеліометром [33].

В експедиційних умовах наявність такої значної кількості додаткових вимірювальних приладів може бути незручним, тому іноді більш доцільним є використання добре проградуйованого приладу, що дає відносні величини інтенсивності сонячного випромінювання.

Для справжнього розрахунку ефективності сонячних систем потрібно знати повне сонячне випромінювання, що потрапляє на приймаючу поверхню. Для цієї цілі використовують вимірювальні прилади – **піранометри**.

Піранометр – тип актинометрів, який дозволяє вимірювання сумарну сонячну радіацію, що потрапляє на поверхню.

Сумарна сонячна енергія складається з прямої – яка безпосередньо досягає поверхні Землі, і дифузної – яка поглинається атмосферним повітрям і у розсіяному вигляді потрапляє на Землю. В залежності від типу сонячної радіації, що фіксується, існують різні *вимірювальні прилади* (рис. 1.14).

Піранометри вимірюють густину потоку сонячного випромінювання, Вт/м², що виходить з усієї небесної півсфери. При затіненні приймаючої поверхні піранометра від прямих променів, прилад фіксує дифузійну сонячну радіацію. Стандартний піранометр не вимагає електроживлення.

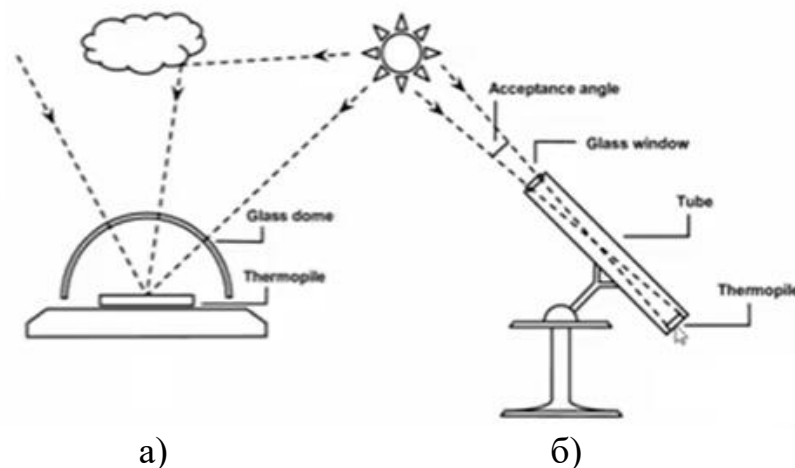


Рисунок 1.14 – Прилади для фіксування різних типів сонячної радіації:

- а) актинометри та піранометри – для сумарного променевого потоку,
- б) піргеліометри – для прямого потоку сонячного випромінювання.

Конструктивна схема піранометра представлена на рисунку 1.15.

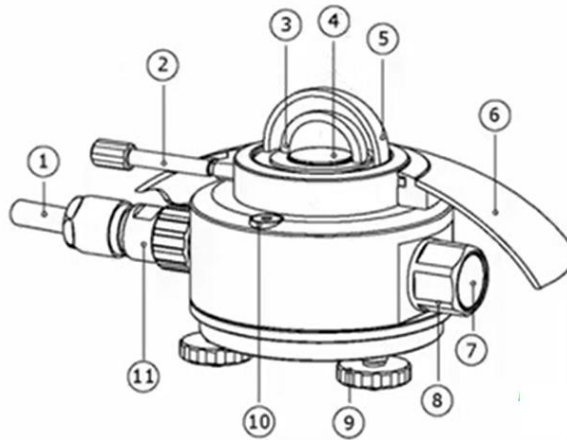


Рис.1.15 – Конструктивна схема сучасного піранометра [42]:

1 – кабель, 2 – клеми напруги, 3, 5 – захисні скляні куполи,
 4 – термічний датчик з чорним покриттям, 6 – сонцезахисний екран,
 7 – індикатор осушувача повітря, 8 – нагрівач, 9 – опори, що регулюють
 висоту, 10 – бульбашковий рівень; 11 – з'єднувач.

Піранометр вимірює густину сонячного випромінювання, отриману пласкою поверхнею під кутом поля зору 180° . При вимірюванні сонячної радіації відгук на попадаючі на поверхню промені змінюється залежно від косинуса кута падіння променя. Тобто піранометр повинен забезпечувати повний відгук, коли сонячне випромінювання потрапляє на термодатчик 4 перпендикулярно (Сонце знаходиться в Зеніті і кут падіння 0°), нульовий відгук, коли Сонце знаходиться біля горизонту (кут падіння 90° , Зеніт 90°), і, 50 % повного відгуку при куті падіння 60° . Для цього піранометр повинен мати спрямовану (косинусну) характеристику, яка максимально наближена до ідеальної косинусної характеристики.

Для досягнення належних спрямованих і спектральних характеристик піранометра оснащений такими компонентами: термічний датчик з чорним покриттям 4 (рис.1.15), що має плоский спектр, який охоплює діапазон довжин хвиль від 200 до 50000×10^{-9} м, і майже ідеальну спрямовану реакцію. Покриття поглинає все сонячне випромінювання і в момент поглинання перетворює його в теплоту. Теплота проходить через датчик до корпусу

датчика, де датчик термобатарей генерує вихідний сигнал напруги, пропорційний сонячному випромінюванню.

Діапазон від 285 до 3000×10^{-9} м обмежує зовнішній скляний купол 5, що відсікає частину спектру вище 3000×10^{-9} м, зберігаючи при цьому кут зору 180° . Інша функція купола полягає в тому, що він захищає датчик термобатарей від зовнішнього середовища (конвекції, дощу). Другий внутрішній скляний купол 3 забезпечує додатковий «радіаційний екран» для кращої теплової рівноваги між ним і датчиком 4. Ефект наявності другого купола полягає в значному зменшенні зміщення інструменту. Щоб зменшити вплив роси та інію на зовнішню поверхню купола, більшість сучасних піранометрів мають вбудований нагрівач 8, з'єднаний з корпусом датчика. Однак нагрівання піранометра може генерувати додаткові сигнали зміщення опромінення, тому рекомендується активувати обігрівач лише в нічний час.

Принцип дії більшості піранометрів заснований [42] на вимірюванні за допомогою термоелементів різниці температур чорних поверхонь, поглинаючих випромінювання, і білих поверхонь, що відбивають випромінювання. При нагріванні приймальної поверхні сонячною радіацією, в термобатарей виникає струм, сила якого вимірюється гальванометром і перераховується в одиниці потужності за виразами (1.1) – (1.3) таким же чином, як і при роботі піргеліометра.

Вимірювання інтенсивності сонячного випромінювання в ультрафіолетовому діапазоні довжин хвиль здійснюється волоконно-оптичними піранометрами, в яких приймачами ультрафіолетового випромінювання є фотодіоди зі смугою чутливості в діапазоні 5 240...380 нм [43, 44]. Оптичні фільтри являють собою волоконний світловод із блоком лінз і забезпечують смугу пропускання 295...300, 300...305 і 305...310 нм. Залежно від смуги поглинання фотодіода й оптичних фільтрів змінюється спектральний діапазон виміру сумарної сонячної радіації. Струм фотодіодів у відповідній смузі, буде

пропорційний загальній сонячній радіації у вимірюваному діапазоні довжин хвиль у теперішній момент часу.

Для вимірювання розсіяної сонячної радіації піранометри затемнюють тіньовими кільцями (рис. 1.16).



Рис.1.16 – Тіньове кільце для піранометрів у поєднанні з піранометром, що утворює дифузометр [42]

Тож конструкція виявляється досить громіздкою і високовартісною. Останнім часом на ринку України з'явилися піранометри загального призначення, які імпортуються з Німеччини, Нідерландів, Китаю та інших країн. Однак їх висока вартість не сприяє широкому застосуванню цього обладнання в нашій країні [45].

1.2.2 Піранометр СР-М1 з декількома сприймаючими сонячне випромінювання поверхнями

Для вирішення завдань, пов'язаних з тривалим безперервним моніторингом інтенсивності сонячного випромінювання, що досягає земної поверхні, і накопиченням даних про надходження сонячної енергії на будівлі та споруди, в Інституті технічної теплофізики НАН України розроблений пристрій «Піранометр СР-М1» [46, 47] (рис. 1.16), прототипом якого був «Піранометр СР-У1» [45]. Ці піранометри відносяться до актинометричної групи приладів і

призначені для вимірювання густини потоку сумарної сонячної радіації, Вт/м². Піранометр СР-М1 (рис. 1.17) призначений для довгострокового моніторингу інтенсивності сонячного випромінювання, яке потрапляє на фасади та кришу будівлі або поверхонь, орієнтованих за сторонами світу [46, 47].

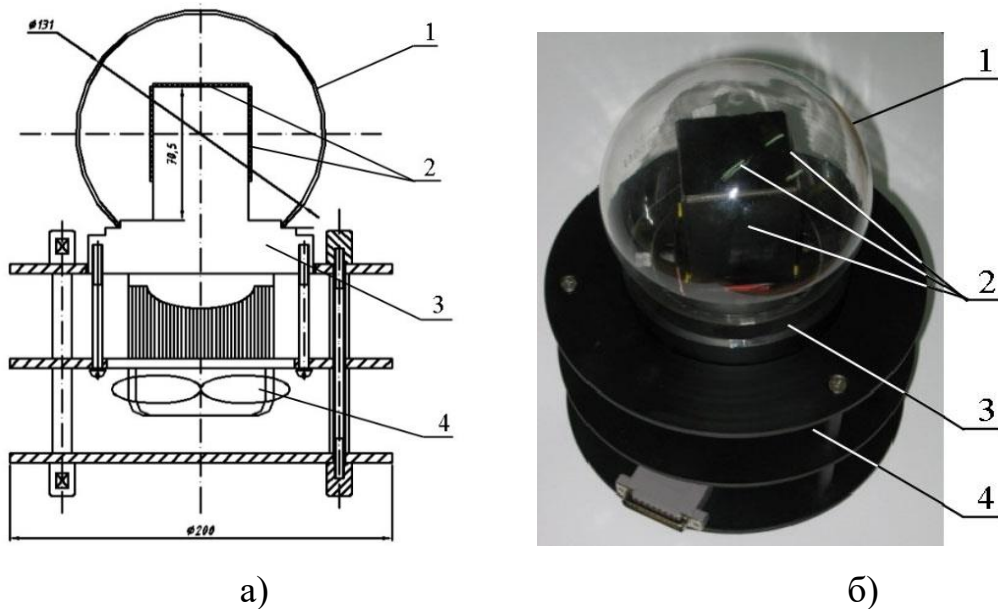


Рисунок 1.17 – Схема (а) і зовнішній вигляд (б) піранометра СР-М1 [46, 47]:

- 1 – сферичний ковпак; 2 – блок перетворювачів теплового потоку;
3 – теплопровідний корпус-основа; 4 – система примусового повітряного охолодження

Принциповою відмінністю СР-У1 і СР-М1 від піранометричної станції на базі піранометрів Янішевського М-80М є багатосекційність перетворювачів теплового потоку, що дозволяє фіксувати сумарну густину променевого потоку.

Піранометр СР-М1 оснащений п'ятьма перетворювачами теплового потоку (ПТП) (2), закріпленими на бічних і верхній гранях прямокутного паралелепіпеду і мають окремі виводи електродів для вимірювання різниці температур. Кожний ПТП забезпечує вимір сонячної радіації, яка попадає на неї під певним кутом до нормалі. Всі ПТП встановлені на загальній масивній основі 3, виготовлений з матеріалу з високим коефіцієнтом теплопровідності для інтенсивного тепловідведення, шляхом примусового охолодження повітрям навколишнього середовища (4). Блок ПТП захищений скляним куполом від

впливу навколишнього середовища. Основа (3) містить порожнини, заповнені силікагелем, щоб виключити утворення конденсату під куполом.

Тепловий режим ПТП та системи охолодження контролюється платиновими термометрами опору типу Pt100, які розміщені в потоці охолоджувального повітря і в корпусі апарата. Під час роботи піранометру СР-М1 послідовно здійснюється вимірювання сигналів від кожного ПТП та первинна обробка даних. Результати виводяться на екран ПЕВМ і у вигляді масиву чисел. Одночасно, дані автоматично зберігаються у файлі формату Microsoft Excel, що дозволяє проводити їх подальшу обробку.

Достовірність вимірювання теплових потоків забезпечується калібруванням засобів вимірювання. Калібрування ПТП полягає у визначенні коефіцієнта перетворення K , який є величиною, оберненою до чутливості та відповідає величині вхідного теплового потоку Q , що спричинює генерування чутливим елементом сенсора вихідного електричного сигналу E в 1 мВ. Чутливість ПТП представляє відношення вихідного електричного сигналу, мВ до значення густини вхідного теплового потоку, Вт/м². Калібрування піранометру СР-М1 [47] проводилось методом почергової зміни сонця і тіні відповідно до ДСТУ ISO 9846 [48], в результаті чого були визначені коефіцієнти перетворення K_i для кожного i -го ($i = 1, \dots, 5$) датчика [47], представлені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Коефіцієнти калібрування піранометра СР-М1 [47]

Позначення ПТП	Калібрувальний коефіцієнт K
1-Північ	11,73
2-Схід	10,92
3-Захід	10,9
4-Південь	11,47
5-Горизонт	12,79

Сутність методу почергової зміни сонця і тіні полягає в тому, що результати вимірювань СР-М1 порівнюють з результатами безпосереднього вимірювання поверхневої густини потоку прямого сонячного випромінювання піранометром РАП-12СР.

1.2.3 Розрахункові методи визначення інтенсивності сонячного випромінювання

Отримання інформації про інтенсивність сонячного випромінювання для даної кліматичної місцевості має важливе значення для належного проектування енергетичних систем будівель, систем сонячної енергії та хорошої оцінки теплового середовища всередині будівель [49, 50]. Найкращою базою даних були б дані довгострокових вимірювань на місці передбачуваної сонячної системи. Однак обмежене покриття мереж вимірювання радіації та можливість швидкого отримання інформації про інтенсивність сонячної радіації заохочувало різних дослідників до розробки моделей сонячного випромінювання [49 – 63].

У літературі представлено дві категорії моделей сонячного випромінювання: параметричні моделі і моделі декомпозиції.

Параметричні моделі вимагають детальної інформації про атмосферні умови, що визначаються метеорологічними параметрами, серед яких такі специфічні, що потребують систематичних спостережень, як тип, кількість і розподіл хмар, або частка сонячного сяйва, атмосферна каламутність і вміст води, що випадає [49 – 58]. Простіший метод розрахунку інтенсивності сонячного випромінювання був запропоновано ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) [55, 57] і він дуже широко використовується інженерними та архітектурними спільнотами. Модель Ікбала [65] пропонує додаткову точність у порівнянні зі звичайними моделями, розглянутими Геймаром [59, 65].

Моделі декомпозиції зазвичай використовують інформацію лише про глобальне випромінювання для прогнозування компонентів сонячного випромінювання та стану неба. Ці співвідношення зазвичай виражаються через інтеграли за часом (зазвичай за 1 годину) потоку випромінювання або опромінення. Моделі декомпозиції, розроблені для оцінки прямого та дифузного опромінення на основі даних глобального опромінення, були знайдені в літературі [49, 66, 67].

Для опису характеристик сонячного випромінювання інтенсивності сонячної радіації застосовуються ряд специфічних понять.

Відносна повітряна маса m представляє відношення маси атмосфери, через яку проходить промінь Сонця, до маси, через яку промінь проходив би, якби Сонце знаходилося в зеніті. Таким чином, коли сонце знаходиться в зеніті $m = 1$. В цьому випадку зенітний кут (кут падіння сонячного променя) буде дорівнювати нулю $\theta_z = 0$. Для зенітних кутів від 0° до 70° на рівні моря ця величина визначається з наближеного співвідношення [57, 59]:

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z}. \quad (1.4)$$

Для зенітних кутів, що наближаються до 90° , Кастеном та Янгом визначення для повітряної маси m отримана емпірична формула [58]:

$$m = \frac{1}{\sin \beta + 0,50572(6,07995 + \beta)^{-1,364}}, \quad (1.5)$$

де β – кут висоти Сонця в градусах.

Для більш високих зенітних кутів вплив кривизни Землі стає досить значним і має враховуватися.

Пряме сонячне випромінювання представляє енергію пучка променів, спрямованих від Сонця, які досягають земної поверхні.

Дифузне випромінювання – це сонячне випромінювання, при якому напрямок окремих променів з пучка змінюється внаслідок розсіювання в атмосфері.

Сумарне сонячне випромінювання представляє суму прямого і дифузного сонячного випромінювання, що падає на приймаючу поверхню.

Інтенсивність сонячного випромінювання, Вт/м^2 характеризує потік променевої енергії, що попадає на одиницю площі поверхні.

Інсоляція, Дж/м^2 представляє енергію, що попадає на одиницю площі поверхні, та може бути визначена шляхом інтегрування інтенсивності сонячного випромінювання за заданий проміжок часу (зазвичай за одну годину або за один день).

Розрахунок місця положення Сонця на небосхилі являє собою напівемпіричну задачу, з якої визначається кут падіння сонячного променя на довільно орієнтовану сприймаючу поверхню, наприклад сонячного колектору, або на площини панелей фотовольтаїки, поверхні огорожувальних конструкцій будівельних споруд – стеля, стіни, віконні прорізи і т.і., що розташовуються на поверхні Землі (рис.1.18).

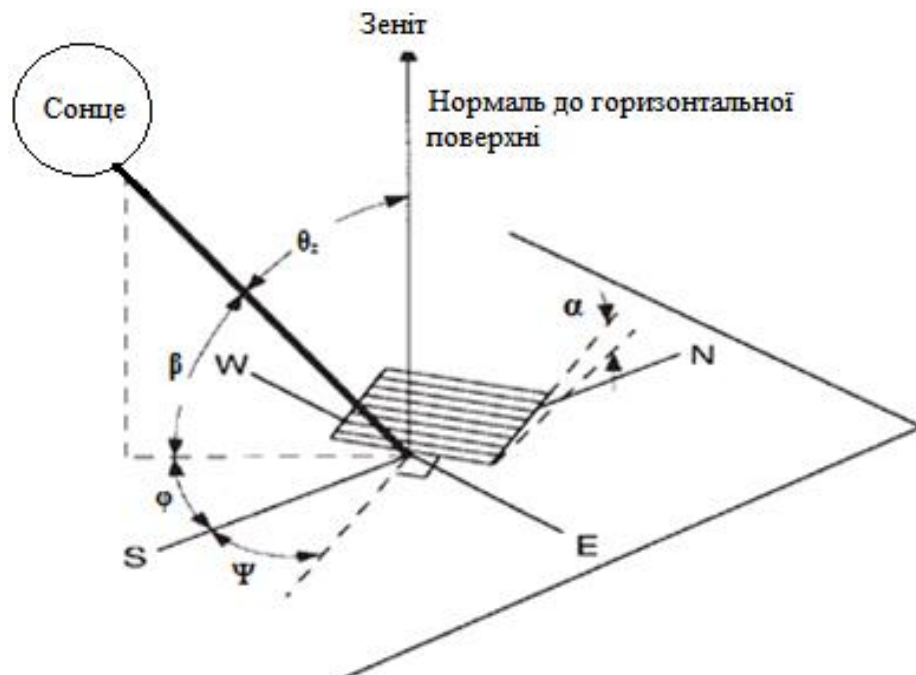


Рисунок 1.18 – Сонячні кути та кути приймаючої поверхні [57]

Для визначення місця положення Сонця є загальноприйнятими [57– 60] наступні позначення для географічних координат:

L – *широта місцевості*, яка представляє кутове розташування точки на поверхні Землі на північ або на південь від екватора – $90^\circ \leq L \leq 90^\circ$. На північ від екватора значення L приймається позитивним;

LON – *довгота місцевості* – кутове розташування точки відносно нульового меридіана;

δ – *схилення Сонця*, яке являє собою кутове положення Сонця опівдні відносно площини екватора і лежить в межах $-23,45 \leq \delta \leq 23,45$, де ліве граничне значення відповідає дню літнього, а праве граничне значення – дню зимового сонцестояння. Для північної півкулі величина δ є позитивною.

Схилення Сонця в [58] пропонується визначати за відношенням, що отримано з наближеного рівняння Купера:

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360(n+284)}{365}\right), \quad (1.6)$$

де n – номер дня року. Номер дня року визначається з таких міркувань: Якщо у січні 31 день, то для 1 лютого $n = 31+1$, для 2 березня $n = 59+2$ і т.д. [58].

У [61, 62] наводиться більш точне відношення для визначення схилення Сонця, з похибкою менше $0,035^\circ$:

$$\delta = (180/\pi)(0,006918 - 0,399912 \cos(B) + 0,070257 \sin(B) - 0,006758 \cos(2B) + 0,000907 \sin(2B) - 0,002697 \cos(3B) + 0,00148 \sin(3B)), \quad (1.7)$$

де параметр $B = (n - 1) 360 / 365$.

Ψ – *азимут поверхні* – представляє кут відхилення проекції нормалі до орієнтованої до сонця поверхні на горизонтальну площину від місцевого меридіана. Нульове значення Ψ означає південний напрямок, відхилення на схід – негативний кут, позитивний – на захід; $-180^\circ \leq \Psi \leq 180^\circ$ [60];

H – *годинний кут*, кутове зміщення Сонця на схід або захід від місцевого меридіана, обумовлений обертанням Землі навколо осі зі швидкістю 15° за годину [60]:

$$H = 15(T_s - 12). \quad (1.8)$$

В сонячний полудень $H = 0$, $H > 0$ після полудня, $H < 0$ вранці до полудня, T_s – явний сонячний час, що вимірюється в годинах;

β – кут висоти Сонця – це кут між горизонтом і лінією, спрямованою до Сонця, тобто доповнення зенітного кута. Величина кута висоти Сонця може бути виражена через значення інших кутів відношенням [60]:

$$\sin(\beta) = \cos(L)\cos(\delta)\cos(H) + \sin(L)\sin(\delta). \quad (1.9)$$

При $H=0$, у полудень, $\beta_{\max} = 90^\circ - |L - \delta|$;

φ – кут азимута Сонця, що являє собою кутовий зсув проекції лінії, яка спрямована до Сонця, на горизонтальну площину, від півдня. Зміщення на схід від півдня негативні, а на захід від півдня є позитивні. Кут φ зв'язаний з іншими характерними кутами наступними співвідношеннями [60]:

$$\sin(\varphi) = \frac{\cos(\delta)\sin(H)}{\cos(\beta)}, \quad (1.10)$$

$$\cos(\varphi) = \sin(L)\cos(\delta)\cos(H) - \frac{\cos(L)\sin(\delta)}{\cos(\beta)}. \quad (1.11)$$

θ – кут падіння променя, кут між сонячним променем, падаючим на приймаючу поверхню, і нормаллю до цієї поверхні. Кут θ може бути визначений через решту характерних кутів за наступним відношенням [60]:

$$\cos(\theta) = \cos(\beta)\cos(\gamma)\sin(\alpha) + \sin(\beta)\cos(\alpha), \quad (1.12)$$

де $\gamma = \varphi - \Psi$.

θ_z – кут зеніту Сонця між вертикаллю і лінією до Сонця. Цей кут доповнює кут висоти Сонця β .

1.2.3.1 Сонячна постійна

Важливою величиною, яка входить в розрахункові рівняння при математичному моделюванні інтенсивності сонячного випромінювання в залежності від положення Сонця на небосхилі і орієнтації приймаючої поверхні

є так звана Сонячна постійна E_{sc} , яка дорівнює інтенсивності сонячного випромінювання $P = \varepsilon \sigma T^4 F_{sun} = 1.5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 5800^4 \cdot 4\pi(7 \cdot 10^8)^2 = 3,95 \cdot 10^{26}$ Вт на поверхню $F=4\pi \text{Distance}^2$ (рис. 1.19 а), нормальну до сонячних променів, безпосередньо за межами земної атмосфери (рис. 1.19 б) при середній відстані Землі від Сонця, рівній $\text{Distance} = 1,5 \cdot 10^{11}$ м: $E_{sc} = P/F = 1367$ Вт/м².

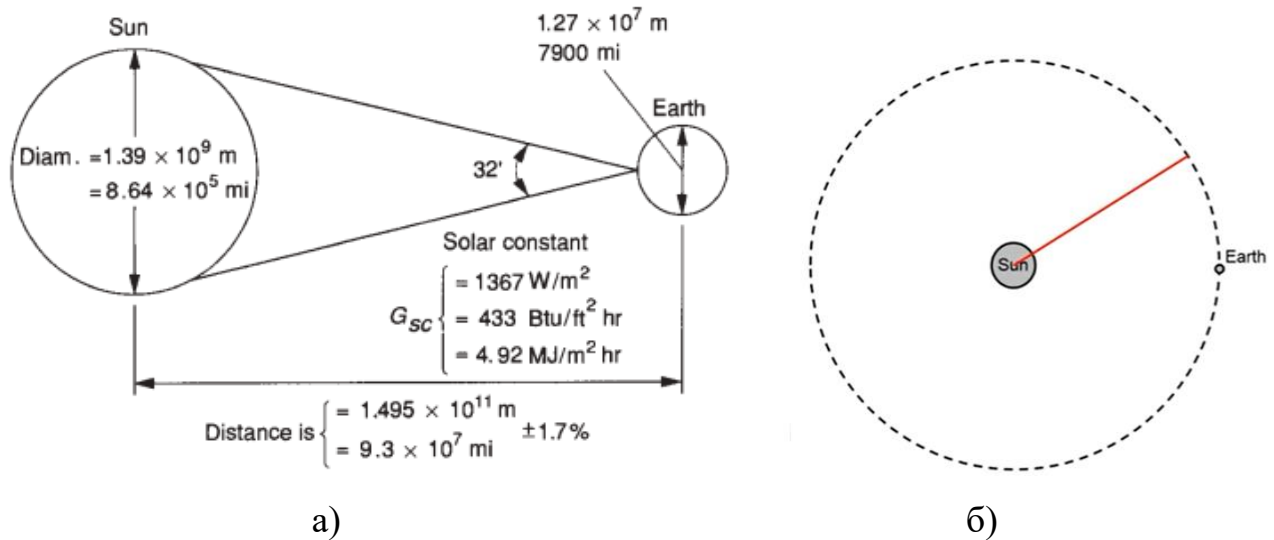


Рисунок 1.19 – Геометрія зв'язку Сонце-Земля [61]

Земля обертається навколо Сонця по еліптичній орбіті, що обумовлює змінність упродовж року позаземного променистого потоку від Сонця, досягаючи максимуму на початку Січня (найкоротша відстань від Землі до Сонця) і мінімуму – на початку Липня. Для визначення сонячного випромінювання на межі земної атмосфери відома емпірична залежність [61]:

$$E_0 = E_{sc} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360(n-3)}{365} \right) \right], \quad (1.13)$$

де n – поточний день року.

1.2.3.2 Рівняння часу і сонячний час

Сонячний час заснований на видимому кутовому русі сонця по небу. Опівдні сонце перетинає меридіан об'єкта, сприймаючого сонце. Сонячний час – це той час, що використовується у всіх математичних співвідношеннях, що

дозволяють дослідити змінність сонячних кутів. Сонячний час не збігається з місцевим годинним часом.

Щоб перетворити стандартний час в сонячний час, слід застосувати дві поправки [58, 60]. Перша враховує той факт, що Сонце перетинає 1° довготи за 4 хвилини і потрібна постійна корекція різниці довготи між меридіаном об'єкта (довготою) і меридіаном часового поясу (на якому засновано локальний стандартний час). Друга поправка дозволяє врахувати зміну швидкості обертання Землі навколо Сонця шляхом залучення представляється залученням рівняння часу. Ці поправки впливають на час перетинання Сонцем меридіана об'єкта (спостерігача).

Явний сонячний час T_s визначається за формулою:

$$T_s = T_{pl} + \frac{ET}{60} + \frac{LON - LSM}{15}, \quad (1.14)$$

де T_{pl} – місцевий стандартний час, який у випадку переходу на літній час враховує це (слід від місцевого часу відняти 1); LON – довгота спостерігача; LSM – довгота стандартного місцевого меридіана часу, $LSM = 15TZ$, де TZ – часова зона (задається у годинах); ET – зміна швидкості обертання Землі навколо Сонця, яка визначається з рівняння часу, в залежності порядкового номеру доби року

$$ET = 2,2918 \left[0,0075 + 0,1868 \cos(B) - 3,2077 \sin(B) - 1,4615 \cos(2B) - 4,089 \sin(2B) \right], \quad (1.15)$$

де B – денний кут, $B = \frac{360(n-1)}{365}$; n – поточний день року.

В [55] метод визначення положення Сонця на небосхилі базується на Юліанському календарі.

1.2.3.3 Сонячне випромінювання на поверхню Землі

При проходженні через атмосферу Землі частина прямого випромінювання Сонця розсіюється молекулами азоту, кисню, вуглекислого газу та іншими молекулами, що входять до складу повітря. Крім того, розсіювання відбувається аерозолями, крапельками води, пилом та іншими частинками, що мають діаметр, який можна порівняти з довжиною хвилі сонячного випромінювання. Це розсіяне випромінювання змушує небо здаватися синім в ясні дні, і частина його досягає Землі як дифузне випромінювання.

Ослаблення сонячних променів також обумовлено поглинанням ультрафіолетового випромінювання озоном в верхніх шарах атмосфери. Для більш довгих хвиль сонячного спектра існує ряд смуг поглинання, які викликані наявністю водяної пари та двоокису вуглецю. Загальна величина загасання сонячного випромінювання в будь-якому даному місці визначається: довжиною атмосферного шляху, через який проходять промені m , і складом атмосфери.

У [51] наведено отриману Стефенсоном систему рівнянь для розрахунку інтенсивності прямого нормального і дифузного сонячного випромінювання на поверхні Землі:

$$I_b = A \exp\left(-\frac{B}{\sin(\theta_z)}\right), \quad (1.16)$$

$$I_d = C \cdot I_b \cdot F_{ss}. \quad (1.17)$$

Тут I_b та I_d – відповідно пряме та дифузне сонячне випромінювання на земну поверхню; A – видиме позаземне випромінювання при $m = 0$ і B – коефіцієнти атмосферного ослаблення, що є функціями дати і враховують сезонні зміни відстані Земля-Сонце та наявністю водяної пари в повітрі [51]; C – безрозмірний параметр, що визначає дифузну складову випромінювання і який

залежить від наявності пилу і вологи в атмосфері і також змінюється протягом року; F_{ss} – кутовий фактор, $F_{ss} = 0,5[1 - \cos(a)]$.

Слід зазначити, що наведена вище модель сонячного випромінювання на поверхню Землі відноситься до класу параметричних моделей, які, головним чином, створені на основі експериментальних даних і прив'язані до конкретного місця дослідження.

В [57] запропонована математична модель, за якою інтенсивність сонячного випромінювання на поверхню, нормальну до сонячних променів розраховується за формулою

$$G_{cnb} = 1367(1 + 0,033 \cos(B)) \tau_b,$$

інтенсивність прямого випромінювання на горизонтальну поверхню:

$$G_{cb} = G_{cnb} \cos(\Theta_z),$$

інтенсивність дифузного випромінювання:

$$G_{cd} = 1367(1 + 0,033 \cos(B)) \cos(\Theta_z) \tau_d,$$

де $\tau_b = a_0 + a_1 \exp(-k/\cos(\Theta_z))$; $\tau_d = 0,271 - 0,294 \tau_b$ – емпіричні коефіцієнти, Θ_z – зенітний кут Сонця, B – денний кут.

За моделлю [55] пряме нормальне випромінювання визначається як:

$$E_b = E_0 \exp[-\tau_b m^{ab}],$$

а дифузне випромінювання розраховується за формулою:

$$E_d = E_0 \exp[-\tau_d m^{ad}]$$

де τ_b і τ_d – пряма і дифузна оптична псевдо глибина (залежать від пори року); ab і ad – показники експоненти:

$$ab = 1,219 - 0,043 \tau_b - 0,151 \tau_d - 0,204 \tau_b \tau_d$$

$$ad = 0,202 - 0,852 \tau_b - 0,007 \tau_d - 0,357 \tau_b \tau_d$$

Треба зазначити, що наведені в літературі розрахункові моделі не можна вважати універсальними і придатними до будь-якої місцевості. Вибір наведених моделей для розрахунків певною мірою зумовлений тим, для якої місцевості вони використовуються. Моделі ASHRAE [55, 57] в різні часи були

інтегровані у CFD пакети, такі як ANSYS Fluent, які широко застосовуються в інженерній практиці.

1.3 Розрахункові методи дослідження тепловологісного стану приміщень будівель

Зниження витрат теплової енергії і відповідно енергоносіїв на опалення будівель може досягатися різними шляхами [62, 68]: використанням сучасних теплоізоляційних матеріалів, або відновлювальних та альтернативних джерел енергії в системах розподіленої генерації, або масовим використанням автоматичного керування системами теплопостачання будівель.

Останній підхід вважається найбільш мало витратним та досить ефективним з точки зору забезпечення комфортних умов [69 – 72], з урахуванням добової та сезонної зміни параметрів оточуючого середовища. При цьому важливим є оцінка впливу сонячного випромінювання, так як в сонячні дні опалювального періоду до 30% теплоти в будівлі може генеруватись за рахунок сонячної радіації. Ефективна організація автоматичного керування системами теплопостачання можлива на базі детальних досліджень процесів тепломасопереносу в приміщеннях будівель.

Спроби врахування впливу сонячного випромінювання на тепловий стан внутрішніх приміщень будівель здійснювались різними дослідниками. В [70] зазначається доцільність створення адекватних математичних моделей і ефективних програмних продуктів для аналізу фактичних теплових надходжень і втрат на тепловий стан будівель, що є основою організації ефективного енергоспоживання.

В роботі [72] побудована математична модель теплового стану кімнати з однією зовнішньою стіною і вікном, що включає рівняння теплового балансу кімнати, яке враховує втрати теплоти через зовнішні огорожувальні конструкції Q_z і внаслідок вентиляції Q_v , та теплонадходження за рахунок

роботи опалювальних пристроїв Q_0 , результуючого потоку сонячної радіації від вікна $Q_{\text{рез.co}}$ та додаткових теплонадходжень $Q_{\text{тн}}$ внаслідок конвективного і променевого теплообміну між внутрішніми поверхнями кімнати:

$$Q_{\text{в}} + Q_{\text{з}} = Q_0 + Q_{\text{тн}} + Q_{\text{рез.co}}, \quad (1.18)$$

Рівняння (1.18) замикається відношеннями, що впливають з рівняння теплопередачі, законів Кірхгофа і Стефана-Больцмана. Кутові коефіцієнти поглинання теплової енергії від внутрішніх огорожень на зовнішню стіну та вікно визначались відношеннями площ відповідних поверхонь. При цьому покладалось, що температура на кожній з внутрішніх стін має усталені значення, власне теплове випромінювання та радіаційні характеристики поверхонь мають дифузний характер, середня температура внутрішніх стін та перекриттів дорівнює середній температурі повітря у приміщенні. Також не враховується залежність теплофізичних характеристик матеріалу огорожувальних конструкцій від температури і рівні сонячних надходжень приймалися сталими. Результати розрахунків показали, що променева складова теплових надходжень у внутрішні приміщення будівель за рахунок сонячного випромінювання істотно впливають на температуру повітря та температуру поверхонь зовнішніх огорожувальних конструкцій. Однак стаціонарний характер постановки задачі не дозволяє дослідити динаміку теплообміну в кімнаті внаслідок істотної нерівномірності сонячних теплових надходжень і змінного навантаження опалювальних приладів від температури оточуючого середовища протягом опалювального періоду. Такий підхід важко залучити для організації енергоефективної роботи енергетичного обладнання.

В ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [73] прийнятий квазістаціонарний метод розрахунку теплового стану будівель для регулювання енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні. Метод базується на поділі будівлі на окремі зони та розрахунком енергетичних потреб для опалення та охолодження для кожної з цих зон для періоду в один місяць. Такий підхід дозволяє врахувати динамічні ефекти теплових

надходжень і втрат. Розбиття будівлі на зони здійснюється шляхом відокремлення кондиціонованих об'ємів від зовнішнього навколишнього середовища – повітря, ґрунту, води, та від суміжних кондиціонованих зон. Для опалювального періоду коефіцієнт використання внутрішніх теплових надходжень та теплонадходжень за рахунок сонячного випромінювання приймається з таких міркувань, що тільки частина цих надходжень використана для зменшення енергопотреб на опалення. Решта призводить до небажаного зростання внутрішньої температури всередині приміщень будівлі вище заданого нормативного значення.

Теплонадходження від сонця кожної зони будівлі, для кожного місяця Q_{co} , Вт·год у [73] рекомендується розраховувати за формулою:

$$Q_{co} = t \sum_k \bar{Q}_{co,k}, \quad (1.19)$$

де t – тривалість місяця, що розглядається, год; $\bar{Q}_{co,k}$ – усереднений за часом тепловий потік від k -го джерела сонячного випромінювання, Вт,

$$\bar{Q}_{co,k} = F_{z,k} A_{co,k} I_{co,k} - F_{p,k} Q_{p,k}. \quad (1.20)$$

Тут для k -х поверхонь $F_{z,k}$ – понижувальний коефіцієнт затінення перешкодами для еквівалентної площі інсоляції, $A_{co,k}$ – еквівалентна площа інсоляції з даною орієнтацією та кутом нахилу у визначеній зоні чи об'ємі, м², в залежності від того, чи є це скління, непрозорі або особливі елементи (такі як непрозорі елементи зі світлопрозорою ізоляцією, вентильовані сонячні стіни або стіни Тромба); $I_{co,k}$ – сонячна радіація, що представляє значення енергетичної освітленості сприймаючої поверхні з даною орієнтацією та кутом нахилу за середніх умов хмарності Вт/м²; $F_{p,k}$ – коефіцієнт форми між елементом будівлі та небосхилом, $F_{p,k} = 1$ для незатіненого горизонтального даху, $F_{p,k} = 0,5$ для незатіненої вертикальної стіни; $Q_{p,k}$ – радіаційний тепловий потік від елемента будівлі в атмосферу, Вт.

Незважаючи на те, що всі коефіцієнти, що потрібні для обрахування правої частини (1.20) визначені емпіричним шляхом і табульовані в [73], їх дискретне представлення робить розрахунок $\bar{Q}_{co,k}$ протягом року навіть і для однієї зони будівлі тривалим кропітким процесом, який важко запрограмувати і використовувати для оцінки теплового стану будівлі при зміні погоди з метою підвищення ефективності енергоспоживання. Крім того, кількість сонячних – період з листопада по березень, тоді як в [73] характеристики сонячних теплонадходжень приймаються осередненими по кожному місяцю.

У ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія [74] наводиться розрахунковий вираз для ефективної температури повітря біля зовнішньої поверхні огорожень будівель T_{ef} , який враховує вплив сонячної радіації

$$T_{ef\ z.c.} = T_{z.c.} \sqrt[4]{\frac{I_{o.t}(\alpha)}{I_{сер}(\alpha)}} + r \frac{I_{o.пр}(\alpha, \beta) + I_{o.роз}(\alpha, \beta)}{\alpha_{z.c.}}. \quad (1.21)$$

Тут α і β – кутова висота та азимут нормалі до поверхні у даній точці; $T_{z.c.}$ – температура зовнішнього повітря, К; $I_{o.t}$, $I_{o.пр}$ і $I_{o.роз}$ – енергетичні освітленості поверхні у даній точці відповідно тепловою, прямою сонячною та розсіяною сонячною радіацією, Вт/м²; $I_{сер}$ – просторова інтенсивність теплової радіації, Вт/м²; r – альbedo поверхні у частках одиниці; $\alpha_{z.c.}$ – коефіцієнт теплообміну між зовнішньою поверхнею огороження і зовнішнім повітрям, Вт/(м²К).

В роботах [75–78] побудовано математичні моделі теплового стану приміщень на основі системи рівнянь Новьє-Стокса та балансових рівнянь теплових потоків, що надходять в опалювальні приміщення та втрачаються в оточуюче середовище, однак вплив сонячної радіації на тепловий стан приміщень не враховується. У [78] проведено чисельне моделювання температурного режиму адміністративної будівлі в цілому при врахуванні зміни параметрів оточуючого середовища і температури води в опалювальних приладах. Задача розв’язувалась чисельним методом з зосередженими параметрами, згідно з яким окремі поверхні будівлі мали середню рівномірну

температуру. Сонячна радіація враховувалась косвено через виміряні значення температур зовнішнього повітря за певний період часу. Авторами статті [79] при чисельному моделюванні теплового стану кімнати житлового будинку також використовувалась система рівнянь руху, енергії, нерозривності та рівняння $k-\omega$ моделі для кінетичної енергії та її швидкості дисипації. Вплив сонячного випромінювання, що потрапляє через віконні конструкції, враховувався постійним джерелом теплоти на внутрішній поверхні вікна з густиною теплового потоку 500 Вт/м^2 та варіюванням кута атаки сонячного випромінювання в межах від 30 до 60 градусів. Слід зазначити, що сонячна радіація впливає і на температурний стан стінових огорожувальних конструкцій і відповідно на тепловий стан повітря кімнати, однак цьому питанню в [78] не приділена увага.

1.4 Тепло- і масоперенос в огорожувальних конструкціях будівель

Більшість матеріалів огорожувальних конструкцій будівель відносяться до класу капілярно-пористих матеріалів, які володіють сорбційними властивостями. При високій відносній вологості атмосферного повітря відбувається поглинання будівельними матеріалами вологи з повітря, а в сухі теплі дні волога випаровується. Внаслідок атмосферних впливів при експлуатації будівель змінюється тепловий і вологісний стан зовнішніх і внутрішніх конструкцій, що істотно впливає на температурний режим приміщень і визначає навантаження опалювальних приладів в зимовий період. Підвищення вологовмісту капілярно-пористих матеріалів призводить до зростання їх теплопровідності, що негативно впливає на теплозахисні властивості огорожувальних стінових конструкцій в опалювальний період. Крім того, за від'ємних температур оточуючого повітря відбувається кристалізація внутрішньокапілярної вологи в прилеглих до зовнішньої поверхні шарах стінових конструкцій, а чергування циклів заморожування і відтавання води супроводжується накопиченням залишкових деформацій в усій

огороджувальній конструкції, збільшуючи їх пористість і подальше вологопоглинання [80].

Будівельними нормами В.2.6-31:2016 [81] для проєктування теплоізоляції будівель не враховуються процеси нестационарної дифузії капілярної вологи в товщі будівельних конструкцій. Тому, виникає необхідність пошуку ефективних методів дослідження динаміки вологопереносу через огорожуючі конструкції з урахуванням всіх визначальних факторів, щоб більш обґрунтовано підходити до прийняття відповідальних рішень по енергозбереженню.

1.4.1 Фактори, що впливають на тепло- і вологоперенесення в будівельних конструкціях

На динаміку тепло- і вологопереносу в каплярно-пористих будівельних конструкціях впливає ряд факторів, основними з яких є фізичні властивості будівельного матеріалу, особливості його внутрішньої пористої структури, температура, відносна вологість та швидкість оточуючого повітря, сонячна радіація, потужність опалювальних приладів або приладів кондиціонування, параметри рівноважного стану пористого матеріалу.

Будівельні конструкції виготовляються шляхом поєднання різних речовин – керамічної маси, різноманітних порошків, суспензій, паст, пластично-в'язких рідиноподібних сумішей, в'язучих речовин та ін. [82, 83]. Багатокомпонентний склад їх враховується теплофізичними властивостями, які визначені і табульовані для більшості будівельних виробів (різні види цегли, штукатурки, бетону, теплоізоляційних матеріалів і т.і.) або можуть бути визначені на основі методів, викладених у [84].

Внутрішня структура каплярно-пористих матеріалів є достатньо складною, оскільки форма, розмір і взаємне розташування капілярів

відрізняються різноманітністю і невпорядкованістю. Капіляри можуть бути *наскрізними, сліпими або внутрішніми закритими* (рис. 1.20).

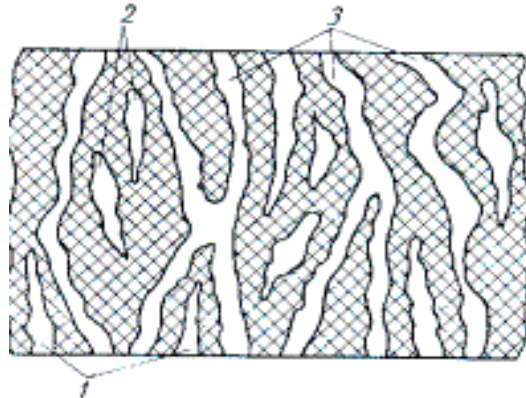


Рисунок 1.20 – Реальна пориста структура: 1 – сліпі пори;
2 – внутрішні закриті; 3 – наскрізні [82]

Всі види капілярів найчастіше мають змінний поперечний перетин, а уздовж осі можуть бути прямолінійними, звивистими або петлеподібними. Сліпі пори є закритими для потоків пари, рідини та інертних газів. Каналоутворюючі відкриті пори контактують з оточуючим середовищем і при певних умовах можуть зволожуватись або осушуватись, причому ці процеси часто відбуваються з різних кінців пори одночасно, що обумовлює в них перенесення рідкої і парогазової фаз, перенос енергії та проходження фазових перетворень. Відкриті пори можуть сполучатись між собою, що додатково ускладнює динаміку тепломасопереносу. Тупикові пори відкриті з одного кінця і можуть або зволожуватись, або осушуватись, що здійснює вплив на тепловологісний стан капілярно-пористого тіла.

Для будівельних матеріалів капілярні пори є переважно наскрізними і сполучаються між собою [80], тобто задіяними у вологопереносі. Крім того, в процесі експлуатації відбувається неупорядковане утворення тріщин в твердій фазі (рис.1.21) [85], форма яких має довільну конфігурацію і розміри [85]. При цьому збільшується загальна пористість матеріалу.

За взаємним розташуванням капіляри поділяються на регулярні, коли пори орієнтовані певним чином до поверхні тіла чи друг до друга, і нерегулярні

або неупорядковані. Структура будівельних матеріалів наближається до неупорядкованої [80]. Як правило, у структурі керамічних виробів є всі види пор, а їх розмір залежить від складу сировини, способів і режимів сушіння та параметрів випалу.

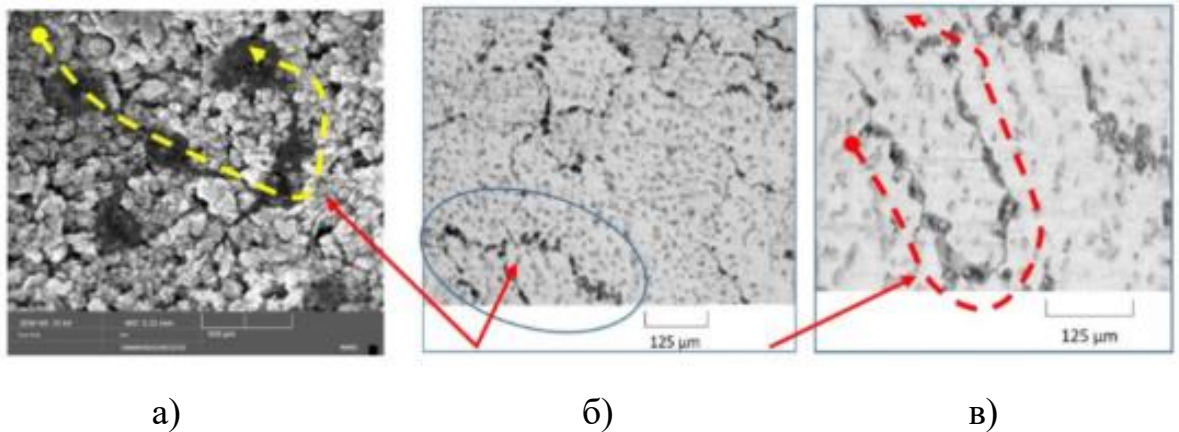


Рисунок 1. 21 – Структура матеріалів: (а) гранульований бетон;
(б), (в) ніздрюватий бетон [85].

Надати точний опис внутрішньої структури реального капілярно-пористого тіла дуже складно. Тому для врахування особливостей внутрішньої будови пористих матеріалів вводяться наступні усереднені геометричні характеристики [82]:

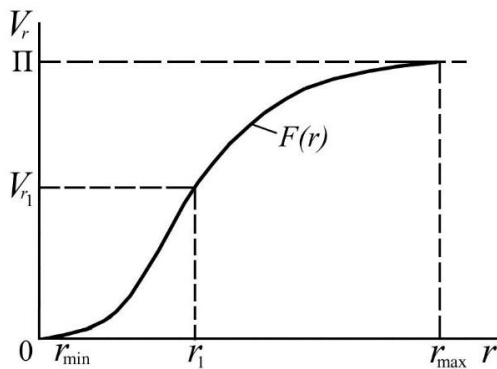
- *пористість* Π – представляє відношення об'єму всіх пор в пористому тілі V_{Π} до загального об'єму V цього тіла, $\Pi = V_{\Pi}/V$. Пористість будівельних матеріалів коливається в широких межах: $\Pi = 0$ для скляних конструкцій, $\Pi = 0,11 \dots 0,13$ для вапняку, $\Pi = 0,08 \dots 0,31$ для бетону важкого, $\Pi = 0,31 \dots 0,58$ для різних видів цегли, $\Pi = 0,77 \dots 0,82$ для пінобетону і до $0,95$ для плит з мінеральної вати та інших теплоізоляційних матеріалів [80].

- *еквівалентний радіус капіляру*, який визначається відношенням $r=2S_{\Pi}/\Pi$, де S_{Π} – площа поперечного перетину капіляру, Π – змочувальний периметр;

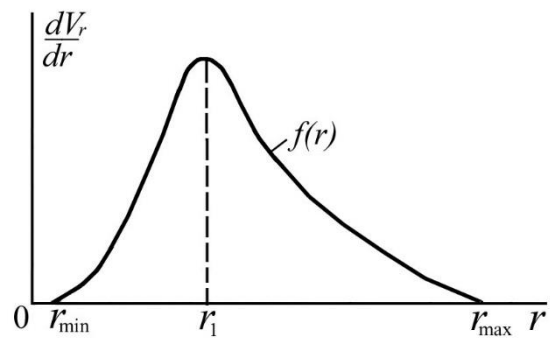
- *питома площа поверхні* $S_{\text{пит}}$, яка визначає сумарну площу бічних поверхонь капілярів або одиниці об'єму пористого тіла – в цьому випадку одиниця вимірювання цієї величини $\text{м}^2/\text{м}^3$, або одиниці маси тіла, тоді одиниця вимірювання $S_{\text{пит}}$ буде $\text{м}^3/\text{кг}$.

Більш детальними структурними характеристиками пористих матеріалів є *інтегральна та диференціальна функції розподілу пор по радіусах* [82].

Інтегральна функція $F(r)$ (рис. 1.21 а) визначає долю об'єму порового простору тіла V_r , в якому містяться пори з радіусами від мінімального $r_{\min}$ до поточного r_1 : $V_r = F(r_1)$. Якщо розглядати весь діапазон радіусів пор від мінімального $r_{\min}$ до максимального $r_{\max}$, то $F(r_{\max}) = \Pi$, тобто дорівнює пористості Π тіла.



а) інтегральна



б) диференціальна

Рисунок 1.21 – Функції розподілу пор за радіусами [86]

Диференціальна функція (рис. 1.21 б) розподілу пор по розмірах отримується при диференціюванні функції V_r по радіусу

$$f(r) = \frac{dV_r}{dr} = \frac{dF(r)}{dr}, \quad (1.22)$$

де максимум на кривій $f(r)$ відповідає радіусу пор, кількість яких є найбільшою в даному матеріалі. Площа під кривою $f(r)$ в інтервалі радіусів капілярів від $r_{\min}$ до $r_{\max}$ дорівнює пористості Π матеріалу

$$\Pi = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{dV_r}{dr} dr = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} f(r) dr. \quad (1.23)$$

Для визначення функцій розподілу пор за радіусами відомі різні експериментальні методи, ефективність використання яких залежить від виду капілярно-пористого матеріалу. Так *метод розсіювання під малими кутами рентгенівських променів* дозволяє отримати дифракційні зображення, по яких

можна визначити розмір капілярів у діапазоні від 2 до 50 – 60 нм. Недоліком способу є його невисока точність. *Метод електронної мікроскопії* дозволяє візуалізувати поверхневий розподіл пор в інтервалі радіусів від 1–10 нм. *Метод капілярної конденсації* продуктивний для визначення розподілу пор в широкому інтервалі радіусів $r = 1,5 - 200$ нм, що дозволяє отримувати інтегральну і диференціальну криві розподілу пор за розмірами. В його основі лежить конденсація пари в порах з утворенням увігнутого меніску. Ефективний радіус r капілярів розраховується за рівнянням Кельвіна, яке для пор циліндричної форми записується у виді $\frac{p_{\pi}^r}{p_{\pi}} = \exp\left(-\frac{2v_k\sigma\cos\theta}{rRT}\right)$, де p_{π}^r і p_{π} – відповідно тиски пари над увігнутою поверхнею та над пласкою поверхнею; σ – коефіцієнт поверхневого натягу конденсату; v_k – молярний об'єм конденсату; θ – крайовий кут змочування; R – універсальна газова стала; T – температура. Недоліком є велика тривалість досліду: дослідження одного зразка займає 10 – 15 діб. *Метод ртутної порометрії* дозволяє вимірювання радіусів капілярів у широкому діапазоні: від 1 до 10^5 нм, але є достатньо складним: в капіляри пористого матеріалу під високим тиском втискається ртуть, яка для матеріалу пор є незмочувальною рідиною. Для заповнення об'єму пор ртуттю потрібно подолати силу опору $f_c = b\sigma\cos\theta$, де b – периметр пори, а з іншого боку сила зовнішнього тиску P буде $f_c = PS$, де S – площа перетину пори. З виразу $pS = b\sigma\cos\theta$, що для капілярів циліндричної форми прийме вид $p\pi r^2 = 2\pi r\sigma\cos\theta$, розраховуються радіуси капілярів, які при заданому P заповнюються ртуттю: $r = 2\sigma\cos\theta / P$. По всіх вимірах будується інтегральна крива розподілу пір по радіусу. До недоліків методу варто віднести складність установки, токсичність ртуті, необхідність застосування високих тисків ртуті, аж до декількох тисяч атмосфер, що може приводити до деформації структури зразків, і, отже, до неточно визначеної порометричної залежності [82, 86].

Крім природи і особливостей внутрішньої будови капілярно-пористих матеріалів, на проходження в них тепло- і вологопереносу впливає взаємодія

рідини, що заповнює капіляри зі стінками капілярів. Коли сила взаємодії молекул рідини і матеріалу стінки капілярів більша за взаємодію між молекулами рідини, рідина називається змочувальною, а поверхня тіла – гідрофільною [87]. У цьому випадку поверхня рідини у капілярі буде увігнутою, тиск рідини зменшиться і дія капілярних сил буде прагнути її підняти.. В іншому випадку, коли сила взаємодії між молекулами рідини перевищує силу їх взаємодії зі стінками капілярів, рідина прагне скоротити площу контакту з твердим тілом і поверхня рідини стає опуклою. Така рідина називається незмочувальною, а тверда поверхня – гідрофобною. При цьому сила поверхневого натягу буде намагатись стиснути рідину і, як наслідок, опустити її в капілярі. Отже, в капілярах на поверхні контакту рідкої і газової фаз зв'язаної речовини, тиски яких відповідно P_p і P_r , виникає різниця тисків, викликана силами поверхневого натягу і справедлива рівність $P_p = P_r \pm P_k$, де P_k – капілярний тиск, що для випадку змочувальної рідини буде додатнім, а для незмочувальної рідини – від'ємним. Будівельні матеріали по відношенню до води є гідрофільними, і тиск рідкої фази буде $P_p = P_r + P_k$,

Для визначення **капілярного тиску** існують різні підходи. Відома формула Лапласа для довільної форми капіляру і відповідно поверхні меніску [82, 86]

$$P_k = \sigma(T) \left(\frac{1}{r'_1} + \frac{1}{r'_2} \right), \quad (1.24)$$

де r'_1 і r'_2 – радіуси кривизни двох нормальних взаємно перпендикулярних перетинів поверхні рідини, $\sigma(T)$ – сила поверхневого натягу, $\sigma(T) = 0,07564(1 - 0,002T)$ для води, Якщо капіляр циліндричний, меніск рідини буде сферичною поверхнею і $r'_1 = r'_2 = r' = r/\cos\theta$, де r – радіус капіляру, θ – крайовий кут змочування.

В [82] пропонується капілярний тиск визначати по формулі Леверетта, яка отримана у передбаченні, що різниця тисків у фазах при фільтрації

двохфазної речовини виражається через функцією миттєвої вологонасиченості $S_p = \Psi_p / \Pi$, яка характеризує як відношення об'єму рідини до загального об'єму:

$$P_k = \sigma(T) \cos \theta \sqrt{\frac{\Pi}{K_0}} J_L(S_p). \quad (1.25)$$

Тут Ψ_p – об'ємна частка рідини в пористому тілі; θ – крайовий кут змочування рідиною капілярів пористого тіла; J_L – функція Леверетта яка знаходиться експериментально, однак її визначення спряжено зі значними труднощами навіть для ізотермічних умов [86].

У [88] авторами запропонована для визначення середнього капілярного тиску в порах тіла формула

$$P_k = 2\sigma(T) \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{\theta}{r} f(r) dr / \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \theta f(r) dr = \frac{2\sigma(T)}{r^*}, \quad (1.26)$$

в якій введено характеристичний параметр дисперсності розмірів пор r^* , що може бути визначений, якщо відома диференційна функція розподілу капілярів за розмірами та об'ємна частка $\theta(r)$ капіляру, зайнятого рідиною:

$$r^* = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \theta(r) f(r) dr / \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{\theta(r)}{r} f(r) dr, \text{ де } r_{\min}, r_{\max} - \text{мінімальний і максимальний радіуси}$$

капілярної пори, $r_{\min} < r^* < r_{\max}$.

1.4.2 Математичні моделі тепло- і вологопереносу в капілярно-пористих матеріалах

Прогнозування рівнів тепловтрат із приміщень у навколишній простір через огорожувальні конструкції залежить від точності та надійності методів дослідження тепловологопереносу через капілярно-пористі середовища [89]. Метод математичного моделювання є найбільш ефективним, оскільки експериментальні методи дослідження полів температури та концентрацій компонентів зв'язаної речовини в об'ємі капілярно-пористого тіла при істотно

нестационарних умовах оточуючого середовища є складними та високозатратними по часу і матеріальним ресурсам.

Перенос маси і енергії при зволоженні або осушенні пористих матеріалів в загальному випадку відбувається шляхом дифузії, фільтрації та за рахунок фазових перетворень [82]. В залежності від умов проходження зволоження або осушення і особливостей внутрішньої будови матеріалу, тепломасоперенос може відбуватись переважно дифузійним способом або фільтраційним, що дозволяє майже без погіршення точності зменшувати кількість рівнянь в математичній моделі та істотно спростувати її рішення. Взагалі число рівнянь переносу в математичній моделі визначається числом параметрів стану системи, що залучаються для розрахунку потоків теплоти і маси компонентів зв'язаної речовини, а також параметрів міжфазної взаємодії [86].

В роботі [82] розроблені дифузійна і дифузійно-фільтраційна математичні моделі динаміки сушіння капілярно-пористих матеріалів, в основі яких лежать закони термодинаміки необоротних процесів, які не розглядають особливості різних механізмів молекулярного переносу [86]. Пористий матеріал розглядається як багатокомпонентна система, що включає тверду фазу – кістяк, пори якого заповнені рідиною і парогазовою сумішшю.

При помірних швидкостях зневоднення основним механізмом переносу енергії і маси компонентів в капілярно-пористому тілі є дифузійний [82]. Математична модель дифузійного сушіння [82] включає в себе диференціальне рівняння теплопереносу з урахуванням теплового ефекту випаровування рідини, записане для багатокомпонентного пористого тіла в цілому за умови постулату про локальну термодинамічну рівновагу фаз, та масопереносу вологи в рідинному і газовому станах

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T + \varepsilon \frac{L}{c_{\text{эф}} \rho_T} \frac{\partial U}{\partial \tau}, \quad (1.27)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m (\nabla^2 U + \delta_T \nabla^2 T). \quad (1.28)$$

Тут U – об'ємна концентрація зв'язаної вологи; a – коефіцієнт

температуропровідності вологого капілярно-пористого матеріалу; $c_{\text{еф}}$ – ефективна теплоємність тіла; ε – коефіцієнт фазового перетворення, що враховує зміну концентрації рідини внаслідок випаровування; ρ_t – густина твердої фази; L – питома теплота фазового переходу; a_m – ефективний коефіцієнт дифузії вологи; δ_T – термоградієнтний коефіцієнт, ∇ – оператор Гамільтона.

Система рівнянь (1.27) – (1.28) не містить рівняння переносу газів що не конденсуються, припускаючи що їх концентрація є незрівнянно малою у порівнянні з концентрацією вологи. Коефіцієнт фазового переходу ε ($0 < \varepsilon < 1$) враховує співвідношення між зміною вологовмісту тіла за рахунок фазового перетворення компонентів рідкої фази $d_i W$ до зміни вологовмісту тіла в результаті масопереносу вологи dW і фазових перетворень $d_i W$

$$\varepsilon = \frac{d_i W}{d_i W + dW}. \quad (1.29)$$

І хоча визначення величин $d_i W$ і dW представляється складною задачею, оскільки процеси вологопереносу і фазових перетворень рідини проходять практично незалежно, однак для значного кола капілярно-пористих матеріалів цей коефіцієнт визначено.

Коли інтенсивність тепломасопереносу є такою, що загальний тиск у порах тіла стає більшим ніж тиск оточуючого середовища, під дією градієнтів тиску виникає конвекційний або фільтраційний перенос вологи. Математична модель дифузійно-фільтраційного тепловологопереносу в капілярно-пористому тілі (1.27) – (1.28) доповнюється рівнянням фільтрації [82]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T + \varepsilon \frac{L}{c_{\text{еф}}} c_m \frac{\partial U}{\partial \tau}, \quad (1.30)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \left(\nabla^2 U + \delta_T \nabla^2 T + \delta_p \nabla^2 P \right), \quad (1.31)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = a_p \nabla^2 P - \varepsilon \frac{c_m}{c_{\text{сф}}} \frac{\partial U}{\partial t}, \quad (1.32)$$

де c_m – питома ізотермічна масоємність; δ_p – бароградієнтний коефіцієнт; a_p – коефіцієнт конвективної дифузії.

Коефіцієнти переносу, що входять в рівняння (1.28), (1.31) і (1.32) потребують експериментального визначення. Вплив руху сухого повітря в цих моделях не враховується.

Відома також математична модель Вітаккера [89], яка включає диференційні рівняння енергії для визначення температури, збереження маси, з якого визначається вологовміст тіла та кількості руху для розрахунку тиску газової фази. Модель будувалась на основі відомих закономірностей процесів переносу в суцільних середовищах. Капілярно-пористе тіло ним розглядалось як трифазна система, що включає твердий кістяк, рідку фазу і парогазову суміш. Система рівнянь доповнювалась формулами Дарсі для фільтраційного переносу рідини і газу, Леверетта для капілярного тиску, Клапейрона-Клаузіуса та Кельвіна. Для визначення інтенсивності випаровування залучається рівняння масопереносу рідкої фази, в якому функція вологовмісту вважається відомою, тоді як її визначення без врахування впливу фазового переходу є дуже наближеним.

У роботі [90] представлено математичну модель сушіння вологих будівельних матеріалів, в якій волога в капілярах переноситься у вигляді води і пари під впливом змінних тиску і температури оточуючого середовища. Автори розглядають одночасний капілярний перенос води та дифузійний перенос пари в двовимірній області. Вплив руху сухого внутрішньопорового повітря в цих моделях не враховувався. Математичні моделі тепломасопереносу в однорідних будівельних матеріалах, що розроблені в [91 – 93], включають чотири основні рівняння переносу: рідкої фази, пари, сухого повітря та енергії, в яких незалежними змінними є об’ємні концентрації компонентів зв’язаної речовини і температура матеріалу. Досліджуваним будівельним матеріалом була обрана

цегла, в порах твердого каркасу якої присутні вода і вологе повітря. Вміст рідкої фази змінюється в результаті процесів капілярного переносу, випаровування та конденсації, а зміна паровмісту обумовлена процесами дифузії та фазового перетворення. Система рівнянь замикається напівемпіричною залежністю для коефіцієнта дифузії пари, в яку входить об'ємний вологовміст матеріалу W_v , визначення якого в роботах здійснюється за рівнянням балансу, в яке входить цей коефіцієнт дифузії. Інтенсивність фазових перетворень автори визначають як похідну dW_v/dt , однак зміна вологовмісту пористого матеріалу відбувається не тільки за рахунок фазових перетворень, а і за рахунок процесів переносу. В роботі [88] математична модель динаміки сушіння капілярно-пористих тіл для випадку дифузійно-фільтраційного механізму тепломасопереносу включає диференційні рівняння переносу маси рідкої, парової і повітряної фаз та переносу енергії. Система рівнянь замикається формулами для інтенсивності фазових перетворень, коефіцієнтів дифузії рідкої і газової фаз, для капілярного тиску (1.26), Дарсі для визначення компонентів вектору швидкості рідини і газу та рівнянням термоконцентраційного деформування.

В роботі [94] опис процесів тепломасообміну в капілярно-пористих матеріалах пов'язаний з моделлю поглиблення зони випаровування. При побудові математичної моделі сушіння вологого матеріалу розрізняють сухі і вологі зони. У сухій зоні присутня тільки газоподібна волога (у вигляді пари), а у вологій зоні всі пори зайняті рідкою вологою. Відповідно випаровування рідини відбувається лише на межі контакту сухої і вологої зон, поступово зміщуючись вглибину вологої зони. Умова теплообміну між зонами представляється граничною умовою четвертого роду, доповнену членом, що враховує тепловий ефект фазового перетворення. Таке представлення процесу випаровування передбачає випаровування з поверхонь менісків повністю заповнених рідкою фазою капілярів, тоді як відомо, що при невисоких вологовмістах капілярно-пористих матеріалів частина капілярів містить вологу

в рідкому і пароподібному станах [85, 86]. Вираз для маси рідини що випаровується містить осереднений коефіцієнт дифузії пари, однак інформація, як його визначати відсутня.

Існує інший підхід для опису процесів тепломасообміну в капілярно-пористих матеріалах [85, 95–98], в основі якого лежить метод перколяції. На відміну від математичного опису дифузійних процесів, де розглядається випадкове переміщення частинки в регулярному середовищі, метод перколяції описує регулярний рух речовини у випадковому середовищі. Відповідно до цього підходу реальна мікроструктура пористого матеріалу замінюється спрощеною модельною системою взаємопов'язаних і пересічних каналів з відомим розташуванням і геометричними розмірами. Канали частково заповнені рідкою і паровою фазами. Далі така система розбивається на мікрооб'єми, частина з яких включає капіляри повністю заповнені рідкою, а частина – капіляри заповнені парою. Мікрооб'єми мають бути достатньо великим (більшим за розміри пор), щоб забезпечити усереднення властивостей матеріалу в їх межах. З іншого боку, в межах мікрооб'ємів повинна виконуватись умова локальної термодинамічної рівноваги, яка лежить в основі теоретичного дослідження нерівноважних процесів переносу у відкритих системах. У відповідності до умови локальної термодинамічної рівноваги у межах цих мікрооб'ємів відсутні градієнти досліджуваних параметрів (наприклад, концентрації рідини, температури). Початковий розподіл вологи в пористому модельному тілі характеризується кількістю мікрооб'ємів заповнених рідкою фазою. Відношення кількості макрооб'ємів заповнених рідиною до загальної їх кількості визначає вірогідність виникнення перколяції, тобто переміщення вологи в макрооб'єми, заповнені парою і в оточуюче середовище. Вивільнення рідини відбувається з горловин капілярів заповнених рідиною що контактують з оточуючим середовищем.

Дослідження переносу вологи в процесі зневоднення капілярно-пористих матеріалів на основі методу перколяції характеризуються просторовим

масштабом і фізичними процесами, які відображаються в моделях. В якості розрахункових методів використовуються ймовірнісні чисельні методи, такі як Монте-Карло або детерміністичний.

В [95] автори на тривимірній просторовій сітці досліджують ізотермічне заповнення і звільнення від рідкої фази капілярів пористої системи, враховуючи вплив гравітаційних сил. В якості математичної моделі залучається лінійне стаціонарне рівняння дифузійного переносу рідкої фази, яке доповнюється рівнянням для капілярного тиску. Досліджувана пориста система у вигляді кубу контактує з оточуючим середовищем лише однією гранню. Час зневоднення пропонується визначати через значення швидкості сушіння, які знаходяться як функції вологонасиченості матеріалу. Однак швидкість сушіння істотно залежить від температури [82] оточуючого середовища і пористого матеріалу, зміна яких що в роботі [95] не враховується. У роботі [96] враховується вплив на динаміку зневоднення капілярно-пористого матеріалу наявності кутових плівок, які залишаються при вивільненні рідкої фази з капіляру. Автори їх моделюють як ізольовані капілярні кільця, що оточують тверді блоки елементарних об'ємів, на які розбивається розрахункова область. Видалення цієї рідини моделюється як вторинний капілярний ефект. Така ускладнена мережева модель може бути використана для областей з більш складною геометрією. В [97, 98] для математичного моделювання нестационарного масопереносу в процесі сушіння капілярно-пористого матеріалу, проведеного на базі класичного підходу, де пористе середовище розглядається як континуум, залучається метод перколяції для визначення макроскопічних фізичних параметрів, що входять в математичну модель. Математична модель включає диференціальне рівняння нестационарного масопереносу, записане в цілому для вологи в рідкому і паровому станах. Потенціалом масопереносу є градієнти тисків рідкої і парової фаз. Капілярний тиск визначається за формулою Лапласа. При використанні методу перколяції розглядається кубічна мережа $25 \times 25 \times 25$ елементарних об'ємів з дискретними порами. Верхня частина

мережі контактує з газовою фазою, а нижня частина з рідкою. На бокових гранях мережі задаються періодичні граничні умови. Початковою умовою є покладання тиску рідини рівним нулю, тоді тиск газової фази дорівнює капілярному тиску. Газова фаза проникає в порову мережу та витискає рідку фазу у зовнішній нижній резервуар. Тобто моделюється капілярно-контрольоване переміщення рідкої і газової фаз. В роботі детально викладений алгоритм розрахунку. В результаті отримано числові залежності для зміни інтенсивності випаровування в часі, парціального тиску пари і коефіцієнта дифузії води в залежності від вологонасиченості матеріалу. Викладений підхід є досить трудомістким, незважаючи на те, що розглядається проходження процесу сушіння при стаціонарних температурних умовах.

В будівельних конструкціях в залежності від погодних умов процеси зневоднення чергуються з процесами їх зволоження. Автори роботи [85] запропонували підхід математичного моделювання динаміки сорбції і десорбції в капілярно-пористому будівельному матеріалі, розглядаючи пористе середовище як систему лінійних мікроканалів, орієнтованих уздовж осей тривимірної системи координат (рис.1.22,а). В якості еквівалентного діаметру d_k цих каналів прийнято середній діаметр пор. Вся площа каналу моделюється набором кубічних елементів (рис.1.22,б), розмір s яких обирається з відношення $s^3 \varepsilon = 3s d_k^2 - 2s d_k^3$, де ε представляє пористість будівельного матеріалу.

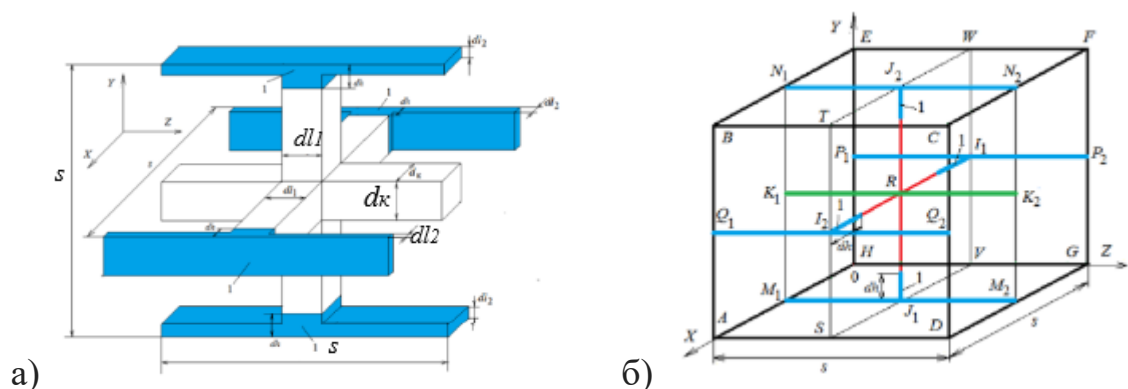


Рисунок 1.22 – Кубічний елемент обчислювальної схеми моделі мережі капілярно-пористого матеріалу: а) об'ємне зображення окремої обчислювальної кубічної комірки; б) кубічний елемент.

Кожний кубічний елемент володіє певною відносною вологістю парогазової суміші, об'ємною концентрацією рідини в тілі, тиском і температурою. Розміри каналів, заповнених рідиною (позначених голубим кольором) визначаються з відношень, що зв'язують масу рідкої фази, яка визначається з ізотерми сорбції-десорбції, та її густини. Для дослідження зміни вологості та температури пористого матеріалу в часі сформульовано рівняння нестационарного масового та теплового балансу для розглянутих кубічних елементів, розташованих послідовно в напрямку осі OZ . Покладається, що масообмін в суміші сухого повітря і водяної пари відбувається в основному в каналі з осями K_1K_2 шляхом молекулярної дифузії і фільтрації, для чого залучаються закони Фіка і Дарсі. Перенесення рідинної фази в каналах з осями M_1M_2 , N_1N_2 , P_1P_2 і Q_1Q_2 (рис. 1.22,б) відбувається за рахунок фільтрації, що є результатом дії градієнта тиску в рідкому середовищі. Цей фільтраційний потік описується рівнянням Дарсі. Для розрахунку теплового стану будівельної конструкції залучається рівняння переносу енергії, записане окремо для газової і рідкої фаз. Результати чисельного моделювання зміни по товщині керамічної цегли в різні моменти часу парціального тиску пари, відносної вологості повітря, температури, об'ємної концентрації рідини і густини потоку пари з поверхонь стовпа рідини при сорбції і десорбції вологи для однорідних граничних умов на бічних поверхнях якісно відповідають фізиці ефектів тепломасопереносу в пористих системах. Вагомим обмеженнями даної математичної моделі є інтервал лише додатних температур оточуючого середовища. Крім того, для визначення вологовмісту кожного з об'ємних елементів пористої системи слід мати наявності залежності рівноважного вологовмісту від відносної вологості парогазової суміші, вигляд якої в роботі не наведено.

Слід зазначити, що жодний з розглянутих підходів математичного моделювання тепло- і масопереносу в пористих системах не враховує вплив на проходження цих процесів сонячної радіації.

1.5 Висновки. Постановка задач дослідження

1. На основі проведеного літературного огляду можна зробити наступні висновки:

- Річний технічно-досяжний енергетичний потенціал сонячної енергії в Україні є еквівалентним 6 млн тон умовного палива і його використання дозволить заощадити біля 5 млрд. м³ природного газу. Відповідно тенденцією сучасного децентралізованого енергозабезпечення є все більш широке впровадження систем акумулювання і трансформації сонячної енергії – сонячних систем – для потреб отримання теплової та електроенергії.

- При проектуванні активних і пасивних сонячних систем слід спиратись на дані про інтенсивність сонячного випромінювання в залежності від широти місцевості, характеристик сприймаючої поверхні, часу доби, пори року та інших характеристик. Для областей України цю інформацію можна знайти в літературі, однак при її отриманні не враховано фактор орієнтації поверхні що сприймає сонячне випромінювання. Крім того, клімат останніх десятиліть зазнає постійних змін, що потребує її постійного оновлення.

- Сумарна сонячна енергія складається з прямої і дифузної сонячної радіації. Існуючі вимірювальні прилади фіксують або пряму сонячну радіацію (піргеліометрами, актинометри), або повний потік сонячної енергії (піранометри або соляриметри). Актуальність експериментальних досліджень потоків сонячного випромінювання підтверджується постійним удосконаленням конструкцій, підвищенням точності і розширенням можливостей експлуатації зазначених приладів.

- Найкращою базою отримання надходжень сонячної радіації вважаються довгострокові експериментальні вимірювання на місці передбачуваної сонячної системи. Однак висока вартість вимірювальних приладів та, як наслідок, обмежене покриття мереж вимірювання сонячного потенціалу сприяло розвитку теоретичних підходів для оцінки інтенсивності сонячного випромінювання. Існуючі математичні моделі поділяються на параметричні

моделі, які вимагають одночасного завдання детальної інформації про атмосферні умови місцевості, та моделі декомпозиції, які використовують інформацію про інтегральне випромінювання для прогнозування компонентів сонячного випромінювання та стану неба. Найбільш часто використовуваною є параметрична математична модель ASHRAE, однак її ефективність потребує уточнення для кліматичних зон України.

- Енергія Сонця істотно впливає на тепловологісний стан огорожень і внутрішніх приміщень будівель і в сонячні дні опалювального періоду до 30% теплоти в будівлі може генеруватись за рахунок сонячної радіації. Врахування цих теплонадходжень через огорожувальні конструкції дозволить знизити витрати теплової енергії і відповідно енергоносіїв на опалення будівель.

- Ефективним методом оцінки теплового стану огорожувальних конструкцій і внутрішніх приміщень будівель з урахуванням фактичних теплових надходжень і тепловтрат є математичне моделювання. При цьому окремо виділяються математичні моделі тепловологопереносу в огорожувальних конструкціях та теплообміну і аеродинаміки у внутрішніх приміщеннях. Незважаючи на велику кількість існуючих підходів до рішення поставлених задач, вплив дії сонячного випромінювання, що зазнає зміни упродовж доби, на динаміку зазначених процесів переносу і як наслідок на тепловий стан приміщень в жодному з них не враховується.

- Для реалізації математичних моделей тепло- і вологопереносу в каплярно-пористих будівельних конструкціях слід володіти інформацією про залежність рівноважного вологовмісту матеріалу від температури та відносної вологості оточуючого парогазового середовища. Однак в літературі такі залежності представлені для досить обмеженого кола будівельних матеріалів при деяких окремих температурах.

2. У відповідності до аналізу оглянутих літературних джерел сформульовані такі завдання дисертаційної роботи.

- На основі довгострокових експериментальних досліджень виявити закономірності зміни інтенсивності сонячного випромінювання на огорожувальних конструкціях різної орієнтації.
- Розробити математичну модель перенесення теплоти і вологи через огорожувальну конструкцію будівлі за наявності сонячного випромінювання і виконати розрахунковий аналіз впливу сонячного випромінювання на температурний і вологий стан огорожувальних конструкцій.
- З використанням запропонованої математичної моделі динаміки зміни тепловологісного стану приміщень з урахуванням додаткового надходження теплоти від сонячної радіації виявити залежність характеристик цього стану від величини променевих потоків.
- Розробити розрахунково-експериментальний метод визначення рівноважного вологовмісту будівельних матеріалів огорожувальних конструкцій.

РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

2.1 Експериментальне дослідження інтенсивності сонячної радіації в різні пори року

З метою довгострокового накопичення даних про інтенсивність сонячної радіації, визначення величини її мінімальних, максимальних і середніх значень, відсотку сонячних днів в залежності від пори року та орієнтації поверхні що опромінюється в просторі, на даху другого корпусу ІТТФ НАН України за адресою вул. Булаховського, 2, на стаціонарній металевій платформі встановлено піранометр СР-М1 [47] (переваги і схема якого представлені в п. 1.2.2 параграфу 1.2). Електронна частина, що фіксує показання термометрів для вимірювання сигналів та обробки даних знаходиться в кімнаті корпусу, що розміщена найближче до приладів. Вимірювання вихідних сигналів ПТП E_i на i -й грані перетворювача густини сонячного випромінювання та визначення $Q_i = K_{\text{ієф}} \cdot E_i$, ($i=1, \dots, 5$) на кожній з п'яти граней кубічного теплосприймаючого блоку 2 (рис. 1.17) проводиться з інтервалом 10 хв. З метою виключення ймовірності розсіювання сонячної радіації внаслідок забруднення куполу піранометру, його слід ретельно очищувати.

Результати обробки виміряних піранометром СР-М1 даних і їх аналіз представлені у вигляді графіків зміни локальних у місцях розміщення датчиків (по сторонах світу), і осереднених по поверхні теплоприймача значень теплових сонячних потоків за кожен добу і кожний місяць року.

На рисунку 2.1 представлено графіки зміни інтенсивності сонячного випромінювання в залежності від орієнтації теплосприймаючих поверхонь ПТП в просторі упродовж одного з найхолодніших місяців року – лютого.

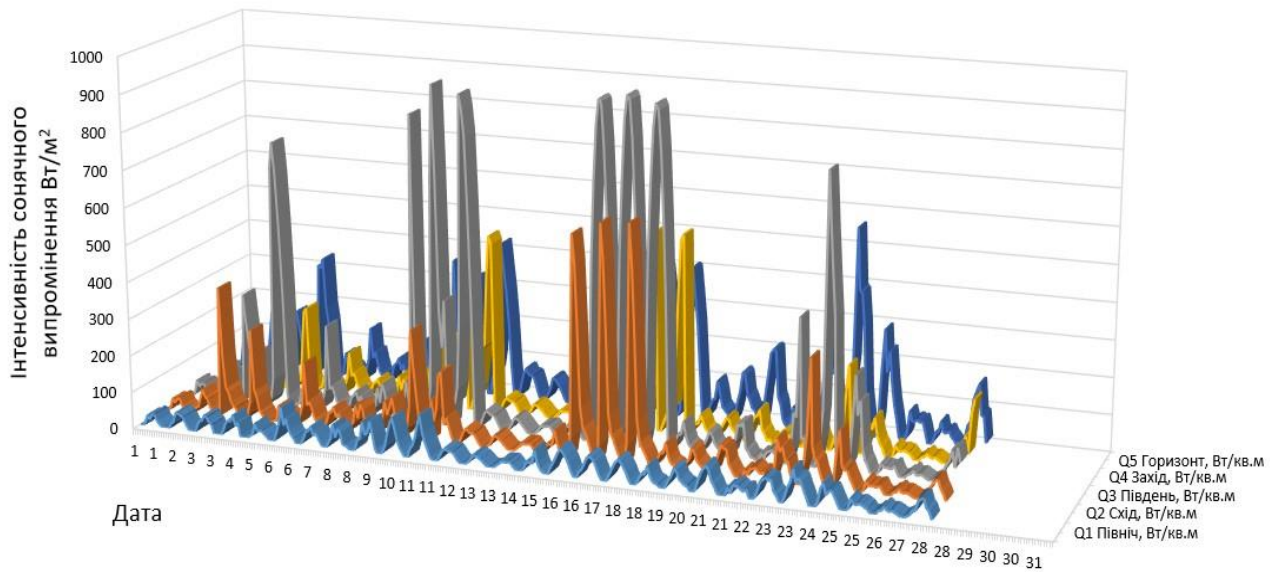


Рисунок 2.1 – Графіки зміни інтенсивності сонячного випромінювання, що надійшло на кожен грань блоку ПТП упродовж лютого

Максимальні значення інтенсивності сонячного випромінювання Q_3 , як в денний, так і в нічний час кожної доби цього місяця, фіксуються ПТП, що розташований на грані блоку ПТП 2 (рис.1.17), обернений на південь, а мінімальні – Q_1 – з північної сторони. Графіки дозволяють зробити висновок стосовно кількості періодів відносно сонячних днів – їх було 4: з 3.02 по 6.02 з максимумом $Q_3 = 650 \text{ Вт/м}^2$, з 10.02 по 12.02 з максимумом $Q_3 = 840 \text{ Вт/м}^2$, з 16.02 по 20.02 з максимумом $Q_3 = 860 \text{ Вт/м}^2$, та з 23.02 по 25.02 з максимумом $Q_3 = 700 \text{ Вт/м}^2$. Причому ближче до кінця місяця – в останній майже безхмарний період лютого, а саме 24.02, спостерігається зростання значення інтенсивності сонячного випромінювання, що сприймає горизонтальна грань блоку ПТП $Q_5 = 560 \text{ Вт/м}^2$, тоді як при найвищих променевих теплових потоках в середині місяця Q_5 не перевищувало 410 Вт/м^2 , але в цей час спостерігались досить високі сонячні теплові потоки на західній поверхні блоку ПТП $420 \leq Q_5 \leq 500 \text{ Вт/м}^2$, що пояснюється збільшенням світового дня майже на 1,5 години. Максимальні значення інтенсивності сонячного випромінювання Q_2 на поверхні блоку ПТП, обернений до західної сторони світу Q_4 , зафіксовано з

16.02 по 18.02 і досягнуло 500 Вт/м^2 , що більше ніж в 6 разів перевищувало складову прямого сонячного випромінювання Q_1 на північній грані в світлу пору доби. Ці результати в 2015 році було використано для оптимізації теплопостачання при опалюванні приміщень корпусів ІТТФ НАНУ, з метою зменшення грошових витрат.

На рисунках 2.2 і 2.3 представлено графіки зміни інтенсивності сонячного випромінювання в світлий період самого теплого дня у лютому – 18 лютого, та самого холодного дня 13 лютого. Максимуми густини сонячного теплового потоку протягом світлого періоду 18.02 розподілені досить нерівномірно. Для північної, південної і горизонтальної сторін блоку ПТП максимальні потоки Q_1 , Q_3 і Q_5 зафіксовано в період між 10 і 12 годинами дня – коли Сонце в Зеніті. Максимум Q_2 на східній грані спостерігається близько 8 години ранку, через годину після сходу сонця, а східну грань Сонце найяскравіше освітлює з 14 по 15 години і відповідно максимум Q_2 спостерігається при заході Сонця. З північної сторони очікувати на додаткове зігрівання приміщень сонячною радіацією не є доцільним.

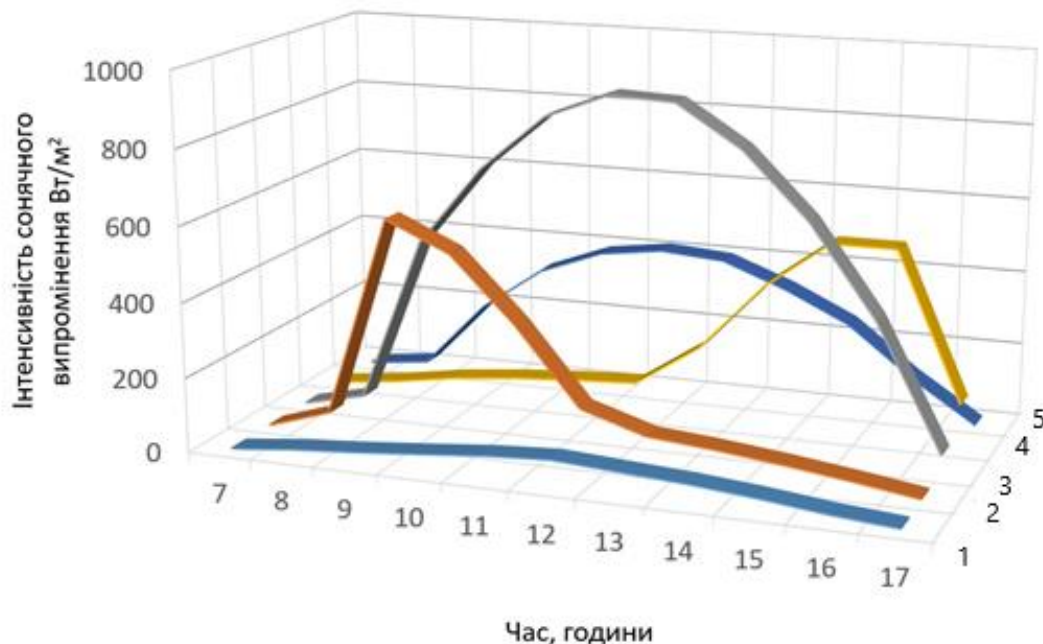


Рисунок 2.2 – Зміна в часі інтенсивності сонячного випромінювання, що надійшло на грані блоку ПТП протягом найтеплішого дня лютого: 1- Q_1 Північ, 2 - Q_2 Схід; 3 - Q_3 Південь; 4 - Q_4 Захід; 5 - Q_5 Горизонт

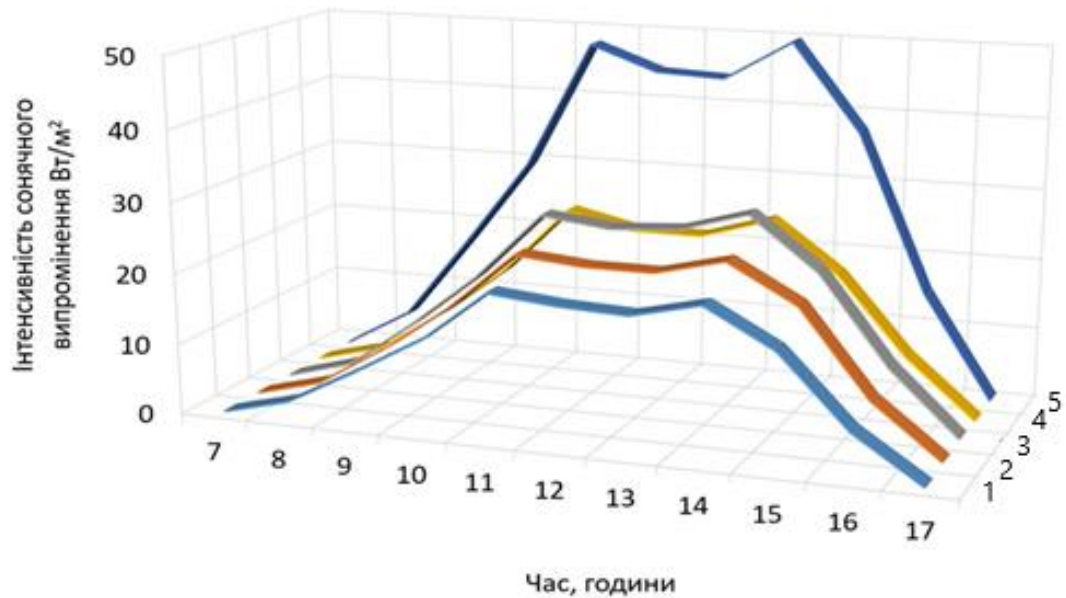


Рисунок 2.3 – Зміна в часі інтенсивності сонячного випромінювання, що надійшло на грані блоку ПТП протягом найхолоднішого дня лютого:

1- Q_1 Північ, 2 - Q_2 Схід; 3 - Q_3 Південь; 4 - Q_4 Захід; 5 - Q_5 Горизонт

В найхолодніший день 13 лютого наявність осадків і вітру відобразились на всіх графіках зміни інтенсивності сонячного випромінювання двома максимумами. З північної сторони Q_1 не перевищила 10 Вт/м^2 , а з південної Q_3 – 25 Вт/м^2 , тоді як на горизонтальну поверхню максимум густини променевого теплового потоку Q_5 досягнув 50 Вт/м^2 .

На рисунку 2.4 представлено результати вимірювання густини потоку сонячного випромінювання на грані блоку ПТП (рис. 1.17) протягом квітня. За середньостатистичними даними за останні десять років [99] квітень в Києві – місяць з досить нестабільною погодою: кількість днів з опадами приблизно співпадає з кількістю сонячних днів. Однак результати сонячної інсоляції свідчать про те, що майже всі квітневі дні характеризуються змінною хмарністю.

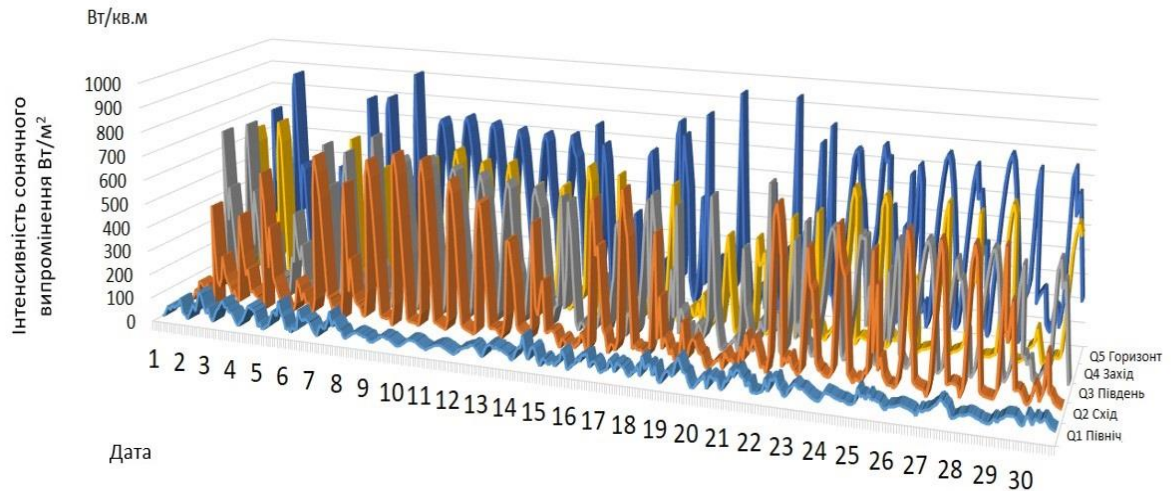


Рисунок 2.4 – Зміна інтенсивності сонячного випромінювання, що потрапляло на грані блоку ПТП у квітні

Порівнюючи теплові потоки сонячної радіації кожного дня можна побачити, що максимальні значення інтенсивності сонячного випромінювання мають місце на горизонтальній поверхні блоку ПТП. Це пояснюється збільшенням висоти сонця над горизонтом і відповідно наближенням кута падіння сонця на горизонтальну поверхню до 90 градусів. По значеннях густин променевих потоків, що були сприйняті поверхнями, оберненими на схід, захід і південь, можна судити про години доби, коли хмари закривали і відкривали сонячні промені. Так, наприклад, 15 і 16 квітня зранку спостерігалась хмарна погода, так як Q_2 майже співпадає з Q_1 і істотно менше Q_3 , Q_4 та Q_5 . Найбільша інтенсивність сонячного випромінювання на горизонтальну грань ПТП $Q_5 = 920$ Вт/м² спостерігалась 20 і 22 квітня, а на грань, обернену на південь $Q_3 = 680$ Вт/м² – 2 і 3 квітня.

В червні має місце найдовша протяжність світлового дня. Кількість днів, коли небо весь день вкрито хмарами незначна. Рівень середніх температур атмосферного повітря значно вищий ніж у квітні. На рисунку 2.5 наведено результати вимірювання піранометром СР-М1 інтенсивності сонячного випромінювання протягом червня.

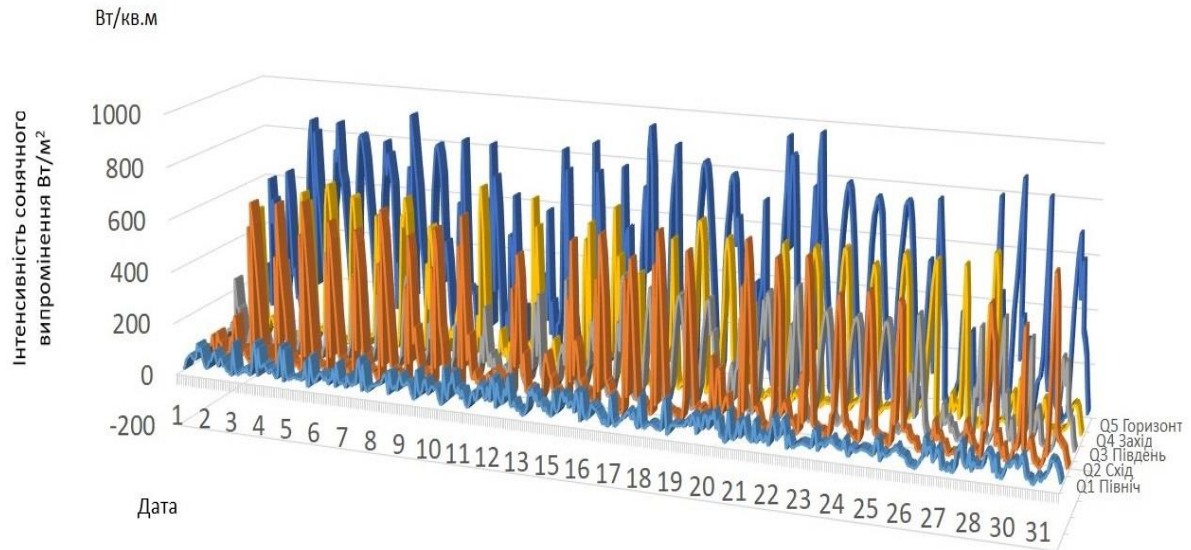


Рисунок 2.5 – Зміна інтенсивності сонячного випромінювання в часі, що потрапляло на грані блоку ПТП у червні

Найвищий рівень сонячної інсоляції спостерігається з 21 по 23 червня – в найдовші світові дні у році. Густина потоку сонячного випромінювання Q_5 на горизонтальну грань блоку ПТП досягає значення 965 Вт/м^2 .

Осінь в Україні порівняно тепла і тривала, з ясними сонячними днями та прохолодними ночами, нерідко спостерігаються заморозки. Негода з затяжними дощами, низькими температурами повітря настає в листопаді. На рисунку 3.7 представлено графіки зміни густини променевих сонячних потоків, сприйнятих гранями блоку ПТП (рис.1.17). У листопаді безхмарних сонячних днів було всього 6 і ще 4 зі перемінною хмарністю. Кут нахилу сонячних променів є такою, що максимальні густини променевих потоків сприймає поверхня ПТП, обернена на південь. В сонячні дні значення Q_3 фіксувалось в межах 650 Вт/м^2 , над рівнем горизонту максимальне значення Q_5 досягало 500 Вт/м^2 .

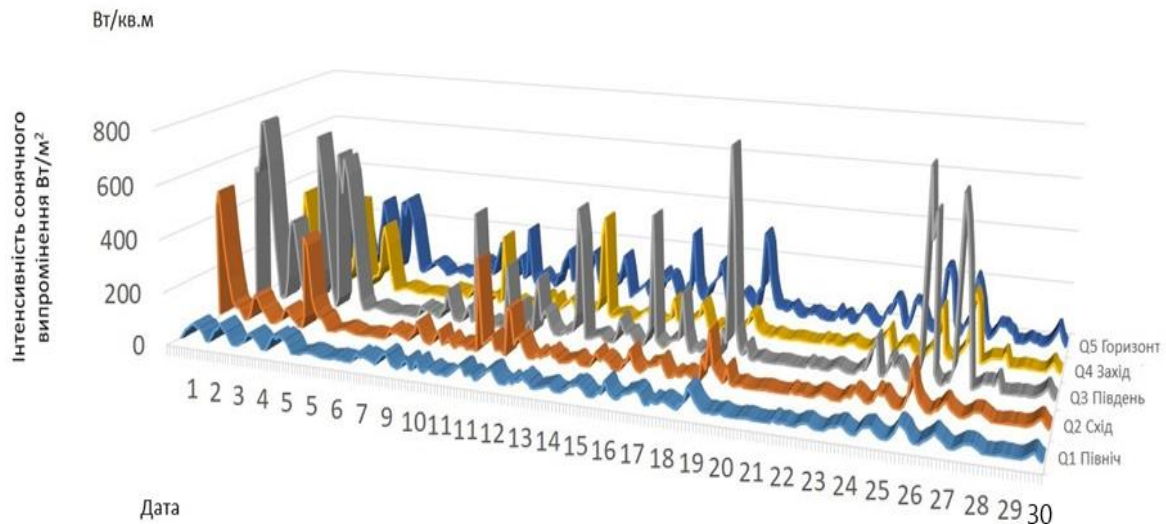


Рисунок 2.6 – Зміна інтенсивності сонячного випромінення в часі, що потрапляло на грані блоку ПТП у листопаді

Щоденно опівдні Сонце піднімається на найвищу висоту над горизонтом, але в різних місяцях під різним кутом (рис. 2.7):



Рисунок 2.7 – Зміна висоти Сонця над горизонтом [100]

Цю висоту можна обчислити за формулою [56]

$$h = 90^\circ - \varphi \pm \delta, \quad (2.1)$$

де h – висота Сонця над горизонтом, град; φ – географічна широта місцевості, для Києва $\varphi = 52^\circ 30'$; δ – схилення Сонця. Схилення Сонця при проходженні через Зеніт дорівнює широті сприймаючого об'єкту, якщо

вважати північну широту зі знаком +, або географічній широті паралелі, на якій Сонце перебуває в зеніті в даний день.

В Україні (на Північній півкулі) висота Сонця h над горизонтом є найвищою 22 червня, коли світовий день є найдовшим і триває більше 16 годин, і найнижчою 22 грудня, коли найменша тривалість світлового дня – 8 годин. У ці дні схилення Сонця $\delta = \pm 23^\circ 27'$ (це широта тропіків), причому у день літнього сонцестояння δ додається, а зимового – віднімається. Тож, 22 червня $h = 63^\circ$, а 22 грудня $h = 17^\circ$. Дні року 21 березня і 23 вересня є днями весняного і осіннього рівнодення. У ці дні Сонце знаходиться в зеніті на екваторі і $\delta = 0^\circ$. Таким чином висота Сонця у Києві 23 вересня і 21 березня $h = 40^\circ$. Розглянемо особливості зміни інтенсивності сонячного випромінювання протягом цих днів на кожну грань блоку ПТП, що наведені на рисунках 2.8 – 2.11.

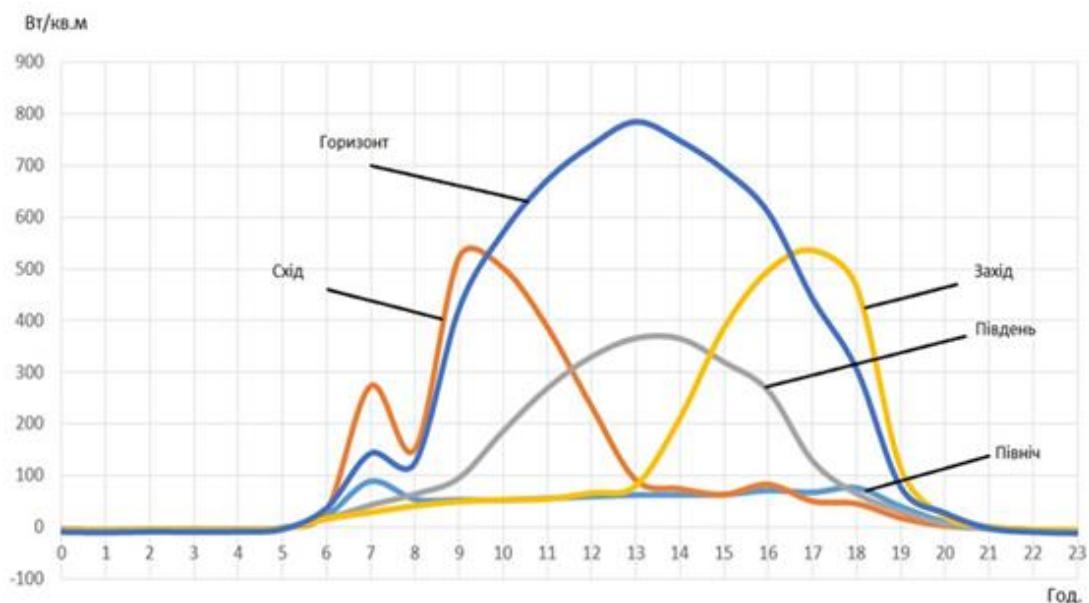


Рисунок 2.8 – Зміна в часі інтенсивності сонячного випромінювання, що надійшло на грані блоку ПТП протягом 22 червня

День 22 червня був майже безхмарний, лише о 8 годині графіки мають перегин, що свідчить про наявність хмарин. Сонце почало сходити о 5 годині ранку і остаточно зайшло о 21 годині. При цьому помітні впливи сонячного випромінювання спостерігається з 6 по 20 години. Максимальні густини

променевих потоків на грані, обернені на схід і захід мають майже однакові значення $\sim 540 \text{ Вт/м}^2$, а на горизонтальну поверхню максимум наближається до 800 Вт/м^2 . На грані, орієнтованій на південь інтенсивність сонячного випромінювання досягає максимуму 370 Вт/м^2 з 13 до 14 годин, на грані, орієнтованій на північ помітні два максимуми – о 7 годині ранку 95 Вт/м^2 та о 18 годині 85 Вт/м^2 .

День зимового сонцестояння 22 грудня був абсолютно безхмарним (рис. 2.9). Максимум густини потоку сонячної радіації сприйнятий перетворювачем ПТП, орієнтованим на південь о 12 годині склав 730 Вт/м^2 . Сприйняття сонячної енергії гранями блоку ПТП, орієнтованими на схід, захід і до лінії горизонту набувають максимальних значень в різний час, але максимальні числові значення густин променевого потоку не істотно відрізняються між собою і наближаються до 225 Вт/м^2 .

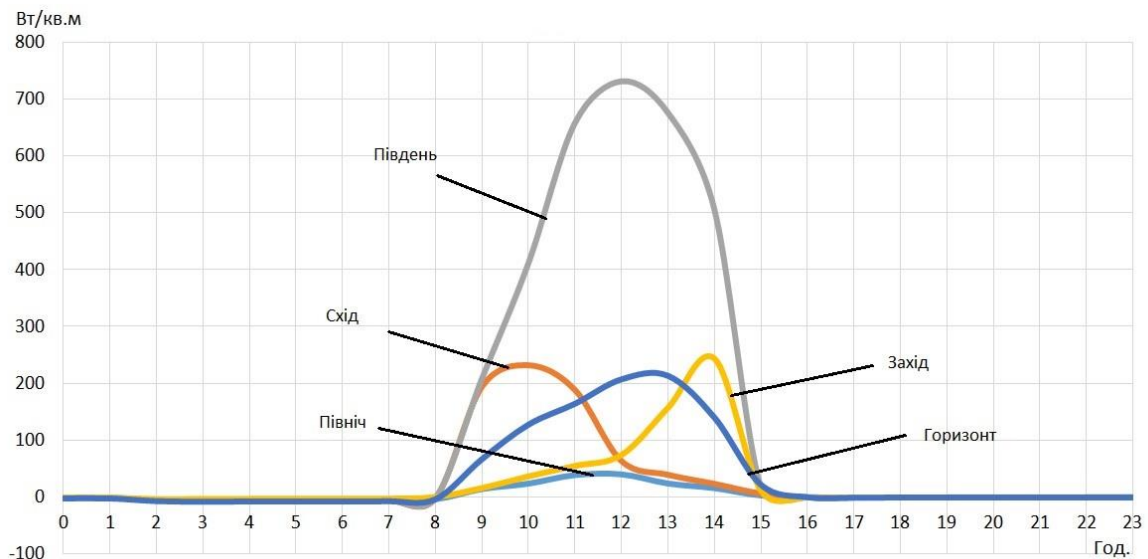


Рисунок 2.9 – Зміна в часі інтенсивності сонячного випромінювання, що надійшло на грані блоку ПТП протягом 22 грудня

День весняного рівнодення 21 березня характеризувався змінною хмарністю в першій половині дня. Про це свідчать перегини на всіх кривих в різні моменти часу (рис. 2.10). Після 12 години густини променевого теплового потоку Q_3 , Q_4 , Q_5 монотонно зростають, досягаючи максимального значення за добу, і далі спадають до нуля.

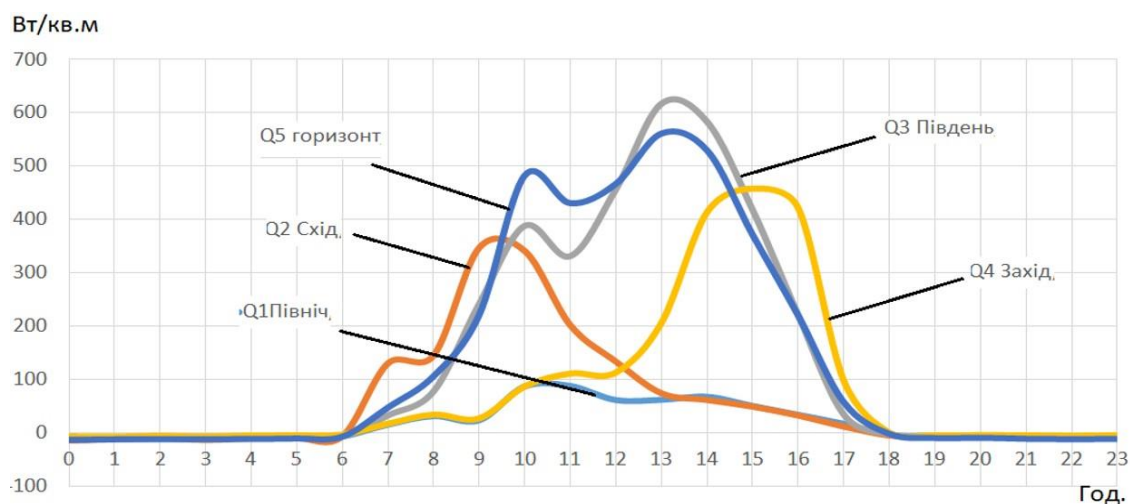


Рисунок 2.10 – Зміна в часі інтенсивності сонячного випромінювання, що надійшло на грані блоку ПТП протягом 21 березня

Максимум інсоляції, яку сприймає датчик ПТП, орієнтований на захід, має місце приблизно на 2 години пізніше від максимумів сонячної годинної інсоляції, що сприймається горизонтально і південно орієнтованими гранями. Основний вплив сонячної радіації припав на горизонтально і південно орієнтовані грані ПТП. Близько 13 години дня найбільші значення $Q_3 = 617$ Вт/м² і $Q_5 = 560$ Вт/м².

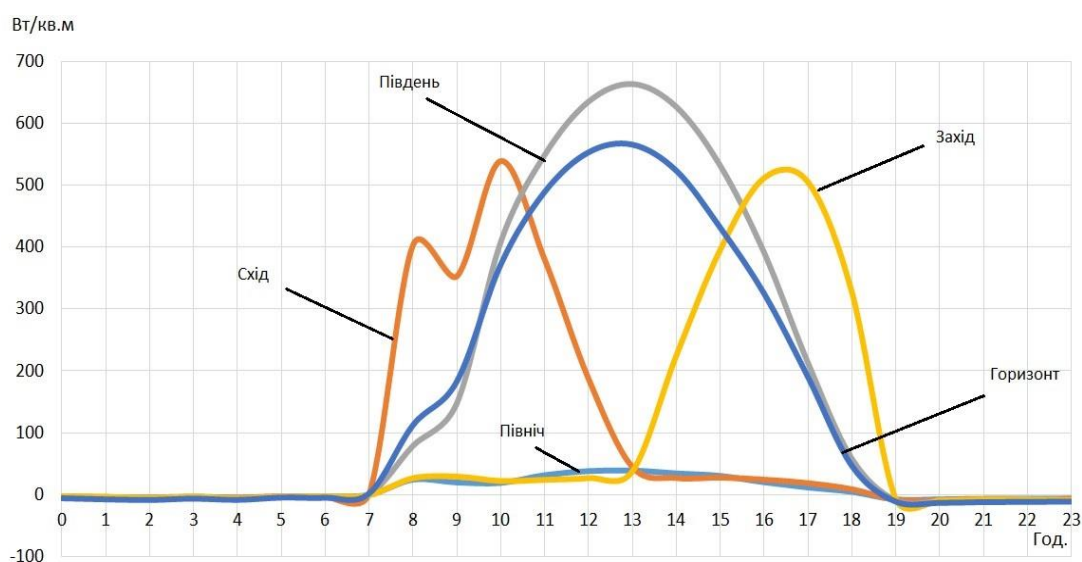


Рисунок 2.11 – Зміна в часі інтенсивності сонячного випромінювання, що надійшло на грані блоку ПТП протягом 23 вересня

У день осіннього рівнодення 23 вересня надходження сонячної радіації на різні поверхні є також істотно нерівномірним. До десятої години більш істотно нагріваються поверхні, обернені на схід, після 16 години – ті, що обернені на захід. Найбільші променеві потоки потрапляють на південно орієнтовані поверхні, з максимумом 670 Вт/м^2 о 13 годині. На горизонтальні поверхні максимум досягав 575 Вт/м^2 також о 13 годині. Хмарність спостерігалась лише о 9 годині.

Отже, аналіз результатів довгострокового вимірювання інтенсивності сонячного випромінювання свідчить про те, що інтенсивність сонячного випромінювання на поверхні різної орієнтації є неоднаковою: поверхні обернені на схід і на захід опромінюються відповідно у часи сходу і заходу Сонця; горизонтальні поверхні і поверхні обернені на південь опромінюються упродовж світлового дня з максимальним тепловим надходженням опівдні, причому лише в літні місяці максимальні променеві потоки потрапляють на горизонтальну поверхню, в решту місяців року найбільш теплосприймаючими поверхнями є обернені на південь; інтенсивність опромінення поверхонь, обернених на північ є незначною упродовж року і не перевищує 70 Вт/м^2 . Основними факторами, які впливають на величину сумарного надходження сонячної радіації протягом доби є тривалість світлового дня, положення Сонця на небосхилі та наявність хмарності. Ці параметри змінюються протягом року, тому для систематичної оцінки обсягів сонячної радіації, що надходить на панелі сонячних енергосистем, на світлопрозорі і непрозорі огорожувальні конструкції будівель, актуальним є залучення розрахункових підходів для визначення місцезнаходження Сонця на небесному схилі упродовж світлої частини кожної доби упродовж року.

2.2 Результати експериментального та розрахункового дослідження інтенсивності сонячної радіації

Для теоретичної оцінки зміни інтенсивності сонячного випромінювання існують декілька підходів. Всі вони включають два етапи: отримання розрахункових залежностей для визначення місця положення Сонця на небосхилі протягом світлого часу доби в будь-який день року та рівняння для інтенсивності сонячного випромінювання. Як зазначалось у п. 1.2.2.3, найбільш повно обґрунтованою та широко застосованою математичною моделлю є модель Американського товариства інженерів з опалення, охолодження та кондиціонування повітря ASHRAE [55]. Вона включає рівняння для інтенсивності сонячного випромінювання на межі земної атмосфери в залежності від доби року, рівнянь для прямого I_b та дифузного I_d сонячного випромінювання на земну поверхню. Дана модель була чисельно реалізована для Північно-західної частини Києва і результати розрахунку порівнювались з отриманими даними експериментальних вимірювань інтенсивності потоку сонячного випромінювання.

Результати зіставлення розрахункових та експериментальних даних наведено на рис. 2.12 – 2.8.

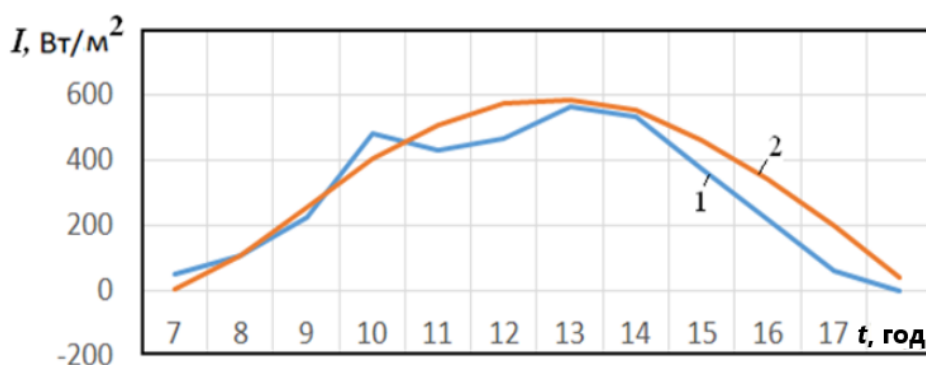


Рисунок 2.12 – Зміна у часі інтенсивності сонячного випромінювання, що падає на горизонтальну поверхню 21 березня: 1 – результати вимірювання; 2 – результати розрахунків за моделлю ASHRAE [55]

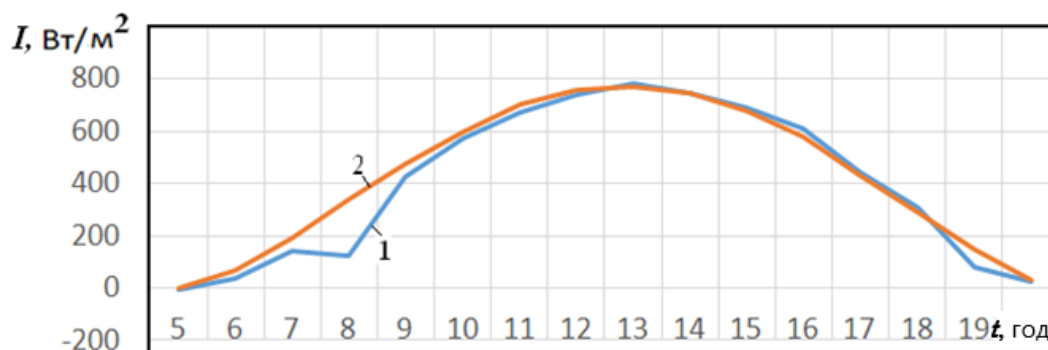


Рисунок 2.13 – Зміна у часі інтенсивності сонячного випромінювання, що падає на горизонтальну поверхню 21 червня: 1 – результати вимірювання; 2 – результати розрахунків за моделлю ASHRAE [55]

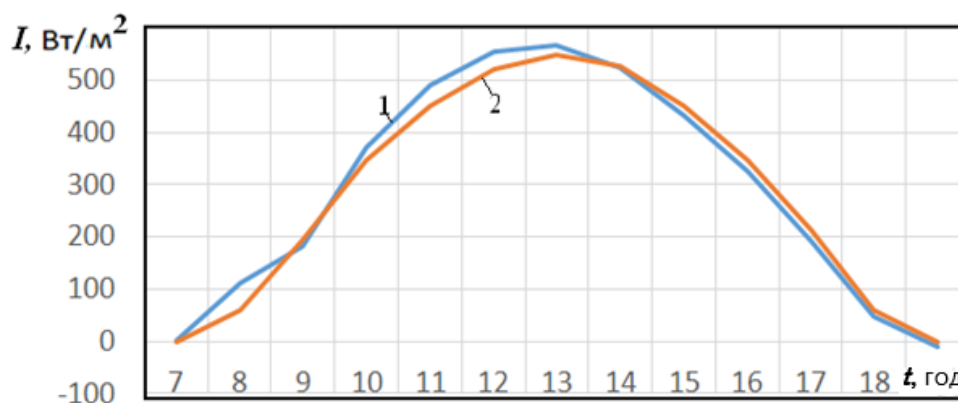


Рисунок 2.14 – Зміна у часі інтенсивності сонячного випромінювання, що падає на горизонтальну поверхню 22 вересня: 1 – результати вимірювання; 2 – результати розрахунків за моделлю ASHRAE [55]

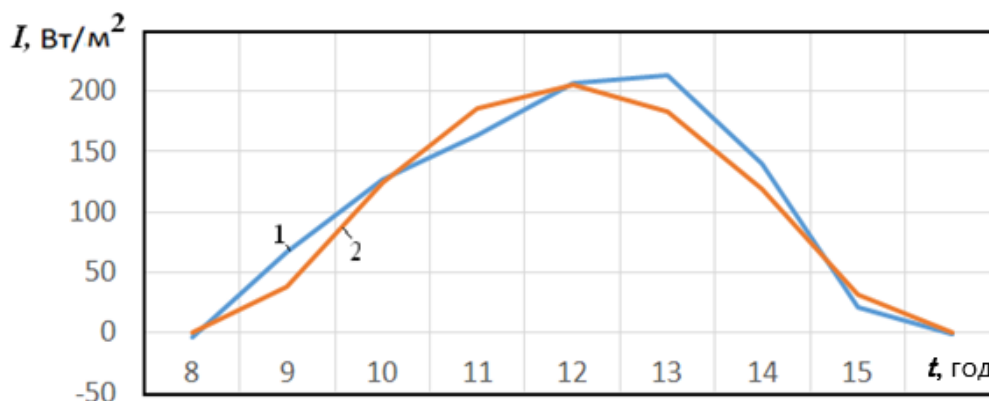


Рисунок 2.15 – Зміна у часі інтенсивності сонячного випромінювання, що падає на горизонтальну поверхню 22 грудня: 1 – результати вимірювання; 2 – результати розрахунків за моделлю ASHRAE [55]

Як видно з рис. 2.12...2.15, результати розрахунку, отримані за математичною моделлю ASHRAE досить добре збігаються з експериментальними даними. Такі характеристики, як тривалість світового дня та максимальна добова густина теплового випромінювання моделюються з похибкою не більше 2%. Розбіжності між значеннями інтенсивності випромінювання упродовж світлої частини доби можна пояснити мінливою хмарністю, вплив якої математична модель ASHRAE не враховує. Особливо це помітно у місяці з істотно нестабільною погодою – грудні і березні. Максимальна похибка розбіжності розрахункових і експериментальних даних в окремі години 21 березня і 22 грудня досягає 25%, тоді як середня похибка не перевищує 9,5%. Похибка розрахункового визначення густини променевого потоку о 8 годині ранку 21 червня, яка складає 38% і пов'язана з короткочасним дощем, збільшила середньодобову похибку до 4,5%. Для сонячного дня 22 вересня максимальна похибка склала 9%.

Отже, розрахункові результати зміни інтенсивності сонячного випромінювання упродовж світлої частини обраних днів задовільно узгоджуються з даними вимірювань. Це дає підставу вважати ефективним залучення математичної моделі ASHRAE для врахування впливу енергії сонячного випромінювання при дослідженні температурного стану огорожувальних конструкцій і внутрішніх приміщень будівельних споруд з метою зниження теплоспоживання в опалювальний період року.

2.3 Висновки

1. Із застосуванням піранометра CP-M1, розробленого в ІТТФ НАН України, проведено вимірювання інтенсивності сонячного випромінювання в м. Києві в різні пори року. Визначалася інтенсивність сонячного випромінювання на поверхні різної орієнтації відносно сторін світу.

2. Знайдені максимальні значення інтенсивності сонячного випромінювання в різні пори року. Визначено час доби, при якому

інтенсивність сонячного випромінювання на поверхні різної орієнтації максимальна.

3. Зафіксовано, що поверхні обернені на схід і на захід опромінюються відповідно у часи сходу і заходу Сонця; горизонтальні поверхні і поверхні обернені на південь опромінюються упродовж світлового дня з найбільшим тепловим надходженням опівдні; максимальні променеві потоки енергії в літні місяці потрапляють на горизонтальні поверхні, в осінні і весняні місяці інтенсивність сонячного випромінювання на горизонтальні поверхні і поверхні обернені на південь не істотно відрізняються (на 10-15% опівдні), однак максимум припадає на останні, тоді як у зимові місяці надходження сонячної радіації на південно обернені поверхні втричі перевищують надходження на горизонтальні поверхні, досягаючи 730 Вт/м^2 в безхмарні дні.. Це варто враховувати при обранні орієнтації променесприймаючих поверхонь активних і пасивних сонячних систем.

4. Основними факторами, які впливають на величину сумарного надходження сонячної радіації протягом доби є тривалість світлового дня, положення Сонця на небосхилі та наявність хмарності. Ці параметри змінюються упродовж року, тому для систематичної оцінки обсягів сонячної радіації, що надходить на панелі сонячних енергосистем, на світлопрозорі і непрозорі огорожуючі конструкції будівель, актуальним є залучення розрахункових підходів для визначення місцезнаходження Сонця на небесному схилі упродовж світлої частини кожної доби упродовж року.

5. Порівняння результатів розрахунку інтенсивності сонячного випромінювання, виконаного за методикою ASHRAE (2009 р.) з даними експериментів показало їх достатньо задовільне узгодження. Відмінність спостерігається в ті інтервали часу доби, коли небо було хмарним.

6. Основні наукові результати опубліковані в роботах [101, 102].

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ТА ВОЛОГІСНОГО СТАНУ СТІНОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІД ВПЛИВОМ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Від температурного стану огорожувальних конструкцій споруд залежать тепловтрати будинку у холодну пору року і надходження теплоти в літній період. Це, в свою чергу, визначає навантаження на системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря і їх вартість, впливає на сталість температурного режиму в об'ємі приміщення з часом (при зміні температури, швидкості повітря зовні будинку, тепловіддачі системи опалення, температури на внутрішній поверхні огорожувальних конструкцій). Вибір оптимальних теплофізичних характеристик огорожувальних конструкцій дозволяє виключити утворення конденсату на внутрішній стороні, а також установити вологісний режим, що сприятливо впливає на теплозахисні властивості огороження.

До основних експлуатаційних характеристик цивільних і промислових будинків відносяться довговічність, надійність та економічність, які багато в чому обумовлені особливостями тепловологісного стану їх конструктивних елементів. Необхідність дослідження тепловологісного стану виникає при проектуванні у процесі експлуатації, при модернізації та перебудові будинків під інші режими експлуатації, інтенсифікації технологічних процесів тощо. При цьому охоплюється широке коло завдань, основні з яких – тепловий розрахунок, у результаті якого знаходять температурні поля й опір теплопередачі, а також вологісний розрахунок, виходячи з якого оцінюють вологісний стан огорожувальних конструкцій, розраховують повітропроникнення і теплозасвоєння. Важливою проблемою є врахування впливу сонячного випромінювання на температурно-вологісний стан стінових конструкцій.

Процедура дослідження тепловологісного стану конструктивних елементів будинків і споруд зводиться до завдання оптимізації та керування системами з розподіленими параметрами. Її основні етапи наступні:

- виявлення фізичних особливостей процесу теплопереносу через стінові конструкції;
- складання та обґрунтування математичної моделі; розробка й вибір методів і засобів вирішення і реалізації сформульованих завдань;
- розробка математичної моделі, обрання методу її реалізації, проведення чисельних експериментів і перевірка її спроможності (адекватності), на базі створеного методу математичного моделювання проводити розрахунки тепловологісного стану реальних об'єктів;
- оцінка одержуваних рішень за сукупністю вимог до досліджуваних процесів, станів і методів керування ними;
- вибір раціональних конструктивних рішень і режимів експлуатації, а також визначення оптимальних параметрів досліджуваної системи.

Саме вони й становлять сутність теплового проектування та теплофізичних розрахунків.

3.1 Розрахунковий метод дослідження температурного стану будівельних конструкцій з урахуванням впливу сонячного випромінювання

Розрахунковий метод визначення температурного стану будівельних конструкцій полягає у розв'язанні рівняння перенесення теплоти через огорожі будівель. Перенесення теплоти через прямокутну стінову конструкцію описується двовимірним рівнянням теплопровідності

$$C_m \rho_m \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (3.1)$$

x, y, z – прямокутні координати; τ – час, с; ρ_m – густина будівельного матеріалу, кг/м³; C_m – питома масова теплоємність матеріалу, Дж/кг/К; λ_m – теплопровідність матеріалу, Вт/м/К.

Для розв'язання рівняння (3.1) необхідно сформулювати для нього граничні умови на зовнішній та внутрішній поверхнях стіни. Механізм тепловіддачі на внутрішній поверхні, що обернена у бік приміщення, включає теплопровідність, природну конвекцію та випромінювання. Виходячи з цього, граничні умови на внутрішній поверхні можна сформулювати у вигляді:

$$-\lambda_m \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=-0} = -\lambda_a \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=+0} + c_0 \varepsilon_{ef} \left[\left(\frac{T_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\Pi}}{100} \right)^4 \right], \quad (3.2)$$

де λ_a – теплопровідність повітряного середовища, Вт/м/К; c_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/(м²К⁴); ε_{ef} – ефективна степінь чорноти внутрішньої поверхні стіни; n – зовнішня нормаль до поверхні s . Нижній індекс " $n=-0$ " означає, що похідна від температури по нормалі розраховується з боку стінової конструкції, а індекс " $n=+0$ " – що похідна розраховується з боку повітряного середовища приміщення. Індекс " Π " відповідає температурним умовам у приміщенні.

На зовнішню поверхню стіни надходить тепловий потік від сонячного випромінювання. У навколишній повітряний простір теплота від зовнішньої поверхні стіни теплота передається змішаною (тобто природною та вимушеною) конвекцією, а також випромінюванням. Виходячи з цього, гранична умова на зовнішній поверхні стіни сформулюється наступним чином:

$$-\lambda_m \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=+0} = -\lambda_a \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=-0} + c_0 \varepsilon_{ef} \left[\left(\frac{T_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\infty}}{100} \right)^4 \right] - q_{sol} \gamma, \quad (3.3)$$

де T_s – температура стінки; T_∞ – температура оточуючого середовища, індекс ∞ відповідає умовам на значній відстані від стінки, q_{sol} – інтенсивність сонячного випромінювання на зовнішню поверхню стіни, Вт/м²; γ – коефіцієнт поглинання сонячного випромінювання поверхнею стіни.

Вирази (3.2) та (3.3) представляють собою умови четвертого роду, або умови спряження. Для їх застосування необхідно крім рівняння теплопровідності стіни розв'язувати також систему рівнянь гідродинаміки для внутрішнього та зовнішнього повітряних середовищ. За спрощеною постановкою задачі граничні умови четвертого роду замінюються умовами третього роду. Для внутрішньої поверхні стіни ці умови мають вигляд:

$$-\lambda_m \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{n=-0} = \alpha_{\text{вн}} (T_s - T_r); \quad (3.4)$$

де $\alpha_{\text{вн}}$ – радіаціо-конвекційний коефіцієнт тепловіддачі на внутрішній поверхні стіни.

Для зовнішньої поверхні граничні умови третього роду матимуть вигляд

$$-\lambda_m \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{n=+0} = \alpha_{\text{зовн}} (T_s - T_\infty) - q_{\text{sol}} \gamma; \quad (3.5)$$

де $\alpha_{\text{зовн}}$ – радіаціо-конвекційний коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні стіни.

В літературі рекомендується застосовувати для зовнішнього та внутрішнього коефіцієнтів тепловіддачі наступні значення $\alpha_{\text{вн}}=8,6$ Вт/м²/К та $\alpha_{\text{зовн}}=23$ Вт/м²/К.

Для зменшення втрат теплоти через огорожувальні конструкції на зовнішній поверхні стіни наносяться теплоізоляційні покриття. Для розрахунку переносу теплоти через стінову конструкцію з теплоізоляційним покриттям необхідно скласти рівняння теплопровідності як для самої стіни, так і для покриття. На границі між стіною та покриттям необхідно задавати умови четвертого роду у вигляді:

$$-\lambda_m \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=+0} = -\lambda_{\text{покp}} \frac{\partial T_1}{\partial n} \Big|_{n=-0}, \quad T \Big|_{n=+0} = T_1 \Big|_{n=-0} + \Delta T, \quad \Delta T = q_{\text{пp}} \frac{\delta_{\text{пp}}}{\lambda_{\text{пp}}}, \quad (3.6)$$

де $\lambda_{\text{покp}}$ – теплопровідність матеріалу покриття, ΔT враховує термічний опір прошарку товщиною $\delta_{\text{пp}}$ закріплюючої речовини з теплопровідністю $\lambda_{\text{пp}}$ між стінкою і теплоізоляцією, тепловий потік через який буде $q_{\text{пp}}$.

Інтенсивність сонячного випромінювання, що падає на зовнішню поверхню стіни, залежить від широти та довготи місцевості, від дати (номера дня з початку року), часу доби, орієнтації поверхні стіни.

Система рівнянь теплопровідності з наведеними граничними умовами зазвичай розв'язується чисельним методом, наприклад методом скінчених різниць.

3.2 Температурно-вологісний стан стінових конструкцій будівлі при дії сонячного випромінювання

Матеріали огорожувальних конструкцій будівель представляють собою капілярно-пористі тіла, які володіють сорбційними властивостями. При підвищенні відносної вологості оточуючого середовища їх вологовміст буде зростати. При проєктуванні зовнішніх огорожень потрібно [103] запобігати можливості зволоження матеріалів, з яких виготовлені ці конструкції, уникати

можливості конденсації водяної пари на внутрішній поверхні та в товщі огорожувальної конструкції, забезпечувати умови виведення всієї накопиченої в конструкції вологи, що сконденсувалася за період вологонакопичення, для забезпечення від'ємного або нульового річного балансу вологи огорожувальної конструкції.

Згідно [103], утримання вологи огорожуючими конструкціями у кількості, що перевищує нормативні значення у відповідності до [104] веде до зниження їх теплозахисних якостей та довговічності експлуатації. Слід зазначити, що в періоди тривалого стояння занадто вологої погоди, зволоження відбувається і внутрішніх стінових конструкцій і стелі.

Зміна вологого стану огороження внаслідок накопичення вологи може відбуватися за рахунок сорбційного і конденсаційного зволоження матеріалу огороження. Конденсаційне зволоження капілярно-пористого матеріалу огороження виникає при зниженні температури зовнішнього повітря та парціального тиску водяної пари в зовнішньому середовищі за рахунок конденсації і випадіння водяної пари з повітря. Сорбційне зволоження огорожень відбувається за рахунок того, що капілярно-пористі матеріали мають властивість поглинати вологу, що міститься в оточуючому повітрі. Цей процес спостерігається при відсутності різниці температур повітря і матеріалу. Кількість сорбційної вологи залежить від природи матеріалу, парціального тиску водяної пари в повітрі та температури повітря. Сумісний перебіг процесів конденсаційного і сорбційного зволоження призводить до зміни вологовмісту матеріалу конструкції. При тривалому перебуванні пористого матеріалу в повітрі зі сталими значеннями температури і парціального тиску пари (відносної вологості повітря), кількість накопиченої матеріалом вологи стає також незмінною, тобто матеріал досягає рівноважного вологовмісту.

Таким чином, волога у всіх її станах вважається одним з найсуттєвіших деструктивних факторів, що зменшують термін служби будівельних конструкцій з будь-якого матеріалу [105]. Як вже було сказано, однією з

важливих властивостей будівельних матеріалів є їх пористість та високий рівень поглинання води. Рідина, що проникає в капіляри, завдає руйнівної дії більшості будівельних матеріалів. Це призводить до зниження міцності будівельних матеріалів під впливом води та зниження однорідності структури матеріалів. При циклічному заморожуванні і відтаванні різко падає міцність пористих структур будівельних матеріалів. Від вмісту води залежить також опір теплопередачі елементів будівлі, а значить і її енергетична ефективність. Тому при зведенні будинків архітекторам і проектувальникам доводиться вирішувати завдання по захисту основних огорожувальних частин будівель від згубного впливу води. Основні шляхи проникнення води в будівельні конструкції -- це випадання атмосферних опадів, рух ґрунтових і талих вод та конденсація водяної пари, що внаслідок дифузії переноситься через товщу конструкцій [105]. Дифузія водяної пари відбувається внаслідок різниці парціальних тисків всередині будівлі та в зовнішньому середовищі.

Вірогідність випадіння конденсату всередині огорожувальних конструкцій будівель тим вища, чим більша різниця між температурами на її зовнішній та внутрішній поверхнях. Тому зовнішні поверхні несучих конструкцій споруд не повинні перебувати в зоні негативних температур. Підвищення температури зовнішньої поверхні стін зазвичай досягається шляхом нанесення шарів утеплювача з теплоізоляційних матеріалів на цих поверхнях.

Технічні рішення щодо раціонального вибору теплоізоляційного матеріалу повинні ґрунтуватися на точних і надійних методах розрахунку процесів тепловологопереносу через капілярно-пористі структури огорожувальних конструкцій. До останнього часу прогнозування волого-температурних режимів огорожувальних конструкцій споруд виконувалося за досить спрощеними схемами на рівні застосування рівнянь для визначення зони конденсації за характером розподілу парціального тиску водяної пари і насиченої водяної пари у товщі шарів огорожувальної конструкції. Існуючі методи не

враховують складність та сукупність процесів, які протікають в зовнішньому середовищі та всередині приміщення.

Важливим фактором, що впливає на температурно - вологісний стан будівельної конструкції є сонячне випромінювання, що діє зовнішню поверхню стіни. Її врахування при розрахунках процесів перенесення теплоти через стінові конструкції може суттєво змінити і уточнити результати цих розрахунків.

Серед механізмів переносу вологи в капілярно - пористих тілах, до яких відноситься більшість будівельних матеріалів, основними слід вважати дифузію водяної пари, що протікає за рахунок градієнта його парціального тиску в матеріалі, і перенос крапельної рідини за рахунок дії капілярних сил. Капілярні сили перешкоджають переносу крапельної рідини, внаслідок чого вода в порах при низьких ступенях зволоження матеріалу залишається нерухомою. За наявності в товщі огорожувальної конструкції градієнта парціального тиску водяної пари, буде відбуватися дифузний перенос пари з області з більш високим парціальним тиском пари в область, де цей тиск нижче. Якщо припустити, що загальний тиск пароповітряної суміші всередині стін є постійним, рух цієї суміші через пори матеріалу будівельних конструкцій буде відсутній. Отже, буде також відсутнім і конвекційний перенос пароподібної вологи через будівельну конструкцію. Якщо відносна вологість повітря усередині матеріалу збільшується, дрібні пори матеріалу поступово заповнюються крапельною вологою. При високому вмісті крапельної вологи в матеріалі, коли його пори виявляються повністю заповненими рідиною, її перенос через пористий матеріал може здійснюватися за рахунок дії капілярних сил [75, 76].

Дифузія водяної пари в повітрі описується законом Фіка, згідно якого,

$$j_{v-a} = -\rho D_{v-a} \text{grad}(Y_{v-a}),$$

де j_{v-a} – густина масового потоку водяної пари, кг/(м²с); Y_{v-a} – відносна масова концентрація водяної пари в повітрі, кг/кг; D_{v-a} – коефіцієнт дифузії водяної пари в повітрі, м²/с; ρ – густина паро-повітряної суміші.

Дифузія водяної пари в повітрі, що знаходиться в порах капілярно-пористого тіла, описується скорегованим рівнянням Фіка

$$j_{v-a} = -\rho \frac{D_{v-a}}{\zeta} \text{grad}(Y_{v-a}), \quad (3.7)$$

де ζ – коефіцієнт опору дифузії парів води в пористому матеріалі, $\zeta > 1$.

Коефіцієнт опору дифузії парів води в пористому матеріалі відображає відношенням коефіцієнту дифузії парів води в пористому матеріалі до коефіцієнту дифузії парів води в повітрі. Значення коефіцієнту опору більше одиниці, оскільки дифузія через пористий матеріал ускладнюється за рахунок дії різних факторів: по-перше, звивиста структура пористого матеріалу збільшує довжину шляху молекул водяної пари; по-друге, наявність пористості зменшує площу поверхні, через яку пара може дифундувати.

Дифузія пари через пористий матеріал суттєво залежить також від ступеня його насиченості вологою. В тому випадку, коли пори матеріалу занадто дрібні, дифузії парів вже не описується законом Фіка. У цих надто малих масштабах зіткнення молекул пари зі стінками пор стають частішими, ніж зіткнення між молекулами самої пари. Перенос пари в цьому випадку стає ближчим до дифузії Кнудсена або ефузії. Дифузія Кнудсена також визначається градієнтом тиску пари. Для спрощення моделі переносу водяної пари, дифузія Кнудсена не розглядається окремо, але її наявність передбачається шляхом корегування коефіцієнту опору ζ .

В багатьох випадках загальний тиск пароповітряної суміші в будівельних конструкціях дорівнює тиску навколишнього середовища і його можна вважати незмінним по товщині стінки. Для випадків, коли густину пароповітряної суміші ρ також можна наближено вважати постійною величиною, форма запису закону Фіка може бути перетворена до вигляду

$$j_{v-a} = -\frac{D_{v-a}}{\zeta R_v T} \text{grad}(p_v) = -m \cdot \text{grad}(p_v),$$

що дозволяє розглядати градієнт парціального тиску пари p_v , як рушійну силу паропровідності будівельних конструкцій. Коефіцієнт m має назву коефіцієнт паропроникності. Якщо відомою є величина m , то $\frac{D_{v-a}}{\zeta} = m R_v T$.

Співвідношення між відносною концентрацією пари у повітрі Y_{v-a} та парціальним тиском p_v можна представити у вигляді

$$Y_{v-a} = \frac{\rho_v}{\rho_v + \rho_a} = \frac{p_v}{p_v + \frac{R_v}{R_a} p_a}, \quad (3.8)$$

або

$$Y_{v-a} = \frac{1}{1 + \left(\frac{p_0}{\phi p_{v,\text{sat}}(T)} - 1 \right) \frac{R_v}{R_a}};$$

де p_0 – тиск пароповітряної суміші, $p_0 = p_v + p_a$; ϕ – відносна вологість повітря; $p_{v,\text{sat}}$ – парціальний тиск насиченої пари при заданій температурі T .

Таким чином, відносна концентрація водяної пари в повітрі є функцією відносної вологості повітря ϕ та температури T . Корисними є також зворотні співвідношення:

$$p_v = \frac{p_0}{\left[\frac{R_a}{R_v} \left(\frac{1}{Y_{v-a}} - 1 \right) + 1 \right]},$$

$$\phi = \frac{p_0}{\left[\frac{R_a}{R_v} \left(\frac{1}{Y_{v-a}} - 1 \right) + 1 \right] p_{v,\text{sat}}(T)}. \quad (3.9)$$

Для розрахунку значення тиску насиченої водяної пари в [75] рекомендується залежність:

$$p_{v,\text{sat}}(T) = 611 \exp \left[\frac{17,08 \cdot (T - 273,15)}{T - 38,97} \right], \text{ Па}$$

Важливою характеристикою пористого матеріалу є відношення частини об'єму, що зайнятий порами, до всього об'єму матеріалу. Таке відношення називається пористістю і позначається, як Π . Густина повністю висушеного пористого матеріалу визначається, як $\rho = (1 - \Pi) \cdot \rho_s + \Pi \cdot \rho_a$, де ρ_s – густина монолітного матеріалу без пор, а ρ_a – густина сухого повітря.

Для побудови моделі тепломасопереносу в пористих будівельних конструкціях в [75, 76] вводяться такі поняття як об'ємний вміст рідкої вологи $w_l = m_l / V$, кг/м³; вміст газоподібної вологи, тобто водяної пари $w_v = m_v / V$, і вміст сухого повітря $w_a = m_a / V$ в капілярно - пористому тілі, де m_l , m_v та m_a – маси рідкої вологи, водяної пари та сухого повітря в об'ємі V капілярно-пористого тіла відповідно. Для складання рівнянь перенесення маси і теплоти розглядається елементарний об'єм у вигляді прямокутного паралелепіпеда сторони якого мають розміри Δx , Δy , Δz . Якщо вважати, що перенос маси відбувається в напрямку x , то вхідний перетин елементарного об'єму має площу $S = \Delta y \Delta z$. На цьому перетині існують ділянки, що зайняті твердим скелетом $S_{sk} = \Delta y_{sk} \Delta z$, рідкою вологою $S_l = \Delta y_l \Delta z$ та пароповітряною газовою сумішшю $S_g = \Delta y_g \Delta z$. Очевидно, що $S = S_{sk} + S_l + S_g = (\Delta y_{sk} + \Delta y_l + \Delta y_g) \Delta z$. В такому випадку

$$w_l = \frac{m_l}{\Delta x (S_{sk} + S_l + S_g)} = \frac{\rho_l \Delta x S_l}{\Delta x (S_{sk} + S_l + S_g)} = \frac{\rho_l S_l}{S_{sk} + S_l + S_g} = \frac{\rho_l S_l}{S},$$

$$w_v = \frac{m_v}{\Delta x (S_{sk} + S_l + S_g)} = \frac{\rho_v \Delta x S_g}{\Delta x (S_{sk} + S_l + S_g)} = \frac{\rho_v S_g}{S_{sk} + S_l + S_g} = \frac{\rho_v S_g}{S},$$

$$w_a = \frac{m_a}{\Delta x (S_{sk} + S_l + S_g)} = \frac{\rho_a \Delta x S_g}{\Delta x (S_{sk} + S_l + S_g)} = \frac{\rho_a S_g}{S_{sk} + S_l + S_g} = \frac{\rho_a S_g}{S}.$$

Тут ρ_l – густина рідини, ρ_v – парціальна густина водяної пари.

Сумарний вміст рідкої і пароподібної вологи визначається за величиною

$$w = w_l + w_v.$$

Як це впливає з закону Фіка, рушійною силою для переносу пароподібної вологи в капілярно-пористих тілах є градієнт концентрації пари в повітрі Y_{v-a} , або парціальний тиск водяної пари. Рушійною силою для рідкої вологи в капілярно-пористих тілах є градієнт тиску в рідкій фазі. Потік рідкої вологи при цьому описується законом Дарсі

$$j_l = -K_l \text{grad}(p_l),$$

Де K_l – коефіцієнт проникності для рідини в даному капілярно-пористому тілі. Як відомо, тиск в рідині під меніском можна визначити як різницю між тиском в газовому середовищі над меніском p_g і капілярним тиском p_{cap} .

$$p_l = p_g - p_{cap}.$$

Тобто, капілярний тиск складає різницю між тиском в газовому середовищі і тиском в рідині під меніском. Тоді рівняння для потоку вологи можна записати у вигляді

$$j_l = -K_l \text{grad}(p_l) = -K_l \text{grad}(p_g - p_{cap}) = -K_l \text{grad}(p_g) + K_l \text{grad}(p_{cap})$$

Оскільки зазвичай вважається, що в капілярно-пористій стіновій конструкції $\text{grad}(p_g) \approx 0$, вираз для потоку рідкої вологи можна записати у вигляді

$$j_l = K_l \text{grad}(p_{cap}) \quad (3.10)$$

Капілярний тиск може бути розрахований за рівнянням

$$p_{cap} = -\frac{2\sigma}{r} \cos \theta$$

Згідно з законом Кельвіна, над поверхнею рідини в капілярі відносна вологість не буде дорівнювати одиниці, а буде розраховуватися за формулою [75]

$$\varphi = \frac{p_v}{p_{v,sat}} = \exp\left(-\frac{2\sigma \cos \theta}{r \rho_l R_v T}\right) = \exp\left(\frac{p_{cap}}{\rho_l R_v T}\right),$$

або

$$p_{\text{cap}} = \rho_l R_v T \ln(\phi(Y_{v-a}, T)).$$

Значна кількість будівельних матеріалів відносяться до класу гігроскопічних матеріалів, тобто до матеріалів, які здатні зберігати значну кількість рідкої води в структурі своїх пор. На рис. 3.1 відображено криву зміни вологовмісту в гігроскопічному матеріалі в залежності від відносної вологості повітря, в середовищі якого знаходиться матеріал. Така крива має назву кривої сорбції. Вона відповідає певній рівноважній температурі T , тому вона має ще назву ізотерми сорбції.

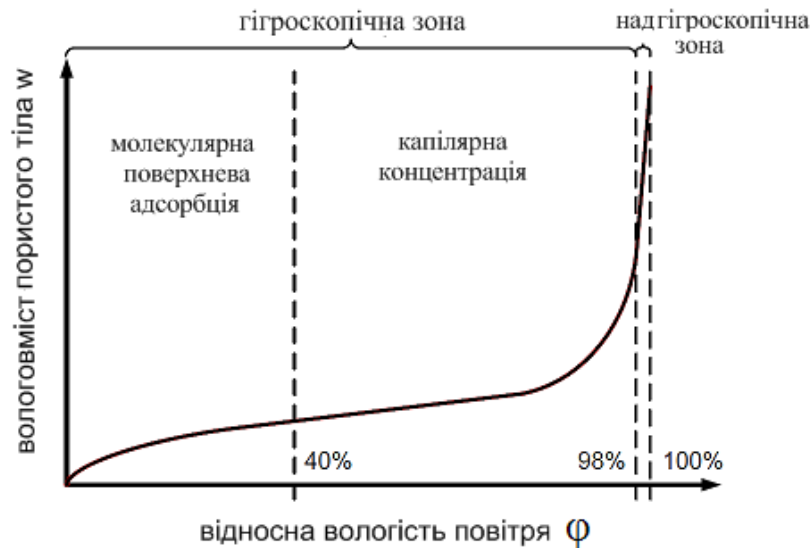


Рисунок 3.1 – Залежність вологовмісту пористого тіла від відносної вологості повітря (ізотерма сорбції) [75]

На кривій, що представлена на рисунку 3.1, можна розрізнити дві зони: гігроскопічну і надгігроскопічну. Границя між цими двома зонами визначаються достатньо умовно. Відмінність між зонами характеризується в більшій степені механізмом поглинання води. Для гігроскопічної зони характерним є поглинання води з повітря, а для надгігроскопічної зони накопичення води відбувається в результаті контакту з рідкою водою, або внаслідок конденсації води всередині матеріалу.

Виходячи з наведених вище співвідношень, що характеризують механізми масопереносу через капілярно-пористі будівельні матеріали, складаються рівняння переносу рідкої та газоподібної вологи в капілярно - пористому матеріалі.

Для складання рівняння перенесення рідкої вологи в капілярно-пористому тілі приймається, що в момент часу τ маса рідини в елементарному об'ємі складала $m_{l,\tau} = \Delta x S w_{l,\tau}$. За період часу $\Delta \tau$ в елементарний об'єм зайшла маса рідини $j_{l,x} S_1 \Delta \tau$, а вийшла маса рідини $j_{l,x+\Delta x} S_1 \Delta \tau$. Тоді в момент часу $\tau + \Delta \tau$ маса рідин в елементарному об'ємі буде дорівнювати:

$$\Delta x S w_{l,\tau+\Delta \tau} = \Delta x S w_{l,\tau} + j_{l,x} S_1 \Delta \tau - j_{l,x+\Delta x} S_1 \Delta \tau + H_l \Delta x S \Delta \tau,$$

де H_l – кількість рідкої вологи, що випаровується в одиниці об'єму капілярно-пористого тіла в одиницю часу.

Після ділення лівої і правої частин останнього виразу на добуток $\Delta x \cdot S \cdot \Delta \tau$, він приймає вигляд

$$\frac{w_{l,\tau+\Delta \tau} - w_{l,\tau}}{\Delta \tau} = \frac{\left(j_{l,x} \frac{S_1}{S} - j_{l,x+\Delta x} \frac{S_1}{S} \right)}{\Delta x} + H_l.$$

З визначення вологовмісту рідкої вологи w_l випливає, що $S_l / S = w_l / \rho_l$. Якщо спрямувати $\Delta \tau$ та Δx до нуля, останнє рівняння збереження вологи перетвориться на диференціальне рівняння вигляду

$$\frac{\partial w_l}{\partial \tau} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(j_l \frac{w_l}{\rho_l} \right) + H_l.$$

З урахуванням виразу (4.10) для потоку рідини j_l останнє рівняння перетвориться у наступне:

$$\frac{\partial w_l}{\partial \tau} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{w_l}{\rho_l} K_l \frac{\partial p_c}{\partial x} \right) + H_l. \quad (3.11)$$

Аналогічним чином складається рівняння перенесення водяної пари. Рівняння балансу маси для водяної пари матиме вигляд

$$\frac{\partial w_v}{\partial \tau} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(j_{v-a} \frac{w_v}{\rho_v} \right) + H_v.$$

З урахуванням виразу (3.7) для потоку маси пари можна отримати

$$\frac{\partial w_v}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{w_v}{\rho_v} \rho \frac{D_{v-a}}{\zeta} \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial x} \right) + H_v. \quad (3.12)$$

Джерельні члени H_v , H_l , що стоять у відповідних рівняннях збереження маси пару (3.12) та рідини (3.11), характеризують наявність фазових переходів, в результаті яких маса однієї з фаз може збільшуватися, або зменшуватися за рахунок збільшення, або зменшення іншої фази. Відповідним чином, якщо відбувається випаровування або конденсація. Отже, $H_v = -H_l$. Складаючи ліві та праві частини рівнянь (3.11) та (3.12) отримаємо:

$$\frac{\partial w_l + w_v}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{w_v}{\rho_v} \rho \frac{D_{v-a}}{\zeta} \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial x} - \frac{w_l}{\rho_l} K_1 \frac{\partial p_{\text{cap}}}{\partial x} \right).$$

Суму $w_v + w_l$ позначимо, як w . Враховуючи, що $w_v \ll w_l$, можна вважати, що $w = w_v + w_l \approx w_l$, звідки

$$\frac{\partial w_l}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{w_v}{\rho_v} \rho \frac{D_{v-a}}{\zeta} \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial x} - \frac{w_l}{\rho_l} K_1 \frac{\partial p_{\text{cap}}}{\partial x} \right).$$

Рівняння перенесення маси сухого повітря запишеться у вигляді, що аналогічний (3.12), але без джерельного члена:

$$\frac{\partial w_a}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{w_a}{\rho_a} \cdot \rho \frac{D_{v-a}}{\zeta} \frac{\partial Y_{a-v}}{\partial x} \right).$$

Очевидно, що $\frac{\partial Y_{a-v}}{\partial x} = -\frac{\partial Y_{v-a}}{\partial x}$.

Для розв'язання рівнянь переносу вологи в рідкому та пароподібному стані необхідно вибрати мінімальну кількість незалежних функцій, що характеризують цей процес. Як видно з наведених вище співвідношень, вологісний стан капілярно-пористого матеріалу та масоперенос описується рядом фізичних величин, таких як: вологовміст w ; капілярний тиск p_{cap} ; відносна вологість повітря ϕ , парціальний тиск пари в пароповітряній суміші p_v ,

концентрація водяної пари в повітрі Y_{v-a} . Залежність вологовмісту w_1 від відносної вологості повітря ϕ описується ізотермою сорбції (рис. 3.1). Тобто для аналізу вологісного стану матеріалу має бути експериментально, або теоретично визначена залежність $w_1 = w_1(\phi, T)$. Залежність між $p_{\text{сар}}$ та ϕ описується рівнянням Кельвіна, тобто $p_{\text{сар}} = p_{\text{сар}}(\phi, T)$. Зрештою, рівняння (3.9) відображає співвідношення, між ϕ та Y_{v-a} , тобто $\phi = \phi(Y_{v-a}, T)$. Отже, вологісний стан матеріалу може описати задаючи концентрацію водяної пари у повітрі Y_{v-a} та температуру T . Але можливі також і інші комбінації вихідних параметрів для опису вологопереносу в капілярно-пористому тілі, наприклад: w_1, T ; $p_{\text{сар}}, T$ та ін.

Використовуючи як визначальні параметри процесу масопереносу функції Y_{v-a} та T , після перетворень одержимо:

$$\frac{\partial w_1(Y_{v-a}, T)}{\partial \tau} = \frac{\partial w_1}{\partial Y_{v-a}} \cdot \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial \tau} + \frac{\partial w_1}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau};$$

$$K_1 \frac{\partial p_{\text{сар}}(Y_{v-a}, T)}{\partial x} = K_1 \left[\frac{\partial p_{\text{сар}}}{\partial Y_{v-a}} \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial x} + \frac{\partial p_{\text{сар}}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \right].$$

Отже рівняння перенесення вологи матиме вигляд

$$\frac{\partial w_1}{\partial Y_{v-a}} \cdot \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial \tau} + \frac{\partial w_1}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{w_v}{\rho_v} \rho \frac{D_{v-a}}{\zeta} - \frac{w_1}{\rho_1} K_1 \frac{\partial p_{\text{сар}}}{\partial Y_{v-a}} \right) \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial x} - \frac{w_1}{\rho_1} K_1 \frac{\partial p_{\text{сар}}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \right). \quad (3.13)$$

Для визначення відношень $\frac{w_v}{\rho_v}$ та $\frac{w_1}{\rho_1}$, що входять до рівняння (3.13),

приймається, що $w_1 = \text{Pr}_1 \sigma$; $w_v = \text{Pr}_v (1 - \sigma)$; $w = w_1 + w_v = \text{Pr}_1 \sigma + \text{Pr}_v (1 - \sigma)$, де

$\sigma = \frac{S_1}{(S_1 + S_g)}$ – частка пор, що зайнята рідкою вологою. Якщо $\sigma = \frac{w_1}{\text{Pr}_1}$, то

$w = w_1 + w_v = w_1 + \text{Pr}_v - \rho_v \frac{w_1}{\rho_1}$. З цього виразу визначається $w_1 = \frac{\rho_1 (w - \text{Pr}_v)}{(\rho_1 - \rho_v)}$, а

також відношення $\frac{w_1}{\rho_1} = \frac{w - \text{Pr}_v}{\rho_1 - \rho_v} = \frac{S_1}{S}$. Величина w_v визначається як різниця між

w та w_1 . Тобто, $w_v = w - w_1 = \rho_v \left(\frac{\Pi \rho_1 - w}{\rho_1 - \rho_v} \right)$, або $\frac{w_v}{\rho_v} = \frac{\Pi \rho_1 - w}{\rho_1 - \rho_v} = \frac{S_g}{S}$. Враховуючи,

що $Y_{v-a} = \frac{\rho_v}{\rho}$, одержимо: $\rho_v = \rho Y_{v-a}$, де $\rho = \rho_v + \rho_a$ – густина пароповітряної суміші.

З урахуванням цього, отримуємо: $\frac{w_1}{\rho_1} = \frac{w - \Pi \rho_0 Y_{v-a}}{\rho_1 - \rho Y_{v-a}}$; $\frac{w_v}{\rho_v} = \frac{\Pi \rho_1 - w}{\rho_1 - \rho Y_{v-a}}$.

Залежність вологовмісту w пористого тіла від відносної вологості водяної пари ϕ описується ізотермою сорбції $w = w(\phi)$ (рис. 3.1), а залежність відносної вологості ϕ від відносної концентрації $\phi = \phi(Y_{v-a}, T)$ описується виразом (3.9). Отже можна отримати залежність загального вологовмісту пористого матеріалу від відносної концентрації водяної пари і температури у вигляді $w = w(\phi(Y_{v-a}, T))$.

Залежність капілярного тиску p_{cap} в пористому тілі від вологовмісту w , що наведена в [75], представлена на рисунку 3.2.

Дана залежність побудована для певного значення температури. Для інших температур можна також з експерименту отримати подібні залежності. З цих залежностей можна визначити похідні $\frac{\partial p_{cap}}{\partial Y_{v-a}} = \frac{\partial p_{cap}}{\partial w} \cdot \frac{\partial w}{\partial \phi} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial Y_{v-a}}$ та $\frac{\partial p_{cap}}{\partial T}$, що

входять до рівняння (3.13). Таким чином, рівняння (3.13) матиме лише дві невідомі змінні: Y_{v-a} та T .

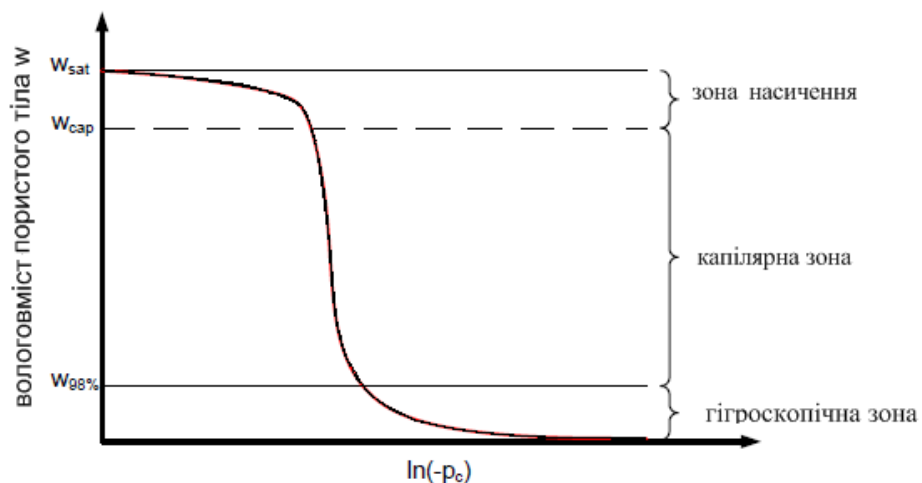


Рисунок 3.2 – Залежність вологовмісту пористого тіла від значення капілярного тиску в його порах [75].

Для складання рівняння перенесення теплоти у випадку наявності масопереносу приймається, що в момент часу τ ентальпія елементарного об'єму складала

$$E_{\tau} = (1 - \Pi) \Delta x \cdot S \cdot \rho_s \cdot C_s \cdot T_{\tau} + \Delta x \cdot S_l \cdot \rho_l \cdot C_l \cdot T_{\tau} + \\ + \Delta x \cdot S_v \cdot \rho_v \cdot C_v \cdot T_{\tau} + \Delta x \cdot S_a \cdot \rho_a \cdot C_a \cdot T_{\tau}$$

З урахуванням того, що $S_l = \frac{w_l S}{\rho_l}$; $S_v = \frac{w_v S}{\rho_v}$; $S_a = \frac{w_a S}{\rho_a}$, останній вираз можна переписати у вигляді

$$E_{\tau} = [(1 - \Pi) \cdot \rho_s \cdot C_s + w_l C_l + w_v C_v + w_a \cdot C_a] \cdot S \cdot \Delta x \cdot T_{\tau}.$$

За проміжок часу $\Delta \tau$ до елементарного об'єму увійшла теплота шляхом теплопровідності та шляхом конвекції з потоками рідини, водяної пари та повітря

$$Q_x = -(1 - \Pi) S \cdot \lambda_s \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x \cdot \Delta \tau + \left(C_l j_l T \Big|_x - \lambda_l \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x \right) \cdot S_l \cdot \Delta \tau + \\ + \left(C_v j_{v-a} T \Big|_x - \lambda_v \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x \right) S_v \Delta \tau + \left(C_a j_{a-v} T \Big|_x - \lambda_a \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x \right) S_a \Delta \tau.$$

За цей же проміжок часу $\Delta \tau$ з елементарного об'єму видалилася теплота, величину якої можна записати в аналогічній формі

$$Q_{x+\Delta x} = -(1 - \Pi) S \cdot \lambda_s \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} \Delta \tau + \left(C_l j_l T \Big|_{x+\Delta x} - \lambda_l \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} \right) S_l \Delta \tau + \\ + \left(C_v j_{v-a} T \Big|_{x+\Delta x} - \lambda_v \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} \right) S_v \Delta \tau + \left(C_a j_{a-v} T \Big|_{x+\Delta x} - \lambda_a \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} \right) S_a \Delta \tau.$$

Рівняння теплового балансу для елементарного об'єму записується у вигляді:

$$E_{\tau+\Delta \tau} = E_{\tau} + Q_x - Q_{x+\Delta x}.$$

З урахуванням наведених вище виразів після спрямування $\Delta \tau$ та Δx до нуля, останнє рівняння теплового балансу переписеться у вигляді:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial \tau} \left\{ [(1-\Pi)\rho_s C_s + w_l C_l + w_v C_v + w_a \cdot C_a] T_\tau \right\} + \\
& + \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(C_l j_l \frac{w_l}{\rho_l} + C_v j_{v-a} \frac{w_v}{\rho_v} + C_a j_{a-v} \frac{w_a}{\rho_a} \right) T \right] = \\
& = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left((1-\Pi)\lambda_s + \lambda_l \frac{w_l}{\rho_l} + \lambda_v \frac{w_v}{\rho_v} + \lambda_a \frac{w_a}{\rho_a} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right].
\end{aligned}$$

Після диференціювання добутків та ряду перетворень останнє рівняння прийме вигляд

$$\begin{aligned}
& [(1-\Pi)\rho_s C_s + w_l C_l + w_v C_v + w_a C_a] \frac{\partial T_\tau}{\partial \tau} + \\
& + \left(C_l j_l \frac{w_l}{\rho_l} + C_v j_{v-a} \frac{w_v}{\rho_v} + C_a j_{a-v} \frac{w_a}{\rho_a} \right) \frac{\partial T}{\partial x} + TC_l \left[\frac{\partial w_l}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x} \left(j_l \frac{w_l}{\rho_l} \right) \right] + \\
& + TC_v \left[\frac{\partial w_v}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x} \left(j_{v-a} \frac{w_v}{\rho_v} \right) \right] + TC_a \left[\frac{\partial w_a}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x} \left(j_{a-v} \frac{w_a}{\rho_a} \right) \right] = \\
& = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left((1-\Pi)\lambda_s + \lambda_l \frac{w_l}{\rho_l} + \lambda_v \frac{w_v}{\rho_v} + \lambda_a \frac{w_a}{\rho_a} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right].
\end{aligned}$$

З врахуванням рівнянь перенесення рідкої вологи (3.11), водяної пари (3.12) та сухого повітря, рівняння перенесення енергії запишеться у вигляді

$$\begin{aligned}
& [(1-\Pi)\rho_s C_s + w_l C_l + w_v C_v + w_a C_a] \frac{\partial T_\tau}{\partial \tau} + \\
& + \left(C_l j_l \frac{w_l}{\rho_l} + C_v j_{v-a} \frac{w_v}{\rho_v} + C_a j_{a-v} \cdot \frac{w_a}{\rho_a} \right) \frac{\partial T}{\partial x} + TC_l H_l + TC_v H_v = \\
& = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left((1-\Pi)\lambda_s + \lambda_l \frac{w_l}{\rho_l} + \lambda_v \frac{w_v}{\rho_v} + \lambda_a \frac{w_a}{\rho_a} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right].
\end{aligned}$$

З урахуванням того, що $T \cdot C_v = T \cdot C_l + r$, а також $H_v = -H_l$, вираз, що стоїть у лівій частині останнього рівняння, записується у вигляді

$$T \cdot C_l \cdot H_l + T \cdot C_v \cdot H_v = -rH_l,$$

де r – теплота випаровування (конденсації), Дж/кг.

Крім того, враховується, що потоки пари в повітрі і повітря в парі пов'язані співвідношенням $j_{a-v} = -j_{v-a}$. Тоді рівняння перенесення енергії набуде вигляду

$$\begin{aligned} & [(1-\Pi)\rho_s C_s + w_l C_l + w_v C_v + w_a C_a] \frac{\partial T_\tau}{\partial \tau} + \\ & + \left(C_l j_l \frac{w_l}{\rho_l} + \left(C_v \frac{w_v}{\rho_v} - C_a \frac{w_a}{\rho_a} \right) \cdot j_{v-a} \right) \frac{\partial T}{\partial x} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left((1-\Pi)\lambda_s + \lambda_l \frac{w_l}{\rho_l} + \lambda_v \frac{w_v}{\rho_v} + \lambda_a \frac{w_a}{\rho_a} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + rH_l. \end{aligned}$$

Підставляючи замість j_l та j_{v-a} їх представлення виразами відповідно (3.10) та (3.7), отримуємо рівняння перенесення енергії у вигляді

$$\begin{aligned} & [(1-\Pi)\rho_s C_s + w_l C_l + w_v C_v + w_a C_a] \frac{\partial T_\tau}{\partial \tau} + \\ & + \left(C_l K_l \cdot \frac{w_l}{\rho_l} \frac{\partial p_{\text{cap}}}{\partial x} - \left(C_v \frac{w_v}{\rho_v} - C_a \frac{w_a}{\rho_a} \right) \rho \frac{D_{v-a}}{\zeta} \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial x} \right) \frac{\partial T}{\partial x} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left((1-\Pi)\lambda_s + \lambda_l \frac{w_l}{\rho_l} + \lambda_v \frac{w_v}{\rho_v} + \lambda_a \frac{w_a}{\rho_a} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + rH_l. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Другий член у лівій частині (4.14) враховує конвекційний перенос теплоти масою рідини, що рухається завдяки наявності капілярних сил, та конвекційний теплоперенос внаслідок взаємної дифузії водяної пари та повітря.

Останній член в правій частині характеризує теплоту фазового переходу рідини в пару. Для знаходження швидкості конденсації водяної пари H_1 в [75] пропонуються наступний підхід. Вважається, що

$$\frac{\partial w_v}{\partial \tau} \ll \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{w_v}{\rho_v} \rho \frac{D_{v-a}}{\zeta} \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial x} \right).$$

Тоді з рівняння (3.12) випливає, що

$$H_1 = -H_v = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{w_v}{\rho_v} \rho \frac{D_{v-a}}{\zeta} \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial x} \right).$$

Граничні умови. До диференціальних рівнянь масоперенесення (3.13) та теплоперенесення (3.14) задаються граничні умови.

На поверхні капілярно-пористого матеріалу, що контактує з повітрям, характеристики вологого стану цього матеріалу, такі як вологовміст, капілярний тиск та ін., визначаються за концентрацією водяної пари у повітряному середовищі біля поверхні розподілу. При відомій інформації про температуру T_{sur} та концентрацію пари $Y_{v-a,\text{sur}}$

$$T_{\text{sur}}|_{n=+0} = T_{\text{sur}}|_{n=-0}; \quad Y_{v-a,\text{sur}}|_{n=+0} = Y_{v-a,\text{sur}}|_{n=-0},$$

де індекс «sur» позначає поверхню пористого тіла; $n=+0$ означає, що поверхня розділу розглядається з боку зовнішнього повітряного середовища, а $n=-0$ означає, що ця поверхня розглядається з боку пористого матеріалу, визначається капілярний тиск $p_{\text{cap,sur}} = p_{\text{cap}}(\varphi_{\text{sur}}, T_{\text{sur}})$.

До рівності величин T_{sur} і $Y_{v-a,\text{sur}}$ на поверхні додаються також рівності потоків маси та теплоти з одного середовища до іншого.

Поверхня капілярно-пористого тіла розглядається як послідовність ділянок, що зайняті фрагментами твердого тіла та пор. Пори заповнені рідиною та газовими середовищами, а газове середовище містить сухе повітря і водяну

пару. На ділянці поверхні, що зайнята газом, задається умова рівностей дифузійних потоків пари, що надходять з середовища пористого тіла та передається у зовнішнє повітряне середовище. Зважаючи на те, що

$$j_v^- = -\rho \frac{D_{v-a}}{\zeta} \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial n} \Big|_{g_sur, n=-0}, \text{ а } j_v^+ = -\rho D_{v-a} \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial n} \Big|_{g_sur, n=+0}, \text{ умову рівності потоків}$$

водяної пари можна записати у вигляді

$$-S_g \rho \frac{D_{v-a}}{\zeta} \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial n} \Big|_{g_sur, n=-0} = -S_g \rho D_{v-a} \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial n} \Big|_{g_sur, n=+0}, \quad (3.15)$$

де n – зовнішня нормаль до поверхні, індекс «g_sur» означає, що дана умова відноситься до поверхні пори, що зайнята газом. Аналогічний вигляд буде мати вираз, що складений для дифузійного потоку сухого повітря.

На поверхнях пор, що зайняті рідиною, відбувається випаровування (або конденсація) рідини. Водяна пара, що утворюється внаслідок випаровування рідини на поверхні, видаляється в зовнішнє середовище шляхом конвекції та дифузії. Потік рідкої вологи (з середини капілярно-пористого тіла)

представляється у вигляді (3.10): $j_l = K_l \frac{\partial p_{cap}}{\partial n} \Big|_{l_sur, n=-0}.$

Рівність потоків рідини (з середини капіляра) і пароподібної води на частині поверхні пори, що зайняті рідиною, записується у вигляді:

$$S_l K_l \frac{\partial p_{cap}}{\partial n} \Big|_{l_sur, n=-0} = -S_l \rho D_{v-a} \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial n} \Big|_{l_sur, n=+0} + S_l u_s \rho_v \Big|_{l_sur, n=+0}. \quad (3.16)$$

Індекс «l_sur» означає, що дана умова відноситься до поверхні пори, що зайнята рідким середовищем.

Конвекційний потік на поверхні, що зайнята рідиною, виникає внаслідок того, що дифузійний потік водяної пари в пароповітряному середовищі супроводжується також дифузійним потоком сухого повітря, що спрямована в

протилегний бік, тобто до поверхні, що зайнята рідиною. Але повітряний потік через поверхню рідини не може проникати всередину матеріалу. тому дифузійний потік повітря має врівноважитися його конвекційним потоком, спрямованим від поверхні. Тому для потоку повітря умова рівностей потоку на поверхні, зайнятій рідиною, має вигляд:

$$-S_1 \rho D_{v-a} \frac{\partial(1-Y_{v-a})}{\partial n} \Big|_{l_{sur,n=+0}} + S_1 u_s \rho_a \Big|_{l_{sur,n=+0}} = 0.$$

З останнього виразу визначається швидкість конвекційного потоку (потіку Стефана) u_s

$$u_s = - \frac{D_{v-a}}{1-Y_{v-a} \Big|_{l_{sur,n=+0}}} \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial n} \Big|_{l_{sur,n=+0}}.$$

Після підстановки виразу для u_s в граничну умову (3.16) ця умова матиме вигляд

$$S_1 K_1 \frac{\partial p_{cap}}{\partial n} \Big|_{l_{sur,n=-0}} = -S_1 \frac{\rho D_{v-a}}{1-Y_{v-a} \Big|_{l_{sur,n=+0}}} \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial n} \Big|_{l_{sur,n=+0}}$$

або

$$S_1 K_1 \left(\frac{\partial p_{cap}}{\partial Y_{v-a}} \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial n} + \frac{\partial p_{cap}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial n} \right) \Big|_{l_{sur,n=-0}} = -S_1 \frac{\rho D_{v-a}}{1-Y_{v-a} \Big|_{l_{sur,n=+0}}} \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial n} \Big|_{l_{sur,n=+0}}. \quad (3.17)$$

Загальна гранична умова для рівняння масопереносу (3.13) буде отримана після складання граничних умов для потоку газоподібної фракції (3.15) та рідкої фракції (3.17) :

$$\begin{aligned}
& -\frac{w_v}{\rho_v} \rho \frac{D_{v-a}}{\zeta} \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial n} \Big|_{g_sur, n=-0} + \frac{w_l}{\rho_l} K_1 \left(\frac{\partial p_{cap}}{\partial Y_{v-a}} \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial n} + \frac{\partial p_{cap}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial n} \right) \Big|_{l_sur, n=-0} = \\
& = -\frac{w_v}{\rho_v} \rho D_{v-a} \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial n} \Big|_{g_sur, n=+0} - \frac{w_l}{\rho_l} \frac{\rho D_{v-a}}{1 - Y_{v-a}|_{l_sur, n=+0}} \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial n} \Big|_{l_sur, n=+0}.
\end{aligned} \tag{3.18}$$

В правій частині рівняння (3.18) містяться похідні $\frac{\partial Y_{v-a}}{\partial n} \Big|_{g_sur, n=+0}$ та $\frac{\partial Y_{v-a}}{\partial n} \Big|_{l_sur, n=+0}$, що відповідають ділянкам поверхні, які зайняті рідиною та газом.

Приймається, що їх можна наближено вважати однаковими. В цьому випадку умову (4.18) можна переписати у вигляді:

$$\begin{aligned}
& -\left(\frac{w_v}{\rho_v} \rho \frac{D_{v-a}}{\zeta} - \frac{w_l}{\rho_l} K_1 \frac{\partial p_{cap}}{\partial Y_{v-a}} \right) \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial n} \Big|_{sur, n=-0} + \frac{w_l}{\rho_l} K_1 \frac{\partial p_{cap}}{\partial T} \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) \Big|_{sur, n=-0} = \\
& = -\left(\frac{w_v}{\rho_v} + \frac{1}{1 - Y_{v-a}|_{sur, n=+0}} \frac{w_l}{\rho_l} \right) \rho D_{v-a} \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial n} \Big|_{sur, n=+0},
\end{aligned} \tag{3.19}$$

Приймаючи, що $-\rho D_{v-a} \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial n} \Big|_{sur, n=+0} = \beta_c (Y_{v,s} - Y_{v,\infty})$, де β_c – конвекційний

коефіцієнт масовіддачі на поверхнях, останню умову можна переписати у вигляді:

$$\begin{aligned}
& -\left(\frac{w_v}{\rho_v} \rho \frac{D_{v-a}}{\zeta} - \frac{w_l}{\rho_l} K_1 \frac{\partial p_c}{\partial Y_{v-a}} \right) \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial n} \Big|_{sur, n=-0} + \frac{w_l}{\rho_l} K_1 \frac{\partial p_{cap}}{\partial T} \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) \Big|_{sur, n=-0} = \\
& = \left(\frac{w_v}{\rho_v} + \frac{1}{1 - Y_{v-a}|_{sur, n=+0}} \frac{w_l}{\rho_l} \right) \beta_c (Y_{v-a}|_{sur, n=+0} - Y_{v-a,\infty}).
\end{aligned} \tag{3.20}$$

Граничні умови для рівняння перенесення теплоти (3.14) на зовнішній та внутрішній поверхнях огорожувальної конструкції складаються, виходячи з балансу теплоти на цих поверхнях. З середини капілярно-пористого матеріалу до його поверхні теплота видаляється теплопровідністю (з усієї поверхні), а

також конвекцією з потоками пари, повітря і рідини, що надходить до поверхні. У повітряний простір теплота відводиться теплопровідністю та конвекцією з потоками водяної пари j_{v-a} , що вже була в матеріалі, з потоками водяної пари, що утворилася з рідини на поверхні розділу j_{v-l} , та з потоком повітря j_{a-v} . Умова рівності цих потоків має вигляд:

$$\begin{aligned} & - \left[(1 - \Pi) \lambda_s + \lambda_l \frac{w_l}{\rho_l} + \lambda_v \frac{w_v}{\rho_v} + \lambda_a \frac{w_a}{\rho_a} \right] \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{n=-0} + C_l (j_l T) \Big|_{n=-0} \frac{w_l}{\rho_l} \\ & + C_v (j_{v-a} T) \Big|_{n=-0} \frac{w_v}{\rho_v} + C_a (j_{a-v} T) \Big|_{n=-0} \frac{w_a}{\rho_a} = -\lambda_0 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{n=+0} + \\ & + C_v (j_{v-l} T) \Big|_{n=+0} \frac{w_l}{\rho_l} + C_v (j_{v-a} T) \Big|_{n=+0} \frac{w_v}{\rho_v} + C_a (j_{a-v} T) \Big|_{n=+0} \frac{w_a}{\rho_a} - q_{sol} \gamma \end{aligned}$$

де індекс "n-0" означає, що потоки теплоти і маси розглядаються з боку пористого матеріалу, а "n+0" – з боку повітряного середовища. Зважаючи на те що на поверхні $(j_{v-a} T) \Big|_{n-0} = (j_{v-a} T) \Big|_{n+0}$; $C_a (j_{a-v} T) \Big|_{n-0} = C_a (j_{a-v} T) \Big|_{n+0}$; $j_l = j_{v-l}$, а також, що $(C_l \cdot T) \Big|_{n-0} + r = (C_v \cdot T) \Big|_{n+0}$, останній вираз можна спростити:

$$\begin{aligned} & - \left[(1 - \Pi) \lambda_s + \lambda_l \frac{w_l}{\rho_l} + \lambda_v \frac{w_v}{\rho_v} + \lambda_a \frac{w_a}{\rho_a} \right] \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{n-0} = \\ & = -\lambda_0 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{n+0} + r j_{v-l} \Big|_{n+0} \cdot \frac{w_l}{\rho_l} - q_{sol} \gamma \end{aligned}$$

Вище було показано, що

$$j_{v-l} \Big|_{n+0} = - \left(\frac{1}{1 - Y_{v-a} \Big|_{sur, n=+0}} \right) \rho D_{v-a} \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial n} \Big|_{sur, n=+0} = \left(\frac{1}{1 - Y_{v-a} \Big|_{sur, n=+0}} \right) \beta_c (Y_{v-a} \Big|_{sur, n=+0} - Y_{v-a, \infty})$$

Приймається також, що $-\lambda_0 \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=+0} = \alpha_{c+r} (T \Big|_{n=0} - T_\infty)$, де $\alpha_{c+r} = \alpha_c + \alpha_r$ –

сума конвекційного та радіаційного коефіцієнтів тепловіддачі на поверхнях. Отже гранична умова для рівняння перенесення теплоти остаточно набуває вигляду:

$$\begin{aligned}
& - \left[(1 - \Pi) \lambda_s + \lambda_l \frac{w_l}{\rho_l} + \lambda_v \frac{w_v}{\rho_v} + \lambda_a \frac{w_a}{\rho_a} \right] \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{n=-0} = \\
& = \alpha_{c+r} (T|_{n=+0} - T_\infty) + r \left(\frac{1}{1 - Y_{v-a}|_{sur,n=+0}} \right) \beta_c (Y_{v-a}|_{sur,n=+0} - Y_{v-a,\infty}) \frac{w_l}{\rho_l} - q_{sol} \gamma.
\end{aligned} \tag{4.21}$$

де q_{sol} – тепловий потік від сонячної радіації, що падає на зовнішню поверхню огорожувальної конструкції (для граничної умови на внутрішній поверхні стіни ця величина дорівнює нулю). Індекс ∞ – відповідає значенням величин на значній віддалі від поверхонь.

Коефіцієнт масовіддачі β_c можна розраховувати за аналогією між теплопереносом та масопереносом в повітряному середовищі. Співвідношення між α та β_c у такому випадку має вигляд:

$$\beta_c = \frac{\alpha_c}{C_a Le^{2/3}},$$

де $Le = \frac{D_{v-a} C_a \rho_a}{\lambda_a}$ – число Л'юїса.

Аналізуючи процеси тепломасопереносу через капілярно-пористі структури стінових конструкцій треба зазначити, що перенос рідкої фази зазвичай відбувається не надто інтенсивно. Перенос пароподібної вологи протікає суттєво інтенсивніше. Не надто інтенсивно протікає також процес випаровування або конденсації всередині стінової конструкції. Виходячи з цього, для практичної реалізації моделі тепломасопереносу через стінові конструкції наведену вище модель доцільно спростити. У спрощеній моделі масопереносу залишається лише рівняння переносу пароподібної вологи, що не враховує наявності процесу випаровування (конденсації) всередині матеріалу

$$\frac{\partial \rho F_{v-a}}{\partial \tau} = \nabla \left(\rho \frac{D_{v-a}}{\zeta} \nabla F_{v-a} \right). \tag{3.22}$$

В рівнянні теплопереносу не враховується теплота фазового переходу та конвекційний теплоперенос, що відбувається внаслідок взаємної дифузії пари і повітря, а також внаслідок переносу пароподібної вологи. Рівняння теплопереносу приймає вигляд:

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla(\lambda_{\text{ef}} \nabla T), \quad (3.23)$$

де ефективні значення питомої об'ємної теплоємності $C\rho$ і теплопровідності λ_{ef} враховують концентрацію кожного компонента зв'язаної речовини в стіновій конструкції

$$C\rho = (1 - \Pi)\rho_s C_s + w_l C_l + w_v C_v + w_a C_a; \quad \lambda_{\text{ef}} = (1 - \Pi)\lambda_s + \lambda_l \frac{w_l}{\rho_l} + \lambda_v \frac{w_v}{\rho_v} + \lambda_a \frac{w_a}{\rho_a}.$$

З урахуванням викладених вище міркувань спрощуються також граничні умови:

для рівняння масопереносу

$$-\left(\frac{w_v}{\rho_v} \rho \frac{D_{v-a}}{\zeta} \right) \frac{\partial Y_{v-a}}{\partial n} \Big|_{\text{sur}, n=-0} = \frac{\beta_c}{1 - Y_{v-a}|_{v-a, n=+0}} (Y_{v-a}|_{v-a, n=+0} - Y_{v-a, \infty}) \quad (3.24)$$

і для рівняння теплопереносу

$$-\lambda_{\text{ef}} \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) \Big|_{\text{sur}, n=-0} = \alpha_{c+r} (T_s - T_{\infty}) - q_{\text{sol}} \gamma. \quad (3.25)$$

Замість рівняння переносу рідкої фази для визначення її вмісту застосовується крива сорбції – десорбції (рис. 3.1), яка відображає залежність рівноважного вологовмісту від відносної вологості повітря. Зазвичай залежність вологовмісту капілярно-пористого матеріалу від відносної вологості повітря описується апроксимуючою емпіричною функцією. Розглянемо найбільш вживані залежності для розрахунку вологовмісту будівельних матеріалів.

При аналізі експериментальних даних по визначенню рівноважної вологості будівельних матеріалів було встановлено, що в інтервалі відносної

вологості повітря φ від 0,4 до 0,9 рівняння ізотерми адсорбції можна прийняти у вигляді [82]:

$$W_1^p = a \left(\frac{\varphi}{(1-\varphi)} \right)^b, \quad (3.26)$$

де: W_1^p – відносна рівноважна вологість матеріалу, яка з вологовмістом w_1 зв'язана співвідношенням, $W_1 = \frac{w_1}{\rho_s(1-\Pi)}$ a, b – коефіцієнти апроксимуючого рівняння, які залежать від температури і визначаються за експериментальними даними.

Крім виразу (3.26), для математичного опису кривих сорбції застосовують також співвідношення [82]

$$W_1^p = \frac{1}{c \cdot \ln(\varphi) + d} \quad (3.27)$$

де c, d – коефіцієнти апроксимуючого рівняння.

3.3 Скінчено-різницевий метод розв'язання рівнянь тепломасопереносу

Скінчено-різницевий метод розв'язання рівнянь тепломасопереносу, які є диференціальними рівняннями в частинних похідних, полягає в наближеній апроксимації частинних похідних алгебраїчними виразами – скінченими різницями. Розглянемо застосування методу скінчених різниць для параболічного двовимірного рівняння в часткових похідних, прикладом якого є двовимірне рівняння теплопровідності

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right). \quad (3.28)$$

Спочатку двовимірна розрахункова область розбивається сукупністю прямих $y = 0, 1, 2, \dots, M$ та $x = 0, 1, 2, \dots, N$ на елементарні площинки.

Перетини прямих $y = \text{const}$ і $x = \text{const}$ утворюють сукупність вузлів різницевої сітки, вигляд якої наведено на рисунку 3.3. Ця сітка характеризується довжинами дискретних кроків по просторових змінних Δy та Δx , а також дискретним кроком за часом $\Delta \tau$.

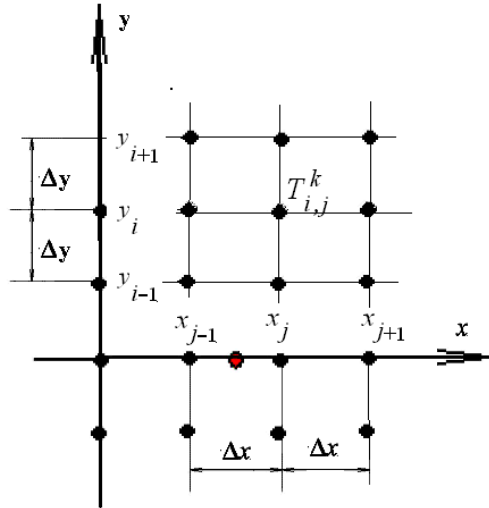


Рисунок 3.3 – Фрагмент розрахункової сітки

Частинна похідна за часом апроксимується скінчено-різницеvim відношенням

$$\frac{\partial T}{\partial \tau}(\tau = \tau_k) \approx \frac{T(\tau_k + \Delta \tau, y_i, x_j) - T(\tau_k, y_i, x_j)}{\Delta \tau} = \frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^k}{\Delta \tau}, O(\Delta \tau), \quad (3.29)$$

де k – номер поточного кроку за часом; $k+1$ – номер наступного кроку за часом; $\Delta \tau$ – крок за часом; $0 < i < M$; та $0 < j < N$ – номери кроків по просторових змінних; M та N – кількості кроків за просторовими змінними; $O(\Delta \tau)$ – точність, або порядок апроксимації. Для першої похідної за часом наведений вираз має перший порядок точності апроксимації, який відповідає порядку величини кроку за часом τ . Порядок, або точність апроксимації, характеризує відмінність величини похідної, записаних в скінчених різницях, від дійсного значення похідної $\frac{\partial T}{\partial \tau}$.

Просторові частинні похідні за змінною y при постійній величині кроку сітки Δy апроксимуються виразами:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} &\approx \frac{1}{\Delta y} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \Big|_{i+1/2} - \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \Big|_{i-1/2} \right] = \frac{1}{\Delta y} \left[\frac{T_{i+1,j}^k - T_{i,j}^k}{\Delta y} - \frac{T_{i,j}^k - T_{i-1,j}^k}{\Delta y} \right] = \\ &= \frac{T_{i+1,j}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i-1,j}^k}{\Delta y^2}, O(\Delta y^2) \end{aligned} \quad (3.30)$$

або

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \approx \frac{T_{i+1,j}^{k+1} - 2T_{i,j}^{k+1} + T_{i-1,j}^{k+1}}{\Delta y^2}, O(\Delta y^2). \quad (3.31)$$

Різницеве рівняння (3.30) відповідає явній за часом схемі апроксимації просторової похідної, а рівняння (3.31) відповідає неявній схемі. Їх відмінність полягає в тому, що до першого виразу входять дискретні значення температури $T_{i,j}^k$, які вже розраховані на попередньому часовому кроці і є відомими величинами. До другого виразу входять дискретні значення температури $T_{i,j}^{k+1}$, які будуть розраховуватися на наступному часовому кроці і є невідомими величинами. Обидва вирази мають другий порядок точності апроксимації по просторовій змінній y . Цей порядок відповідає значенню квадрату кроку Δy^2 за просторовою змінною y .

Аналогічно записуються частинні похідні за другою просторовою змінною x

- за явною часовою схемою:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{T_{i,j+1}^k - 2 \cdot T_{i,j}^k + T_{i,j-1}^k}{\Delta x^2}, O(\Delta x^2)$$

- або за неявною часовою схемою:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{T_{i,j+1}^{k+1} - 2 \cdot T_{i,j}^{k+1} + T_{i,j-1}^{k+1}}{\Delta x^2}, O(\Delta x^2)$$

З використанням наведених виразів складається скінчено різницевий аналог рівняння теплопровідності. У випадку застосування явної схеми апроксимації скінчено різничевого рівняння матиме вигляд:

- для явної схеми

$$C_{p\rho} \frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^k}{\Delta \tau} = \lambda \left(\frac{T_{i+1,j}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i-1,j}^k}{\Delta y^2} + \frac{T_{i,j+1}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i,j-1}^k}{\Delta x^2} \right); \quad (3.32)$$

у випадку неявної схеми:

$$C_{p\rho} \frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^k}{\Delta \tau} = \lambda \left(\frac{T_{i+1,j}^{k+1} - 2T_{i,j}^{k+1} + T_{i-1,j}^{k+1}}{\Delta y^2} + \frac{T_{i,j+1}^{k+1} - 2T_{i,j}^{k+1} + T_{i,j-1}^{k+1}}{\Delta x^2} \right). \quad (3.33)$$

Наведені різницеві схеми відповідають випадку лінійного рівняння теплопровідності, коли коефіцієнт теплопровідності є постійною величиною. При досить значних перепадах температур в розрахунковій області необхідно враховувати залежність коефіцієнту теплопровідності від температури, або, у випадку багатокомпонентного тіла, в якому концентрації компонентів змінюються у часі, скінчено різницева схема має більш складний вигляд. Для випадку використання явної схеми модельне диференціальне рівняння (3.28) апроксимується наступним кінцево-різницевою рівнянням:

$$C_{p\rho} \frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^k}{\Delta \tau} = \frac{1}{\Delta y} \left(\frac{\lambda_{i+1,j}^k + \lambda_{i,j}^k}{2} \cdot \frac{T_{i+1,j}^k - T_{i,j}^k}{\Delta y} - \frac{\lambda_{i,j}^k + \lambda_{i-1,j}^k}{2} \cdot \frac{T_{i,j}^k - T_{i-1,j}^k}{\Delta y} \right) + \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{\lambda_{i,j+1}^k + \lambda_{i,j}^k}{2} \cdot \frac{T_{i,j+1}^k - T_{i,j}^k}{\Delta x} - \frac{\lambda_{i,j}^k + \lambda_{i,j-1}^k}{2} \cdot \frac{T_{i,j}^k - T_{i,j-1}^k}{\Delta x} \right). \quad (3.34)$$

В граничних вузлових точках $i = 0$ та $i = M$, $j = 0$ та $j = N$ шукана функція, якою для модельного рівняння теплопровідності (3.28) є температура $T_{i,j}$, визначається за допомогою різницевої апроксимації граничних умов. У

внутрішніх вузлах різницевої сітки $i = 1, 2, \dots, M - 1$ та $j = 1, 2, \dots, N - 1$ температура $T_{i,j}$ на наступному часовому кроці розраховується по обраному з різницевих рівнянь (3.32) – (3.34).

У випадку лінійного рівняння теплопровідності (3.28) розв'язання скінчено різницевого рівняння, складеного за явною схемою, записується у наступний спосіб

$$T_{i,j}^{k+1} = T_{i,j}^k + \frac{\lambda \Delta \tau}{C_p \rho} \left(\frac{T_{i+1,j}^k - 2 \cdot T_{i,j}^k + T_{i-1,j}^k}{\Delta y^2} + \frac{T_{i,j+1}^k - 2 \cdot T_{i,j}^k + T_{i,j-1}^k}{\Delta x^2} \right). \quad (3.31)$$

Крім точності апроксимації важливими характеристиками різницевих схем є їх збіжність та стійкість. Схема вважається збіжною, коли зі зменшенням кроків за часом $\Delta \tau$ та по просторовим змінним Δy та Δx результат чисельного розв'язання диференціального рівняння все більше наближається до результату точного аналітичного розв'язання диференціального рівняння. Таким чином, точність розв'язання задачі методом скінчених різниць збільшується зі зменшення кроків різницевої сітки.

Схема називається стійкою, якщо малі збурення початкових або граничних умов призводять до малих збурень різницевого розв'язання задачі. Якщо малі збурення початкових або граничних умов призводять до збурень більш високого порядку у результатах розв'язання скінчено різницевої задачі, то такі різницеві схеми вважаються нестійкими.

Для явної схеми апроксимації умова стійкості забезпечується співвідношенням між кроком за часом та довжинами кроків по просторовим змінним. Для визначення цього співвідношення перепишемо розв'язання явного скінчено різницевого рівняння у вигляді:

$$T_{i,j}^{k+1} = \frac{a \Delta \tau}{\Delta y^2} T_{i+1,j}^k + \frac{a \Delta \tau}{\Delta y^2} T_{i-1,j}^k + \frac{a \Delta \tau}{\Delta x^2} T_{i,j+1}^k + \frac{a \Delta \tau}{\Delta x^2} T_{i,j-1}^k - \left(\frac{2a \Delta \tau}{\Delta y^2} + \frac{2a \Delta \tau}{\Delta x^2} - 1 \right) T_{i,j}^k,$$

де $a = \frac{\lambda}{C_p \rho}$ – коефіцієнт теплопровідності.

Для забезпечення стійкості явної різницевої схеми необхідно, щоб вираз в дужках, що стоїть в правій частині цього рівняння, був менше нуля. Тобто,

$$\left(\frac{2a\Delta\tau}{\Delta y^2} + \frac{2a\Delta\tau}{\Delta x^2} - 1 \right) < 0.$$

З цієї нерівності випливає умова для величини кроку за часом, яка залежить від величин кроків по просторовим змінним

$$\Delta\tau < \frac{0,5}{a \left(\frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta x^2} \right)} \quad (3.32)$$

Для випадку неявної різницевої схеми, яка вважається абсолютно стійкою, доцільно використовувати метод змінних напрямків. За цим методом, рівняння, що записане за неявною схемою, замінюється двома рівняннями вигляду:

$$C_{p\rho} \frac{T_{i,j}^{k+1/2} - T_{i,j}^k}{0,5\Delta\tau} = \lambda \left(\frac{T_{i+1,j}^{k+1/2} - 2T_{i,j}^{k+1/2} + T_{i-1,j}^{k+1/2}}{\Delta y^2} + \frac{T_{i,j+1}^k - 2T_{i,j}^k + T_{i,j-1}^k}{\Delta x^2} \right), \quad (3.33)$$

$$C_{p\rho} \frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^{k+1/2}}{0,5\Delta\tau} = \lambda \left(\frac{T_{i+1,j}^{k+1/2} - 2T_{i,j}^{k+1/2} + T_{i-1,j}^{k+1/2}}{\Delta y^2} + \frac{T_{i,j+1}^{k+1} - 2T_{i,j}^{k+1} + T_{i,j-1}^{k+1}}{\Delta x^2} \right). \quad (3.34)$$

Для першого рівняння (3.33) відомою з розрахунків на попередньому часовому кроці є величина:

$$\frac{T_{i,j+1}^k - 2 \cdot T_{i,j}^k + T_{i,j-1}^k}{\Delta x^2} = S_1.$$

Тоді рівняння (3.33) може бути записано у вигляді

$$C_{p\rho} \frac{T_{i,j}^{k+1/2} - T_{i,j}^k}{0,5\Delta\tau} = \lambda \left(\frac{T_{i+1,j}^{k+1/2} - 2 \cdot T_{i,j}^{k+1/2} + T_{i-1,j}^{k+1/2}}{\Delta y^2} \right) + \lambda S_1. \quad (3.35)$$

Після перенесення всіх членів в праву частину і приведення подібних членів відносно шуканої функції T на часовому кроці $k+1/2$ у вузлових точках $i, i-1$ та

$i+1$, і вводячи коефіцієнти $D = a\Delta\tau / (2\Delta y^2)$; $F = a\Delta\tau S_1 + T_{i,j}^k$, рівняння (3.35) записується в такий спосіб:

$$DT_{i+1,j}^{k+1/2} - (2D+1) \cdot T_{i,j}^{k+1/2} + DT_{i-1,j}^{k+1/2} + F = 0. \quad (3.36)$$

Для розв'язання системи рівнянь (3.36) для всіх внутрішніх вузлових точок розрахункової області, застосовується метод прогонки, який полягає в тому, що складається лінійне співвідношення між величинами $T_{i,j}^{k+1/2}$ та $T_{i-1,j}^{k+1/2}$ у вигляді:

$$T_{i-1,j}^{k+1/2} = P_i T_{i,j}^{k+1/2} + Q_i. \quad (3.37)$$

Величини P_i та Q_i визначаються з граничних умов для $i = 0$.

Підстановка цього виразу до наведеного вище рівняння призводить до виразу

$$DT_{i+1,j}^{k+1/2} - (2D+1) \cdot T_{i,j}^{k+1/2} + DP_i T_{i,j}^{k+1/2} + DQ_i + F = 0,$$

з якого випливає наступне відношення

$$T_{i,j}^{k+1/2} = \frac{D}{(2D+1-DP_i)} T_{i+1,j}^{k+1/2} + \frac{DQ_i + F}{(2D+1-DP_i)}. \quad (3.38)$$

Порівнюючи вираз (4.38) з лінійною залежністю між $T_{i,j}^{k+1/2}$ та $T_{i-1,j}^{k+1/2}$ (3.37), матимемо наступні рекурентні співвідношення для коефіцієнтів

$$P_{i+1} = \frac{D}{(2D+1-DP_i)}, \quad Q_{i+1} = \frac{DQ_i + F}{(2D+1-DP_i)} \quad (3.39)$$

Таким чином, метод прогонки полягає в тому, що на першому етапі за значеннями P_i та Q_i по (3.39) розраховуються P_{i+1} та Q_{i+1} для всіх $1 < i < M$. Після визначення для всіх вузлових точок i ($i = 0, 1, \dots, M-1$) P_{i+1} та Q_{i+1} , їх значення підставляються у (3.37)

$$T_{i,j}^{k+1/2} = P_{i+1} T_{i+1,j}^{k+1/2} + Q_{i+1},$$

та у зворотному порядку розраховуються величини $T_{i,j}^{k+1/2}$. Значення $T_{M,j}^{k+1/2}$ визначається з граничних умов для $i = M$. Таким чином виконується прогонка у напрямку осі ОУ.

Для того, щоб розрахувати температуру $T_{i,j}^{k+1}$ на наступному часовому кроці $k + 1$, залучається друге неявне різницеве рівняння (3.34), для якого вже відомими є вирази

$$S_2 = \frac{T_{i+1,j}^{k+1/2} - 2 \cdot T_{i,j}^{k+1/2} + T_{i-1,j}^{k+1/2}}{\Delta y^2},$$

і аналогічним шляхом прогонка для усіх точок розрахункової області виконується тепер у напрямку осі ОХ. Після цього переходять на наступний крок за часом і процедура повторюється.

Незважаючи на те, що при використанні неявної різницевої схеми і методу прогонки для її реалізації слід здійснювати вдвічі більшу кількість розрахункових операцій ніж при рішенні явної різницевої схеми, вагомою перевагою неявної схеми є її абсолютна стійкість, що дозволяє збільшувати крок по часу. Крім того, сучасний рівень ПЕВМ дозволяє проводити обчислення дуже швидко.

3.4 Результати чисельного моделювання температурно-вологісного стану цегляної стіни з урахуванням сонячного випромінювання

За наведеною моделлю виконано розрахунки залежності від часу розподілу температури та вологовмісту по поверхнях та по товщині стінової конструкції з керамічної цегли, що містить віконний проріз. Дослідження температурного і вологого стану цегляної стіни виконується шляхом чисельного розв'язання рівнянь (3.22) та (3.23) з граничними умовами (3.25) та (3.26). За знайденими розподілами температури T і відносної концентрації водяної пари Y_{va} у порах стіни за допомогою виразу (3.9) визначається розподіл відносної вологості водяної пари ϕ . А далі з застосуванням виразу (3.26) розраховується відносна концентрація рідкої води в стіні $W_l = w_l / \rho_s$.

Розглядається цегляна стіна, що має товщину 250 мм. Висота та ширина досліджуваної стінової панелі $h = 3$ м; $a = 3$ м. Досліджувана стінова панель

розташовується на південній стороні споруди. Приміщення, до якого відноситься ця стінова конструкція, опалюється за допомогою пластинчастого радіатора, що розташований під вікном та має температуру $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Чисельні дослідження виконуються для 10 лютого 2018 року з 00-00 год до 24-00 год.

В якості вихідних даних приймаються результати вимірювання зміни у часі температури зовнішнього повітря (рис. 3.4 а) та розрахована за математичною моделлю ASHRAE зміна інтенсивності сонячної радіації для цієї доби (рис. 3.4. б). Коефіцієнт поглинання сонячної радіації зовнішньою поверхнею цегляної стіни складає $\gamma = 0,7$. Температура внутрішнього повітряного середовища в приміщенні постійна і дорівнює $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

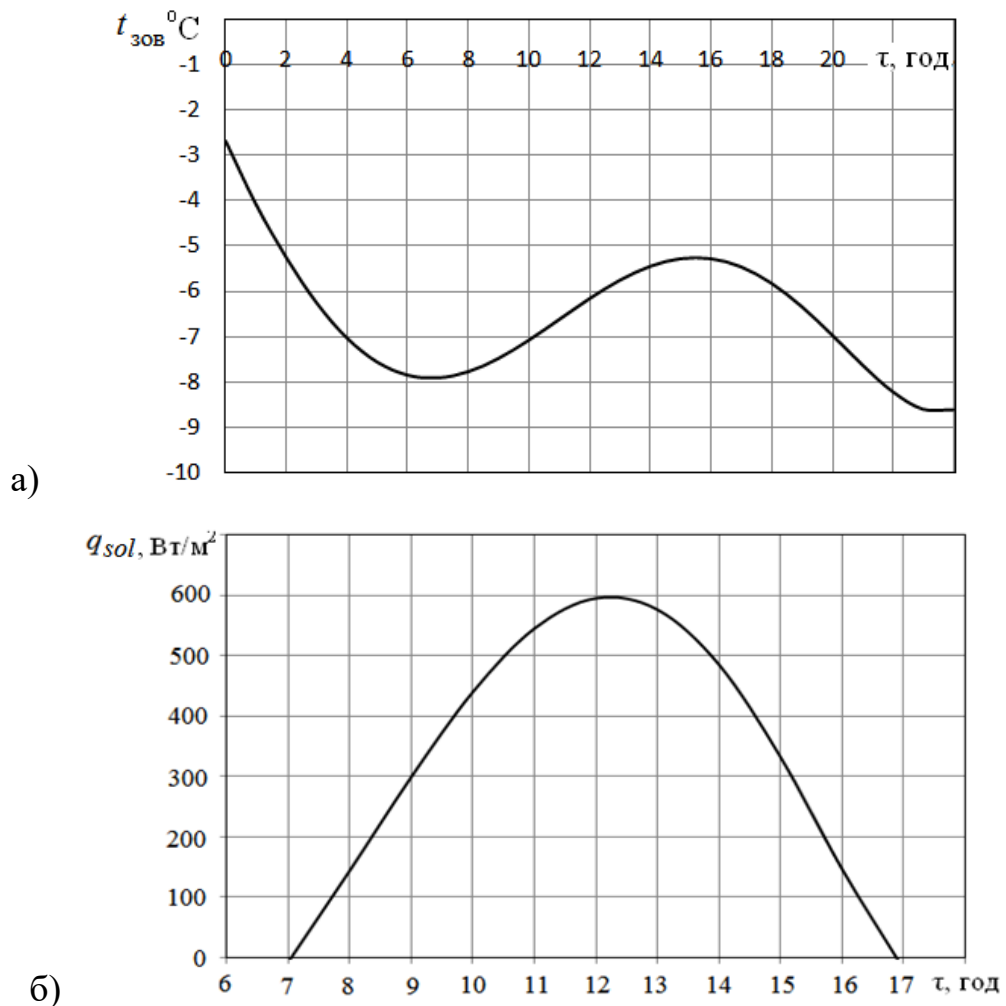


Рисунок 3.4. Залежність від часу температури $T_{\text{зов}}$ зовнішнього повітря (а) та густини теплового потоку q_{sol} від сонячної радіації (б).

Наявність обігрівуючої панелі призводить до істотно нерівномірного розподілу температури на внутрішній поверхні стіни. На рисунку 3.5. представлено результати математичного моделювання розподілу температури по внутрішній та зовнішній поверхнях стінової конструкції в момент часу $\tau = 24$ год.

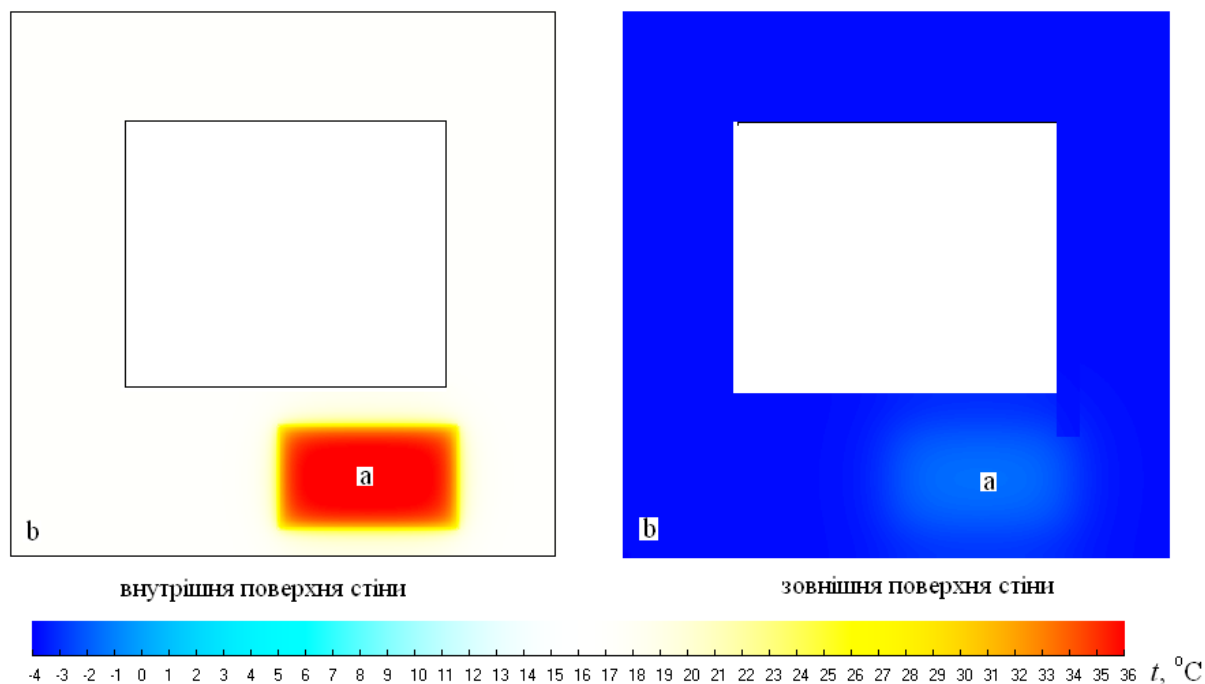


Рисунок 3.5. Розподіл температури по внутрішній та зовнішній поверхнях стіни при $\tau=24$ год

Максимальна температура $36\text{ }^\circ\text{C}$ виявляється на ділянці внутрішній поверхні стіни (точка *a*), біля якої розташовується панельний радіатор. За межами цієї ділянки температура поверхні внутрішньої стіни зменшується до $17\text{ }^\circ\text{C}$ (точка *b*).

Залежність від часу розподілу температури по товщині стіни вздовж ліній *a-a* та *b-b* наведено на рисунку 3.6. Як видно з цього рисунку, за умов відсутності сонячної радіації (о сьомій годині ранку) температура зовнішньої поверхні змінюється від $-5\text{ }^\circ\text{C}$ до $-2,5\text{ }^\circ\text{C}$ (криві 1). О 12-00, коли густина теплового потоку від сонячної радіації максимальна і становить 417 Вт/м^2 , а температура зовнішнього повітря підвищується до $-6,16\text{ }^\circ\text{C}$, температура

зовнішньої поверхні стіни зростає до $+11...+14^{\circ}\text{C}$. О 14-00 за рахунок дії сонячного випромінювання температура на зовнішній поверхні стіни становить $+10...+14^{\circ}\text{C}$ (крива 4). Далі температура стіни починає зменшуватися. Характерною особливістю розподілу температури по товщині стіни за умов дії сонячної радіації є те, що криві розподілу температури в певні моменти часу можуть мати мінімуми та максимуми всередині стінової конструкції (криві 3 на рисунку 3.6).

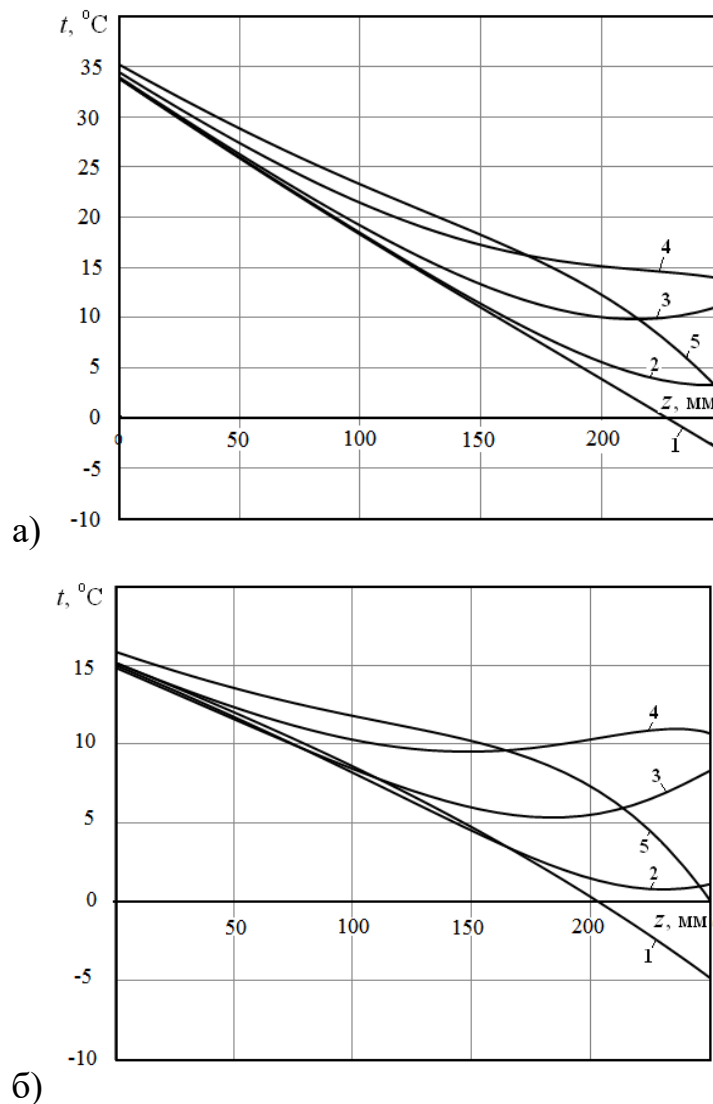


Рисунок 3.6 – Розподіл температури по товщині стіни вздовж лінії $a - a$ (а) та $b - b$ (б) в різні моменти часу: 1 – 7 год; 2 – 9 год; 3 – 11 год; 4 – 14 год; 5 – 17 год

Залежності від часу температури в точках a і b на зовнішній та внутрішній поверхнях стіни відображено на рисунку 3.7. Температура на зовнішній поверхні упродовж доби змінюється досить істотно – монотонно знижується в

нічний період, потім, після сходу Сонця починає зростати, досягаючи о 13-00 годині максимуму, та поступово знижується із заходом Сонця. Температура на внутрішній поверхні стіни залишається упродовж доби майже незмінною, причому у точках біля радіатора істотно вищою.

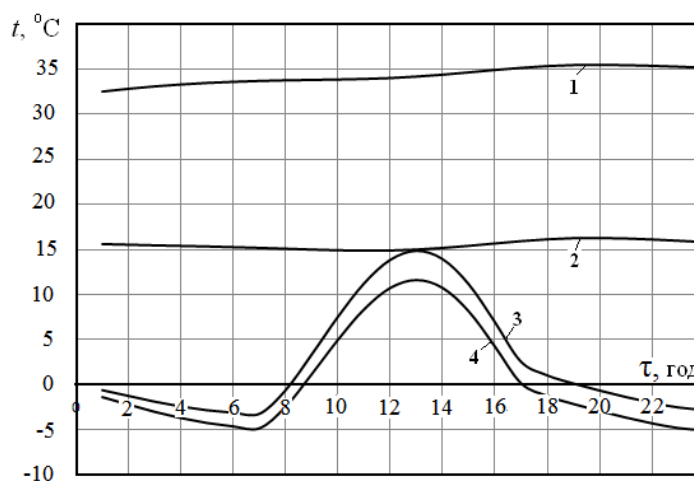


Рисунок 3.7 – Зміна у часі температури на внутрішній (1; 2) та зовнішній (3;4) поверхнях стіни: 1; 3 – точки *a*; 2; 4 – точки *b*

Залежність від часу сумарного теплового потоку на зовнішній та внутрішній поверхнях стіни наведено на рисунку 3.8.

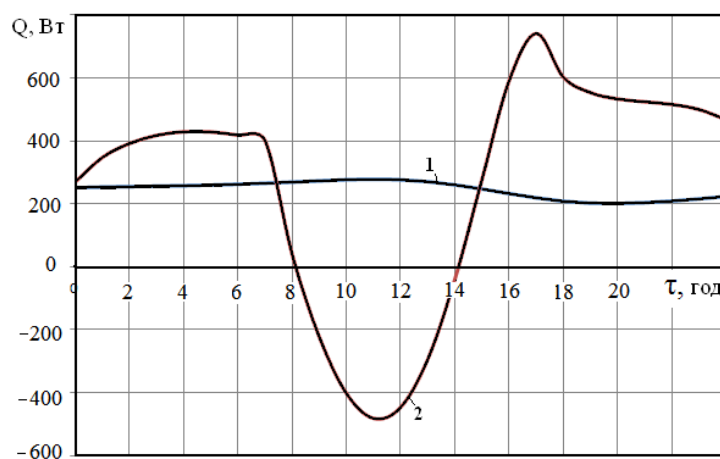


Рисунок 3.8 – Залежність від часу теплового потоку на внутрішній (1) та зовнішній (2) поверхнях стіни

Як видно з рисунку, на внутрішній поверхні сумарний тепловий потік – позитивний і змінюється протягом доби в межах 200...270 Вт. На зовнішній

поверхні тепловий потік може бути як позитивним, (до 8-00 та після 14-00), так і негативним (з 8-00 до 14-00). О 8-00 та о 14-00 відбувається інверсія теплового потоку на зовнішній поверхні. Інверсія пов'язана з тим, що у внутрішній шарі стіни температура нижча, ніж на зовнішній поверхні. За рахунок дії сонячної радіації температура зовнішньої поверхні зростає швидше, ніж температура внутрішніх шарів стіни.

Під впливом сонячної радіації змінюється також вологісний стан стінової конструкції. Зміна у часі відносного вологовмісту стіни $W_l = m_l/m$ вздовж ліній $a - a$ та $b - b$ наведено на рисунку 3.9. Залежності від часу відносного вологовмісту в точках a і b на зовнішній та внутрішній поверхнях стіни відображено на рисунку 3.10.

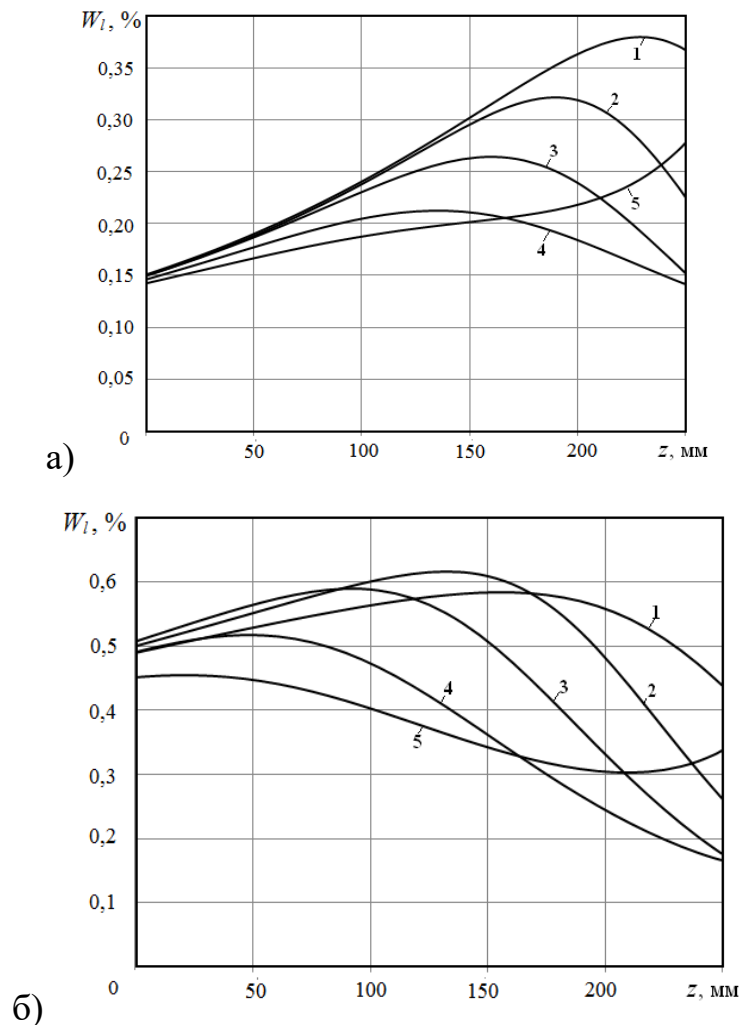


Рисунок 3.9 – Розподіл вологовмісту по товщині стіни вздовж лінії $a - a$ (а) та $b - b$ (б) в різні моменти часу: 1 – 7 год; 2 – 9 год; 3 – 11 год; 4 – 14 год; 5 – 17 год

Як видно з рисунку 3.9, до 7-00, коли сонячна радіація відсутня, вологовміст стінової конструкції збільшується з середини назовні, що є наслідком зменшення температури стіни від внутрішньої поверхні до зовнішньої поверхні. Після 9-00, коли починається дія сонячного випромінювання, вологовміст зовнішньої поверхні стіни зменшується внаслідок підвищення її температури. Після 17-00, коли сонячна радіація відсутня, температура зовнішньої поверхні стіни зменшується. Внаслідок цього вологовміст зовнішньої поверхні стіни починає зростати, як це можна побачити на рисунку 3.10.

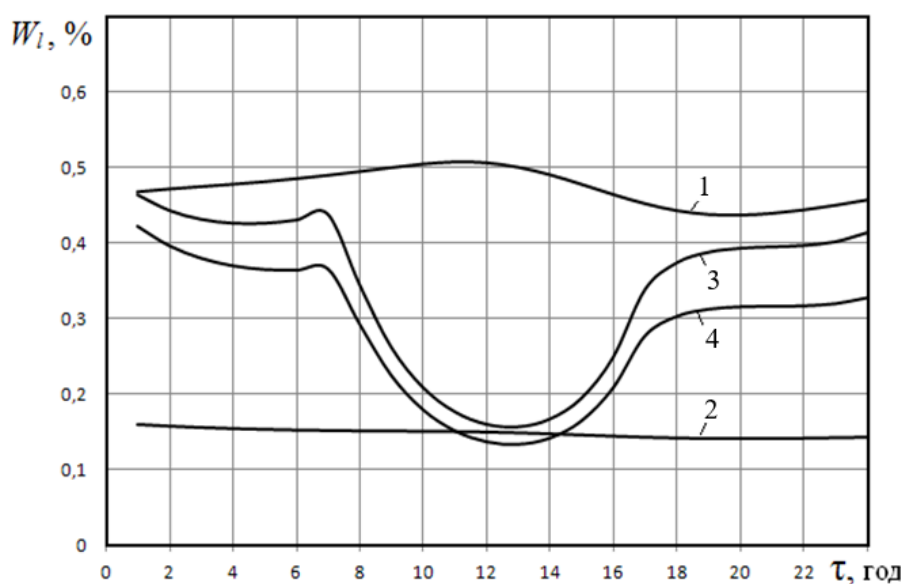


Рисунок 3.10 – Зміна у часі вологовмісту на внутрішній (1; 3) та зовнішній (2;4) поверхнях стіни: 1; 2 – точки *a*; 3; 4 – точки *b*.

З наведених результатів випливає, що сонячне випромінювання суттєво впливає на температурний і на вологісний стан стінової конструкції.

Для зменшення теплових втрат через огорожувальні конструкції на їх зовнішню поверхню наноситься шар теплоізоляційного покриття [81, 106]. Для визначення впливу сонячної радіації на тепературно-вологісний стан стінової конструкції з покриттям виконується чисельне моделювання процесу тепломасопереносу через стінову панель з керамічної цегли, на поверхню якої нанесено шар з базальтової вати завтовшки 0,1 м.

Результати визначення зміни у часі розподілу температури по товщині стіни з покриттям в різні моменти часу наведено на рисунку 3.11. Як видно з цього рисунку, сонячне випромінювання найбільш суттєво впливає на розподіл температури в шарі теплоізоляційного матеріалу. Зміну у часі температури в характерних точках на внутрішній та зовнішній поверхнях стіни з теплоізоляційним покриттям наведено на рисунку 3.12. Вплив сонячної радіації на вологісний стан стінової конструкції з шаром базальтової вати відображено на рисунку 3.13.

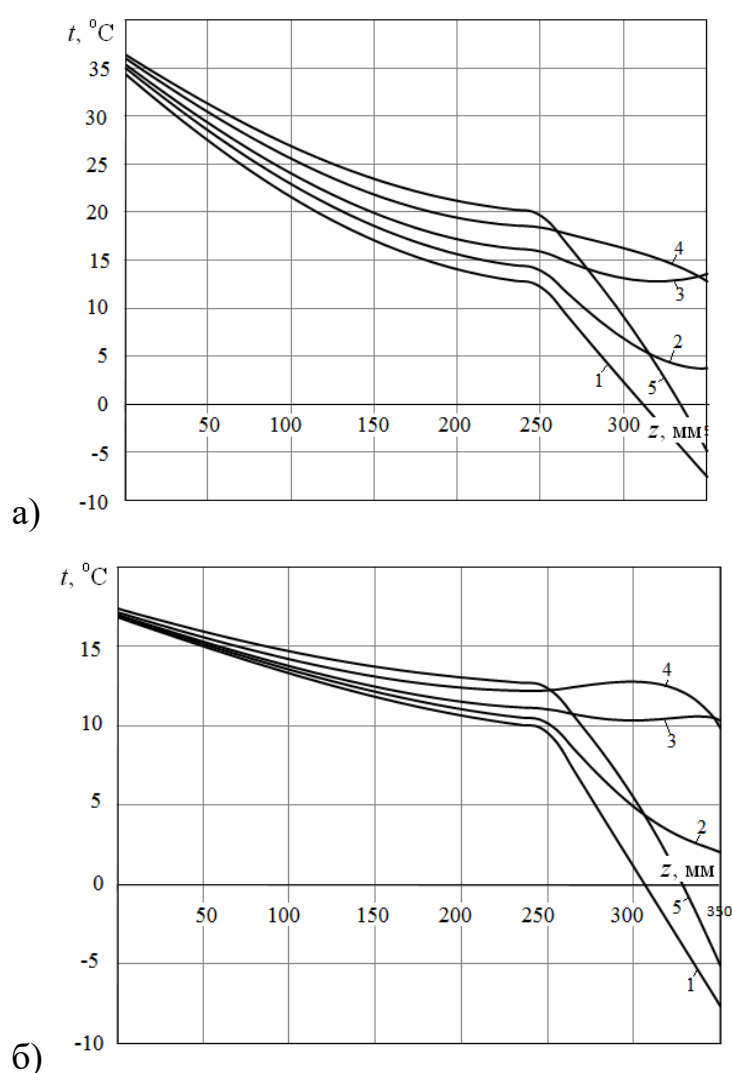


Рисунок 3.11 – Розподіл температури по товщині стіни з теплоізоляційним покриттям вздовж лінії $a - a$ (а) та $b - b$ (б) в різні моменти часу: 1 – 7 год; 2 – 9 год; 3 – 11 год; 4 – 14 год; 5 – 17 год

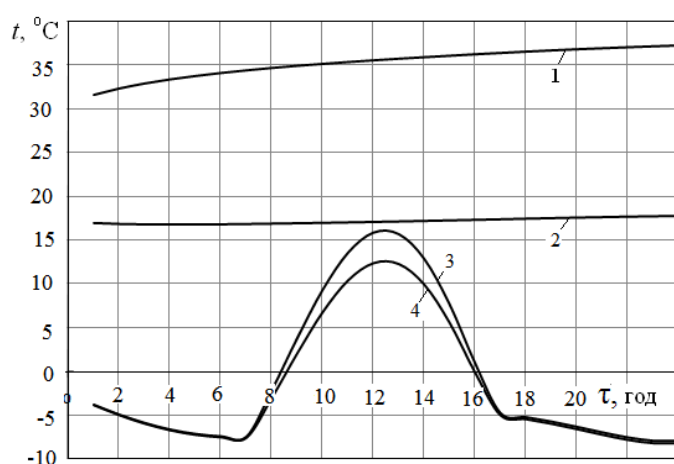
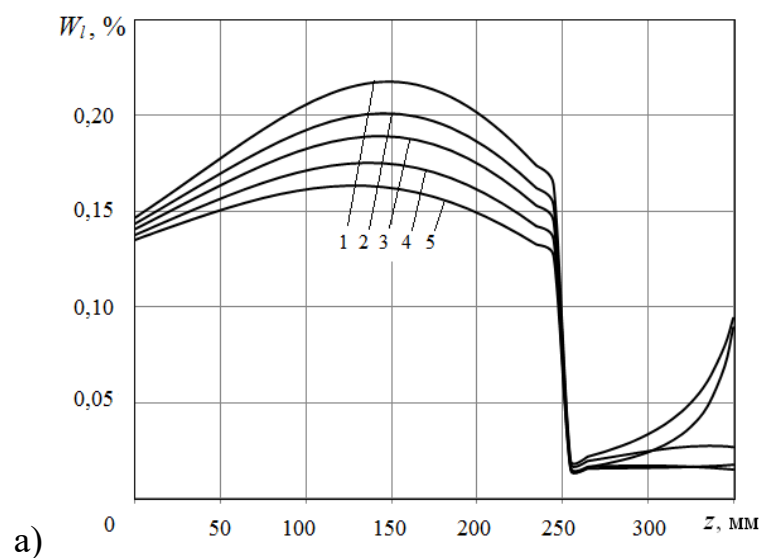
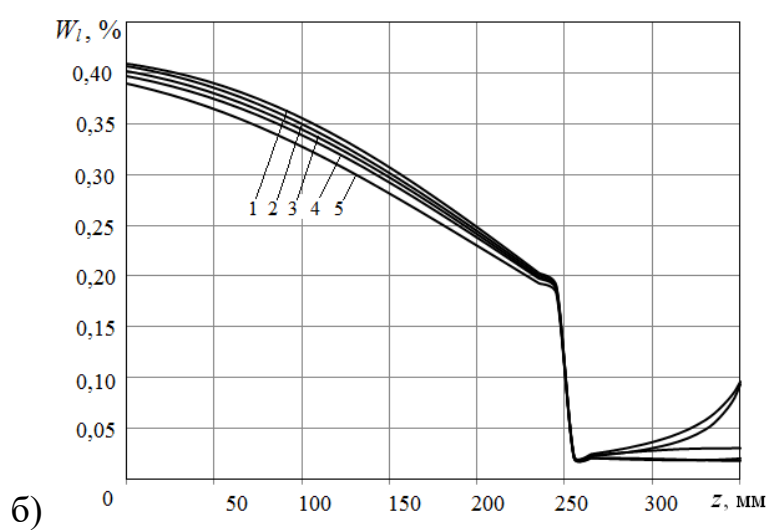


Рисунок 3.12 – Зміна у часі температури на внутрішній (1; 2) та зовнішній (3;4) поверхнях стіни з теплоізоляційним покриттям: 1; 3 – точки *a*; 2; 4 – точки *b*.



а)



б)

Рисунок 3.13 – Розподіл вологовмісту по товщині стіни р вздовж лінії *a – a* (а) та *b – b* (б) в різні моменти часу: 1 – 7 год; 2 – 9 год; 3 – 11 год; 4 – 14 год; 5 – 17 год

Як видно з рисунку 3.13, сонячне випромінювання найбільш суттєво впливає на вологовміст самого покриття, у якого коефіцієнт опору дифузії парів води суттєво менший, ніж у несучої стіні з цегли.

3.5 Метод визначення рівноважного вологовмісту будівельних матеріалів огорожувальних конструкцій

При чисельній реалізації математичної моделі тепло- і масоперенесення через капілярно-пористі будівельні матеріали, наведений в розділі слід мати наявності залежність рівноважного вологовмісту для конкретного матеріалу, яка являє собою залежність відносної концентрації рідкої вологи від відносної вологості оточуючого матеріал повітря при даній температурі. При визначенні концентрації рідини в порах матеріалу слід знати рівноважну концентрацію рідини залежно від відносної вологості парогазової суміші, що контактує з рідиною. Такі залежності часто представляють у графічному вигляді і називають ізотерми сорбції-десорбції. Як вже відмічалось, такі залежності можуть мати вигляд (3.26), (3.27). Вони містять коефіцієнти, що визначаються з експерименту.

Треба зазначити, що залежності рівноважного вологовмісту матеріалу W_p , від значень відносної вологості ϕ повітряного середовища, в якому цей матеріал знаходиться тривалий час при сталій температурі T , зазвичай представляють у вигляді апроксимуючих рівнянь, таблиць або у вигляді графіків, які називаються ізотерми сорбції та десорбції [82]. Рівноважний вологовміст огорожувальної конструкції, що описують зазначені рівняння, таблиці або графіки, встановлюється у відповідності з ізотермами сорбції-десорбції для конкретних будівельних матеріалів, з яких ці конструкції виконано.

Отже, ізотерми сорбції представляють собою емпіричні співвідношення, які апроксимують експериментально отримані графіки $W_p = f(\phi, T)$. Методи експериментального визначення рівноважного вологовмісту є досить складними. Це пов'язано з необхідністю забезпечення тривалого підтримання

незмінного сталого стану оточуючого газового середовища, в якому знаходиться зразок матеріалу, та точності вимірювання незначної зміни маси матеріалу під час зволоження – для побудови ізотерми сорбції, або під час осушення – для ізотерми десорбції. Кожний експеримент дозволяє визначити лише одне значення $W_p(T, \varphi)$. Тобто отримання всіх значень рівноважного вологовмісту для конкретного пористого матеріалу при даній температурі T в усьому діапазоні зміни відносної вологості повітря $0 \leq \varphi \leq 1$ займає істотно тривалий часовий інтервал. Узагальнення результатів експериментальних досліджень полягає в отриманні рівняння, апроксимуючого знайдену криву залежності $W_p = f(T, \varphi)$.

Отже, сучасна теорія явищ сорбції і десорбції не дозволяє визначати строгі аналітичні рівняння ізотерм сорбції-десорбції [82, 86, 89, 107], тоді як потреба в цих залежностях існує, особливо при створенні нових будівельних матеріалів. Одним з варіантів одержання теоретичних залежностей для ізотерм сорбції-десорбції полягає в застосуванні чисельного методу, виходячи з відомої інтегральної функції розподілу пор по розмірах для даного матеріалу та з рівноважної товщини шару конденсату, що утворюється на твердій поверхні, розміщеній в парогазовому середовищі, для якого відомим є T і φ .

Процес утворення рідкої плівки на поверхнях капілярів можна представити наступним чином. При розміщенні сухого пористого тіла у вологому середовищі починає зростати вологість газу у всіх його незамкнених порах. Внаслідок сорбційного і конденсаційного зволоження на стінках капілярів поступово утворюється перший, другий і наступні шари молекул рідини – конденсату. При досягненні необхідного запасу енергії – енергії активації – молекули конденсату можуть знову випаровуватись. При незмінних значеннях T і φ в парогазовій суміші, через певний час кількість молекул, що конденсується буде дорівнювати кількості молекул що, випаровується і товщина шару конденсату δ буде незмінною. Тобто ця товщина досягає рівноважного значення.

Рівноважна товщина δ шару конденсату на стінках частково заповнених капілярів може бути розрахована за формулою М.І. Нікітенко [108]

$$\delta = \delta^* (1 - \sqrt{1 - \varphi}), \quad (3.40)$$

де δ^* – середня довжина зміщення активізованих молекул всередині конденсованого шару, $\delta^* = A / (\xi n)$, A – енергія активації, $\xi = \text{const}$ – коефіцієнт опору переміщенню активованій молекулі до вільної поверхні тіла, n – густина молекул, що випаровуються, $n = \rho_k N_A / \mu_k$, N_A – число Авогадро, μ_k – молекулярна маса конденсованого шару, ρ_k – густина конденсованого шару; φ – ступінь насичення парогазової суміші при даній температурі $\varphi = P_{\text{п}} / P_{\text{н}}(T)$, тобто відносна вологість повітря

Величину δ^* можна представити як тонкий біляграничний шар на поверхні рідкого шару товщиною δ , з якого активізовані молекули рідини, долаючи відстань δ^* , можуть перейти у пароподібний стан. На рисунку 3.14 умовно показано, що вірогідність $w_{\text{в}} = \omega / \Omega > 0$ (яка оцінюється відношенням тілесного кута ω , що стягує розташовану всередині сфери діаметром $2\delta^*$ частину вільної поверхні до кута Ω , що стягує всю цю сферу) перейти у паровий стан є у молекул рідини, які знаходяться на відстані від поверхні рідини, не більший ніж δ^* .

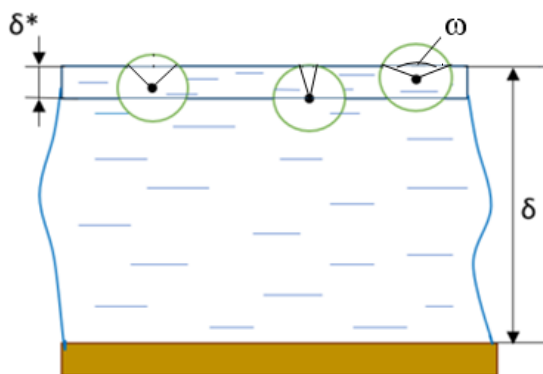


Рисунок 3.14 – Середня довжина зміщення δ^* активізованих молекул шару рідини товщиною δ

Молекули рідинного шару, що зображені на рисунку 3.14 обмежені уявними сферами діаметром $2\delta^*$. При досягненні енергії активації, молекули з рівною вірогідністю можуть переміщуватись у будь-якому напрямку уздовж радіуса цих уявних сфер. Якщо вони переміщуються в напрямку зовнішньої поверхні шару конденсату, ці молекули можуть випаритися.

Формула (3.40) отримана в [108] як відношення розрахункових виразів для рівноважного тиску p_{vp} парогазової суміші і тиску насичення p_{vsat} :

$$P_{vp} = N \frac{\rho_p \bar{\delta}(2 - \bar{\delta})\sqrt{T}}{\exp\left(\frac{A}{kT}\right) - 1}, \quad P_{vsat} = N \frac{\rho_p(T)\sqrt{T}}{\exp\left(\frac{A}{kT}\right) - 1}, \quad N = \text{const.}$$

звідки

$$\frac{P_{vp}}{P_{vsat}} = \bar{\delta}(2 - \bar{\delta}) = \varphi.$$

Тут $\bar{\delta}$ – відносна товщина шару конденсованого тіла: $\bar{\delta} = \delta/\delta^*$ при $0 < \delta < \delta^*$ і $\bar{\delta} = 1$ при $\delta > \delta^*$; k – постійна Больцмана; A – енергія активації; ρ_p – густина рідини.

З формула (3.40) слідує, що в стані насичення, коли $\varphi = 1$, товщина конденсованого шару $\delta = \delta^*$ і при незмінних значеннях T і φ , є однаковою для всіх капілярів з радіусами $r > \delta$. При цьому капіляри, що мають радіуси $r \leq \delta$ будуть заповнені рідиною повністю. Це підтверджують результати візуалізації [109] послідовності заповнення скляних гофрованих пор водою в процесі сорбції та послідовність їх спустошення при випаровуванні рідини (рис. 3.15)

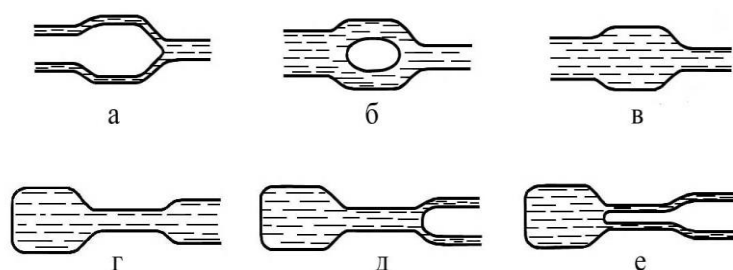


Рисунок 3.15 – Візуалізація послідовності заповнювання гофрованих пор при адсорбції (а, б, в) і звільнення при їх осушуванні (г, д, е) [86]

Коли суха скляна гофрована пора починає контактувати з парою, на всій її поверхні утворюється плівка рідини, товщина якої монотонно зростає, поступово повністю заповнюючи частини пори від найменшого радіуса (рис.3.15, а) до найбільшого (рис.3.15, в). Процес випаровування рідини починається з відкритих менісків (рис.3.15, г), які поступово переміщуються вглибину пори, при цьому на твердих поверхнях залишається шар рідини, товщина якого монотонно зменшується (рис. 3.15, д, е).

3.5.1 Сутність методу побудови ізотерм сорбції

В якості вихідних даних залучається інтегральна функція розподілу пор по розмірах для даного капілярно-пористого матеріалу $V_r=F(r)$.

Вводиться рівномірна різницева сітка

$$r_i = i\Delta r; \quad i = 0, 1, \dots, I; \quad \Delta r = (r_{\max} - r_{\min}) / (I - 1),$$

де $r_{\min}$ і $r_{\max}$ — мінімальний і максимальний радіуси капілярів для даного матеріалу.

На побудованій сітці, спираючись на інформацію про функцію $V_r=F(r)$, визначається масив чисел $F_i=F(r_i)$ і обчислюється диференціальна функція розподілу пор по розмірах за допомогою різницевих співвідношень:

$$\text{у внутрішніх точках} \quad f_i = \frac{F_{i+1} - F_{i-1}}{2\Delta r}, \quad i = 2, 3, \dots, I-1;$$

$$\text{у граничних точках} \quad f_1 = \frac{F_2 - F_1}{\Delta r}; \quad f_I = \frac{F_I - F_{I-1}}{\Delta r}.$$

Далі вводиться різницева сітка по товщині шару конденсату

$$\delta_m = m\Delta\delta; \quad m = 0, 1, \dots, M; \quad \Delta\delta = (\delta^* - \delta_0) / (M-1),$$

де δ_0 — початкова товщина шару конденсату, що відповідає початковій відносній вологості ϕ_0 зовнішнього середовища.

Значення δ_0 може бути прийнято рівним радіусу $r_{\min}$ найменших капілярів для даного пористого матеріалу. Зазвичай розмір r_m молекул рідини, що

адсорбується, співмірний з розміром найменших капілярів. Для більшості капілярно-пористих матеріалів зазвичай виконується умова $r_{\min} \leq 3r_m$ [82].

Наступним кроком є обчислення по формулі (3.40) значень відносної вологості парогазової суміші φ_m для кожного значення δ_m

$$\varphi_m = \frac{\delta_m}{\delta^*} \left(1 - \frac{\delta_m}{\delta^*} \right)$$

та обрахування радіусів R_{im} внутрішніх циліндричних поверхонь капілярів з радіусами r_i , вільних від рідини (рис. 3.16): $R_{im} = r_i - \delta_m$.

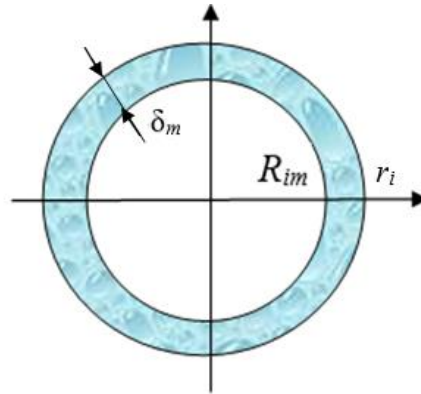


Рисунок 3.16 – Перетин капіляру радіуса r_i , вкритого шаром рідини, товщиною δ_m

Далі розраховуються об'ємні частки рідкої фази σ_{im} у капілярах за формулою

$$\sigma_{im} = \frac{\pi r_i^2 - \pi (r_i - \delta_m)^2}{\pi r_i^2} = \frac{2\delta_m}{r_i} - \frac{\delta_m^2}{r_i^2},$$

та вологовміст W_m пористого тіла при даному значенні відносної вологості парогазового середовища φ_m визначається з виразу:

$$W_l^p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^I (f_i \sigma_{i,m} + f_{i-1} \sigma_{i-1,m}) \Delta r.$$

Знайдена в такий спосіб функція $W_l^p = f_i(\varphi_m)$ при заданій температурі T представляє ізотерму сорбції.

3.5.2 Результати чисельного визначення ізотерм сорбції

За наведеним вище алгоритмом було побудовано ізотерми сорбції парів води мікропористим силікагелем, активним окисом алюмінію та керамічною цеглою. Для зазначених матеріалів було знайдено в літературі дані стосовно функцій розподілу пор по розмірам та експериментально знайдені ізотерми сорбції для їх порівняння з отриманими чисельними результатами побудови ізотерм сорбції.

Інтегральні криві V_r розподілу пор по радіусах для силікагелю [110] і активного окису алюмінію [111] отримано методом ртутної порометрії. Для керамічної цегли в [112] отримано також методом ртутної порометрії диференційну криву розподілу пор по розмірах, з якої було визначено інтегральну криву, представлену на рисунку 3.17.

Загальна пористість керамічної цегли $\Pi=0,31$. Причому розмір пор змінюється в широкому діапазоні. Найбільшу частину пор – 30,4 % складають пори з радіусами 0,01 – 0,02 мкм; приблизно по 15 % займають мікропори з радіусами 0,005 – 0,01 мкм та пори 0,2 – 0,5 мкм.

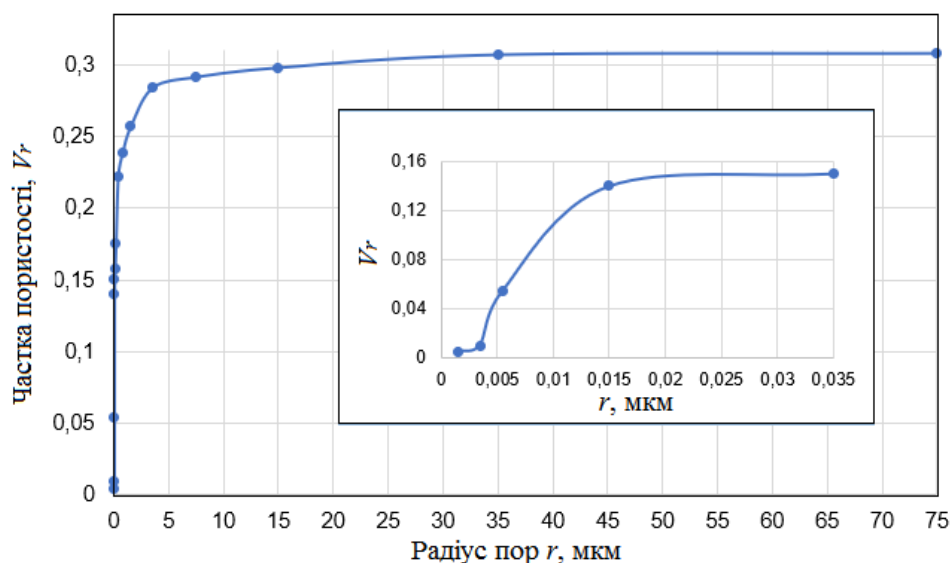


Рисунок 3.17 – Інтегральна крива розподілу пор по розмірах у зразку будівельної керамічної цегли

На рисунку 3.18 представлені ізоТЕРМИ сорбції парів води силікагелем, що отримані при температурі $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ шляхом розрахунків за наведеним алгоритмом та з експериментальних досліджень [110]. Вигляд ізоТЕРМИ свідчить про проходження мономолекулярної адсорбції в мікропорах. Максимальна похибка розбіжності значень розрахункової і експериментальної ізоТЕРМ складає 8,3 %.

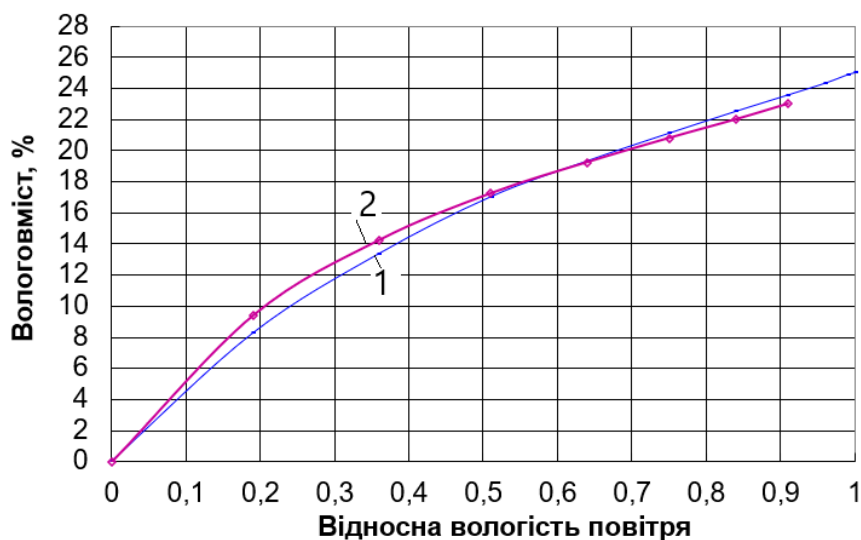


Рисунок 3.18 – ІзоТЕРМИ сорбції парів води силікагелем, визначені при температурі $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$: 1 – розрахунок; 2 – експеримент

Слід зазначити, що значення рівноважного вологовмісту для $\phi = 1$ не було визначено з експерименту.

На рисунку 3.19 наведено розрахункові і експериментальні [111] криві залежностей рівноважного вологовмісту від відносної вологості повітря при температурі $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ для активного окису алюмінію. Декілька вигинів на кривих є характерним для полімолекулярної адсорбції. Максимальна похибка відхилення складає 11,5 %. На рисунку 3.20 зображені криві сорбції парів води керамічною цеглою, отримані на основі представленого чисельного методу і експериментальним шляхом [112] при температурі $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. ІзоТЕРМИ мають два вигини, що також, як і для активного окису алюмінію, свідчить про полімолекулярну структуру керамічної цегли. Криві досить добре узгоджуються між собою. Максимальна похибка не перевищує 4%.

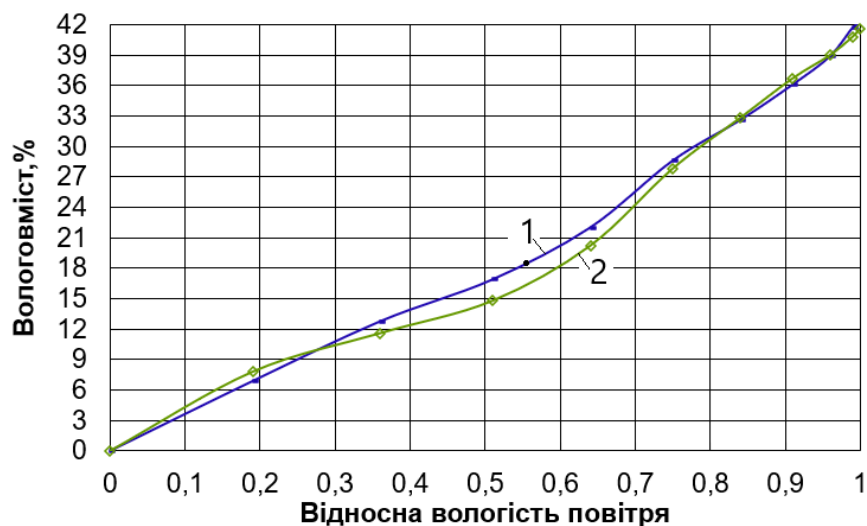


Рисунок 3.19 – Ізотерми сорбції парів води активним окисом алюмінію при температурі $T=30\text{ °C}$: 1 – розрахунок; 2 – експеримент

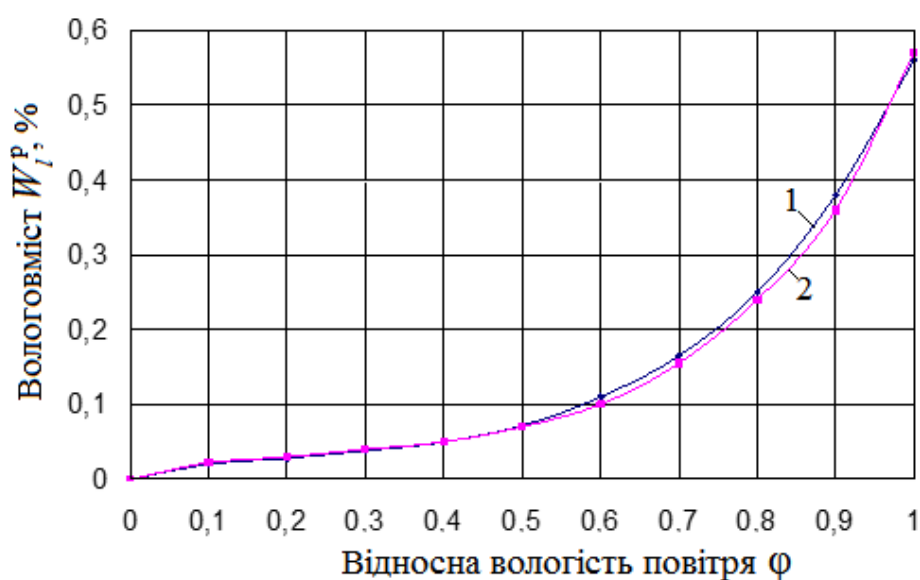


Рисунок 3.20 – Ізотерми сорбції парів води будівельною керамічною цеглою при температурі $T=20\text{ °C}$: 1 – розрахунок; 2 – експеримент

Порівняння ізотерм сорбції для різних пористих матеріалів, отриманих шляхом чисельного моделювання на базі представленого методу та ізотерм, знайдених шляхом експериментальних досліджень, свідчить про ефективність даного методу і можливість його застосування для визначення рівноважного вологовмісту будь-якого пористого матеріалу в усьому діапазоні значень

відносної вологості зовнішнього середовища, що є важливим при вирішенні широкого кола практичних задач як в будівельній, так і в інших галузях промисловості.

3.6 Висновки

1. Розроблено нестационарні нелінійні математичні моделі динаміки тепло- і вологоперенесення в одно- і багатошарових огорожувальних будівельних конструкціях, які на відміну від існуючих математичних моделей враховують вплив сонячного випромінювання та різних механізмів перенесення вологи з метою встановлення закономірностей формування їх тепловологісного стану.

2. Виконано порівняльний аналіз даних, що відповідають відсутності і наявності теплоізоляційного шару; показано, що в останньому випадку дія сонячного випромінювання локалізується в зоні, прилеглій до зовнішньої поверхні стінки.

3. Теоретично виявлено і обґрунтовано ефект обернення (інверсії) теплового потоку в огорожувальній конструкції під впливом сонячного випромінювання за відсутності теплоізоляційного шару.

4. Встановлено що наявність сонячного випромінювання спричиняє суттєве зменшення вологовмісту цегляної стінки, що призводить до підвищення її теплоізоляційних властивостей.

5. Розроблено розрахунково-експериментальний метод визначення рівноважного вологовмісту капілярно пористих матеріалів в залежності від відносної вологості повітря при даній температурі. Одержано задовільне узгодження розрахункових і експериментально отриманих ізотерм сорбції.

6. Основні наукові результати опубліковані в роботах [113 – 121].

РОЗДІЛ 4. ВПЛИВ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ТЕМПЕРАТУРНИЙ РЕЖИМ ПРИМІЩЕННЯ В ЗИМОВИЙ ПЕРІОД

Формування мікроклімату в приміщенні в зимовий період року відбувається в результаті взаємодії аеродинамічних і теплообмінних процесів, які супроводжують перенесення теплоти від нагрівальних приладів в навколишній простір через огорожувальні конструкції будівлі. Температурний режим в приміщенні залежить як від ефективності нагрівальних приладів, так і від теплоізоляційних характеристик огорожувальних конструкцій. В даний час як нагрівальні пристрої часто використовуються однопанельні або двопанельні радіатори. Від даних пристроїв теплота в приміщення надходить природною конвекцією і випромінюванням. Променевий тепловий потік надходить від радіатора на стіни, підлогу і стелю. Теплота конвекцією передається безпосередньо повітряному середовищі приміщення.

Важливим фактором формування мікроклімату в приміщенні в зимовий період року є також сонячна радіація, що надходить в приміщення через світлопрозорі огорожувальні конструкції, тобто через вікна. Шляхом чисельного моделювання досліджується вплив сонячного випромінювання, що потрапляє в приміщення через вікна, на температурний режим цього приміщення. Особливості повітряно-температурного режиму приміщення, що обігрівається двопанельними радіаторами, розглядаються на прикладі кімнати з двома вікнами і двома радіаторами, встановленими під вікнами. Висота приміщення $H = 3$ м; довжина $L = 5,6$ м; ширина $B = 6,3$ м. Товщина зовнішньої бетонної стіни 0,24 м. Внутрішні стіни, підлогу і стелю також виконані з бетону. Товщина внутрішніх стін 0,12 м. Вікна в кімнаті однокамерні. Товщина скла 3 мм. Відстань між скляними поверхнями 60 мм. Площі панелей радіаторів $0,5 \text{ м}^2$. Ширина кожної панелі 10 мм. Відстань між панелями 100 мм. Розглядається випадок, коли температура панелей радіаторів складає $t_p = 40 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура зовнішнього повітря $t_z = -10 \text{ }^\circ\text{C}$. З боку зовнішньої повітряного

середовища задається значення коефіцієнта тепловіддачі $\alpha_3 = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$, як це рекомендовано в [106]. Для випадку відсутності впливу сонячної радіації температурний режим подібного приміщення досліджується в [113].

4.1 Математична модель температурного режиму приміщення в зимовий період з урахуванням інтенсивності сонячного випромінювання

Конвекційний рух повітряного середовища в приміщенні, що виникає за рахунок нерівномірного розподілу температури, описується системою рівнянь динаміки турбулентної течії спільно з рівнянням енергії. До цієї системи входять:

- рівняння нерозривності

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0; \quad (4.1)$$

- рівняння турбулентного перенесення імпульсу вздовж горизонтальної осі OX

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_x}{\partial \tau} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_{\text{еф}} \frac{\partial u_x}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_{\text{еф}} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\nu_{\text{еф}} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \right]; \end{aligned} \quad (4.2)$$

- рівняння турбулентного перенесення імпульсу вздовж горизонтальної осі OY

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_y}{\partial \tau} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_{\text{еф}} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_{\text{еф}} \frac{\partial u_y}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\nu_{\text{еф}} \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \right]; \end{aligned} \quad (4.3)$$

- рівняння турбулентного перенесення імпульсу вздовж вертикальної осі OZ

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_z}{\partial \tau} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_{\text{еф}} \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_{\text{еф}} \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left[\nu_{\text{еф}} \frac{\partial u_z}{\partial z} \right] - g, \end{aligned} \quad (4.4)$$

де $\nu_{\text{еф}} = \nu_{\text{еф}} + \nu_t$; $\nu_t = C_\mu k^2 / \varepsilon$

-рівняння енергії для повітряного середовища

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_{\text{ef}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_{\text{ef}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(a_{\text{ef}} \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (4.5)$$

де $a_{\text{ef}} = a + \nu_t / \sigma_T$; $\sigma_T = \text{Pr}_T$

Система рівнянь (4.1) – (4.5) доповнюється рівняннями k - ε моделі турбулентності:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial \tau} + u_x \frac{\partial k}{\partial x} + u_y \frac{\partial k}{\partial y} + u_z \frac{\partial k}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] + \nu_t S^2 - \varepsilon; \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + u_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + u_y \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + u_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \nu_t S^2 - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}, \end{aligned} \quad (4.7)$$

де коефіцієнти $C_\mu = 0,09$; $C_1 = 1,44$; $C_2 = 1,92$; $\sigma_k = 1$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$;

$$S^2 = \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2.$$

На поверхнях стін приміщення приймаються граничні умови:

$$u_x = 0; \quad u_y = 0; \quad u_z = 0; \quad k = 0;$$

Умова $k = 0$ на твердій поверхні покладається з погляду на те, що кінетична енергія турбулентності задається як напівсума квадратів турбулентних пульсацій швидкості. Що стосується дисипації кінетичної енергії турбулентності ε , то на твердій поверхні ця величина виявляється невизначеною. Тому при числовому розв'язанні системи рівнянь k - ε моделі турбулентності методом сіток, функцію ε визначають лише до найближчих до стінки вузлів, не розглядаючи її на самій твердій поверхні. У цих вузлах величина ε визначається з виразу

$$\varepsilon = C_D \frac{k^{3/2}}{\kappa \cdot \Delta n},$$

де $C_D \approx 0,08/C'_\mu$, Δn – відстань від найближчого до поверхні вузла сітки до самої поверхні; $\kappa \approx 0,4$ – постійна Кармана.

Температурне поле в огорожувальних конструкціях описується рівнянням теплопровідності

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_w \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_w \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(a_w \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (4.8)$$

де a_w – коефіцієнт температуропровідності огорожувальних конструкцій приміщення (стін приміщення або віконного скла).

На зовнішній поверхні зовнішньої стіни і вікна (тобто з боку довкілля) задається граничні умови третього роду:

$$-\lambda_w \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=0} = \alpha_{c+r} \left(T_w \Big|_{n=0} - T_\infty \right) - q_{sol} \gamma, \quad (4.9)$$

$$-\lambda_{gl} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=0} = \alpha_{c+r} \left(T_{gl} \Big|_{n=0} - T_\infty \right) - q_{sol} \gamma. \quad (4.10)$$

Тут n – зовнішня до поверхонь нормаль; T_w і T_{gl} – температури стіни і скла; q_{sol} – інтенсивність сонячного випромінювання; γ – коефіцієнт, що враховує зменшення сонячного теплового потоку внаслідок погодних умов або розташування стінки; T_∞ – температура зовнішнього повітря; α_{c+r} – радіаційно-конвекційний коефіцієнт тепловіддачі.

На границі між склом вікна і повітряним прошарком між ними задаються умови спряження, тобто граничні умови четвертого роду, що враховують променистий теплообмін між скляними поверхнями:

$$-\lambda_{gl} \frac{\partial T}{\partial n} = -\lambda_a \frac{\partial T}{\partial n} + q_r.$$

Густина променистого теплового потоку q_r , що переноситься з поверхні, яка має температуру T_{w1} , на поверхню з температурою T_{w2} розраховується за законом Стефана-Больцмана:

$$q_r = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_{w1}} + \frac{1}{\varepsilon_{w2}} - 1} \int \left[\left(\frac{T_{w1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{w2}}{100} \right)^4 \right] \frac{\cos(\psi_{w1-n_w}) \cdot \cos(\psi_{w2-n_r})}{\pi r^2} dF.$$

На внутрішніх поверхнях вікна та внутрішніх поверхнях стін також задаються умови четвертого роду з урахуванням променистої складової теплового потоку q_r

$$-\lambda_w \frac{\partial T}{\partial n} = -\lambda_a \frac{\partial T}{\partial n} + q_r,$$

Вважається, що променистий теплообмін відбувається між радіатором та внутрішніми поверхнями приміщення. Взаємний променистий теплообмін між внутрішніми поверхнями приміщення не враховується. Тому граничні умови на внутрішніх поверхнях стін можна переписати у вигляді [122]:

$$-\lambda_w \frac{\partial T}{\partial n} = -\lambda_a \frac{\partial T}{\partial n} - \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_{ra}} - 1} \int \left[\left(\frac{T_{ra}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \frac{\cos(\psi_{w-n_w}) \cdot \cos(\psi_{ra-n_{ra}})}{\pi r^2} dF_{ra} \quad (4.11)$$

де r – відстань між точкою на поверхні стіни і точкою на поверхні радіатора, n_w – нормаль до поверхні стіни, n_r – нормаль до поверхні радіатора; ψ_{w-n_w} – кут між радіусом-вектором, проведеним з точки на поверхні стіни до точки на поверхні радіатора, і нормаллю до поверхні стіни; $\psi_{ra-n_{ra}}$ – кут між радіусом-вектором, проведеним з точки на поверхні радіатора до точки на поверхні стіни, і нормаллю до поверхні радіатора; ε_w ; ε_{ra} – ступені чорноти поверхонь, значення яких приймаються рівними 0,8; F_{ra} – площа поверхні радіатора. Температура поверхні радіатора $T = T_r$ вважається заданою та постійною.

Розрахункова область включає в себе внутрішній об'єм приміщення, обмежений стінами. До розрахункової області належать лише половини бічних

стін, стелі і підлоги. Другі половини бічних стін вважаються такими, що належать суміжнім приміщенням. Вважається, що температурний режим в суміжних приміщеннях аналогічний температурному режиму приміщення, що розглядається. У зв'язку з цим, на зовнішніх границях внутрішніх стін (а також підлоги та стелі) задаються умови симетрії, або теплоізоляції. Тобто нормальні до поверхні стіни похідні від її температури на зовнішній поверхні стіни вважається рівними нулю : $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$

На нижню ділянку стіни, що протилежна вікну, та на ділянку підлоги, що примикає до цієї стіни, надходить сонячне випромінювання, що проходить крізь вікно. Тому граничні умови на цих ділянках стіни і підлоги задаються з урахування впливу сонячного випромінювання

$$\begin{aligned}
 -\lambda_w \frac{\partial T}{\partial n} = & -\lambda_a \frac{\partial T}{\partial n} - \\
 & - \frac{C_0}{\frac{1}{\epsilon_w} + \frac{1}{\epsilon_{ra}} - 1} \int \left[\left(\frac{T_{ra}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \frac{\cos(\psi_{w-n_w}) \cdot \cos(\psi_{ra-n_{ra}})}{\pi r^2} dF_{ra} - q_{sol}
 \end{aligned} \quad (4.12)$$

де q_{sol} – густина теплового потоку сонячного випромінювання.

Система рівнянь конвективного тепломасопереносу (4.1) – (4.7) спільно з граничними умовами (4.9) – (4.12) розв'язується методом скінчених різниць.

Для визначення впливу сонячного випромінювання на температурний режим приміщення в зимовий період року задача аеродинаміки і теплоперенесення в приміщенні розв'язується для двох випадків. У першому випадку сонячне випромінювання вважається відсутнім. У другому ж випадку це випромінювання має місце. З порівняння результатів, отриманих для цих двох випадків, визначається вплив додаткового теплового потоку, що надходить в приміщення за рахунок сонячної радіації.

4.2 Результати чисельного моделювання

Чисельна реалізація математичної моделі проводилась для офісного приміщення $3,0 \times 5,6 \times 6,3$ м³ з двома вікнами і двома радіаторами під ними. Товщини зовнішньої і внутрішніх стін: 0,24 м і 0,12 м. Стіни, підлога і стеля виконано з бетону. Вікна однокамерні з товщиною скла 3 мм і відстанню між ними 60 мм. Площі панелей радіаторів 0,5 м², їх ширина 10 мм. Відстань між панелями 100 мм. Температури панелей радіаторів $t_{ra} = 40$ °С, температура назовні $t_{out} = -10$ °С.

Результати чисельного моделювання полів швидкості і температури в приміщенні за умов відсутності сонячного випромінювання наведено на рисунках 4.1 та 4.2. Поля швидкості і температури представлено у двох взаємно перпендикулярних площинах перетину приміщення. Вертикальний перетин В-В, паралельний бічним стінам, перетинає панелі одного з радіаторів посередині (рис.4.1); вертикальний перетин С-С, паралельний зовнішній стіні приміщення і розташований на відстані 1,6 м від внутрішньої поверхні зовнішньої стіни (рис. 4.2).

Рисунок 4.1 демонструє, що у верхній і нижній частині приміщення утворюються циркуляційні течії. В області стелі циркуляція повітря виникає внаслідок спрямованої вгору вільноконвекційної течії повітря від радіатора. Біля підлоги циркуляційний протік утворюється за рахунок опускної течії повітря від холодної зовнішньої стіни і вікна. Зазначений холодний потік поширюється на значну відстань від зовнішньої стіни всередину приміщення.

Напрямки повітряних потоків формують розподіл температури по висоті приміщення. Внаслідок цього температура всередині приміщення підвищується в напрямку від підлоги до стелі. Над самою підлогою температура знижується до 12 °С. На висоті 1,4 м від підлоги температура складає 16 °С. Біля стелі вона підвищується до 19 °С.

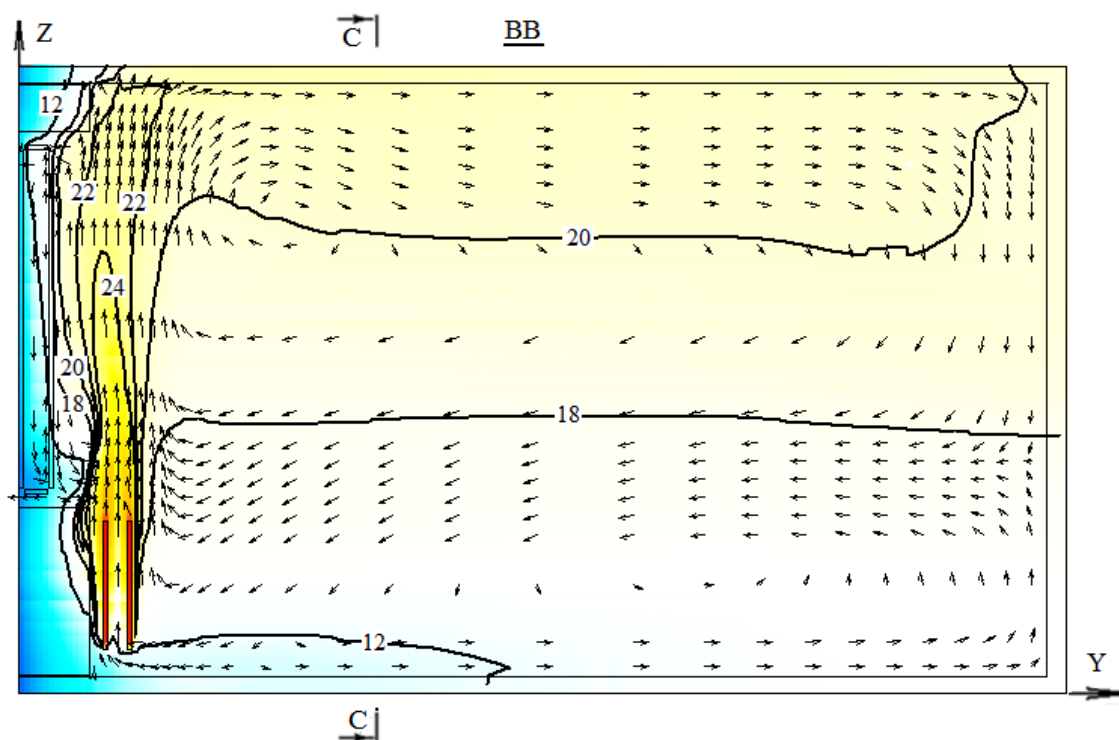


Рисунок 4.1 – Розподіл швидкості повітря і температури в вертикальному перерізі В-В при $t_r = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{out}} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ за умов відсутності сонячної радіації.

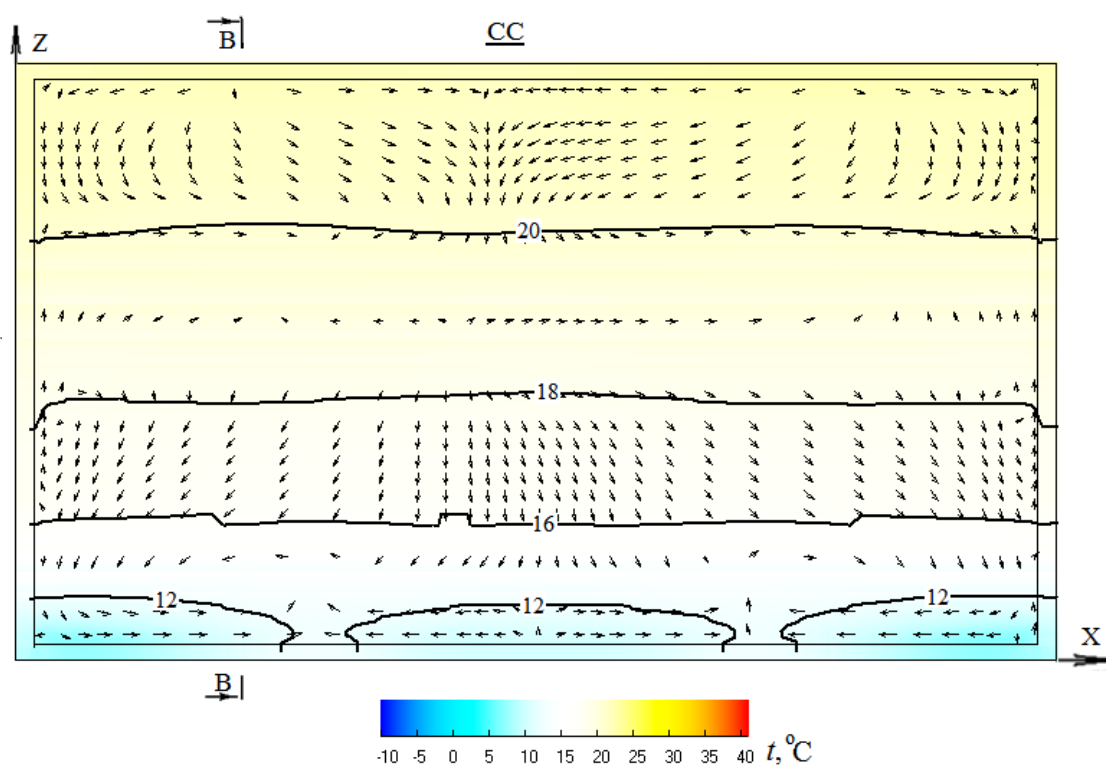


Рисунок 4.2 – Розподіл швидкості повітря і температури в вертикальному перерізі С-С при $t_{\text{ra}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{out}} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ за умов відсутності сонячної радіації.

Наведені результати отримані за умов відсутності сонячної радіації.

Результати розрахункових досліджень, що одержані за умов наявності сонячної радіації наведено на рисунках 4.3 та 4.4. Ці дані відносяться до випадку безхмарної погоди 22 грудня у м. Києві. Кут висоти Сонця, тобто кут між горизонтом і променем до Сонця, складає о 12-00 годині у м. Києві $\beta = 0,28$ радіан. Сонячні промені, що проходять через скло, потрапляють частково на стіну, що протилежна вікну, а також частково на ділянку підлоги, що примикає до задньої стіни (рис. 4.3). Максимальна густина сонячного випромінювання 22 грудня о 12-00 складає $q_{sol} = 393 \text{ Вт/м}^2$ (у разі повної відсутності хмар та запилення атмосфери). Напрямок цього потоку збігається з напрямком на Сонце. Отже, цей напрямок паралельний променю, який складає з земною поверхнею кут $\beta = 0,28$ радіан.

З часом кут β змінюється. Густини потоків сонячної енергії, що падають на стіну та підлогу, також змінюються у часі. Крім того, в грудні небо може бути частково вкрито хмарами. Тому для розрахунку впливу сонячної радіації на температурний стан кімнати приймається, що за період часу з 11-00 до 13-00 осереднена за часом густина теплового потоку від сонця дещо менша, ніж наведена вище величина і що вона складає $q_{sol} \sim 300 \text{ Вт/м}^2$. Кут, під яким сонячний промінь потрапляє на Землю на широті Києва лишається незмінним ($\beta = 0,28$). Густина теплового потоку, що потрапляє на підлогу, складає $q_{sol,z} = q_{sol} \sin(\beta)$, а густина теплового потоку, що потрапляє на стіну, що протилежна вікну, дорівнює $q_{sol,y} = q_{sol} \cos(\beta)$.

Результати розрахунку полів швидкості і температури в приміщенні за розглянутих умов впливу сонячного випромінювання представлені на рисунках 4.3 та 4.4.

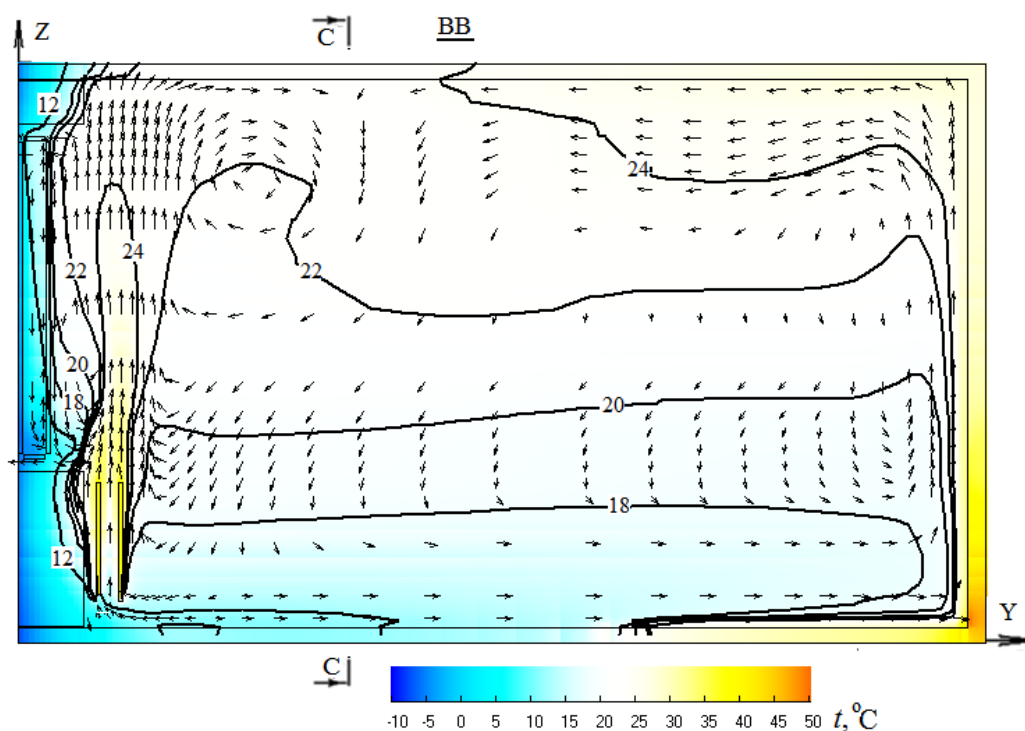


Рисунок 4.3 – Розподіл швидкості повітря і температури в вертикальному перерізі В-В при $t_{\text{ra}} = 40^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{out}} = -10^{\circ}\text{C}$ за наявності надходжень теплоти від сонячного випромінювання.

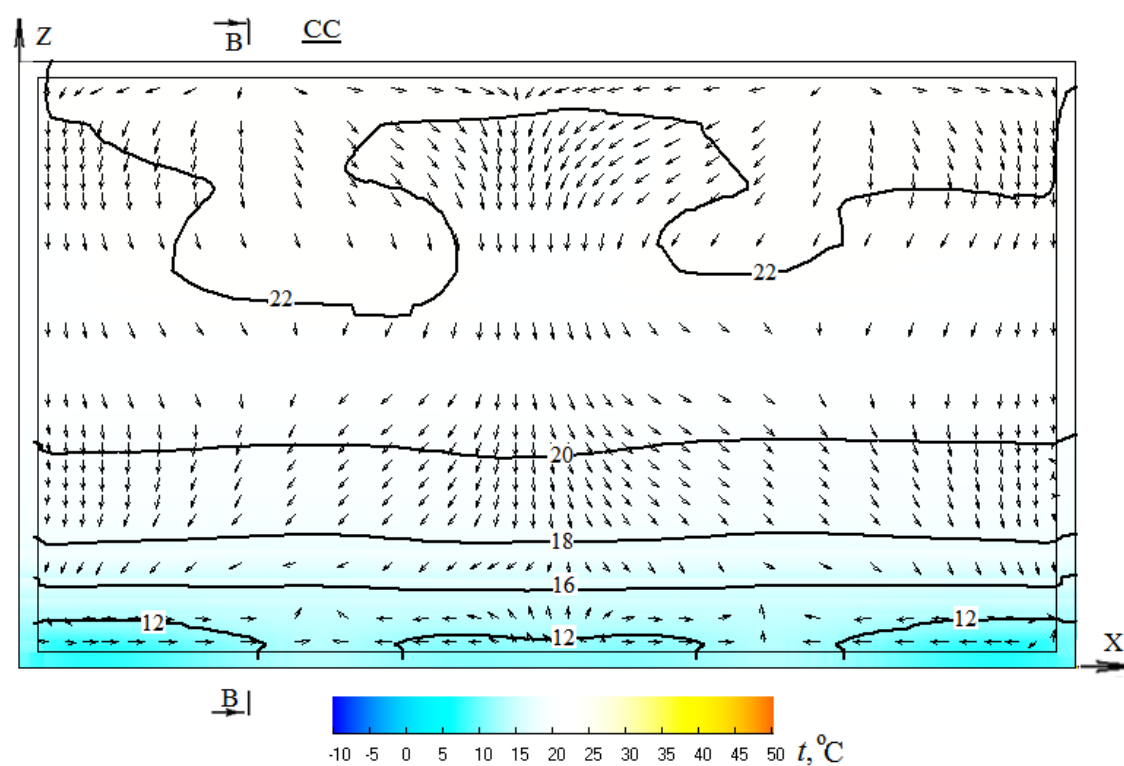


Рисунок 4.4. – Розподіл швидкості повітря і температури в вертикальному перерізі С-С при $t_{\text{ra}} = 40^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{out}} = -10^{\circ}\text{C}$ за наявності надходжень теплоти від сонячного випромінювання.

Граничні умови на ділянках стіни, на які потрапляє сонячне випромінювання, враховують додаткове надходження теплоти від сонця і мають вигляд, представлений виразом (4.12).

За даних умов площі ділянок, на які потрапляють сонячні промені, складають: на підлозі від першого вікна $\Delta F_1 = 3,02 \text{ м}^2$; на підлозі від другого вікна $\Delta F_2 = 3,02 \text{ м}^2$; на стінці, що протилежна вікнам, $\Delta F_3 = 0,32 \text{ м}^2$ (від першого вікна); $\Delta F_4 = 0,32 \text{ м}^2$ (від другого вікна). Сумарна площа поверхонь в приміщенні, на які через вікна потрапляє сонячне випромінювання складає $\Delta F_{\text{сум}} = 6,68 \text{ м}^2$. Отже, у приміщення, що має об'єм $105,84 \text{ м}^3$, за рахунок енергії Сонця надходить тепловий потік $Q_{\text{sol}} = q_{\text{sol},z} \Delta F_{\text{sum}} = 668 \text{ Вт}$.

Як видно з рисунків 4.3 та 4.4, при наявності сонячної радіації температура в приміщенні, при однакових зовнішніх погодних умовах ($t_{\text{out}} = -10 \text{ }^{\circ}\text{C}$) і температурах панелей радіаторів ($t_{\text{ra}} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$), суттєво підвищується. За умов відсутності сонячної радіації середня температура повітря в приміщенні складала $18,03 \text{ }^{\circ}\text{C}$. За умов її наявності температура підвищується до $20,63 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

При дії сонячного випромінювання змінюються також напрямки конвекційних потоків повітря. Це особливо стосується ділянки приміщення, що примикає до стіни, що протилежна вікну. Цей вплив також видно зі зміни у розподілах температури повітря в приміщенні по його висоті, що демонструють результати на рисунку 4.5. На рисунку 4.5 (а) представлено розподіли температури повітря вздовж вертикальної лінії, що розташовується на відстані $y=0,82 \text{ м}$ від передньої стіни та на відстані $x=1,62 \text{ м}$ від бокової лівої стіни. На рисунку 4.5 (б) наведено розподіли температури повітря вздовж вертикальної лінії, що розташовується на відстані $y = 3,11 \text{ м}$ від передньої стіни та на відстані $x = 1,62 \text{ м}$ від бокової лівої стіни. Порівняння цих розподілів температури повітря в приміщенні для випадків відсутності та наявності сонячного випромінювання вказує на те, що за даних умов сонячне випромінювання сприяє підвищенню температури повітря на $2...3 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

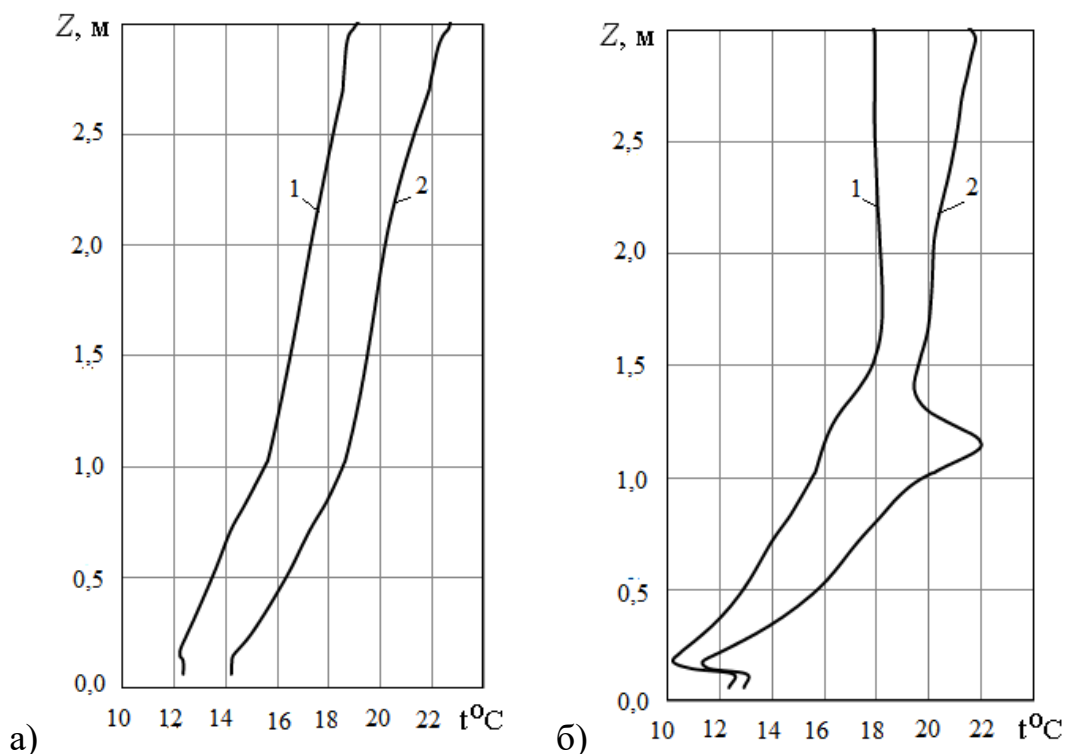


Рисунок 4.5 – Розподіли температури по висоті приміщення уздовж двох вертикальних ліній $y=0,82 \text{ м}$; $x=1,62 \text{ м}$ (а) та $y = 3,11 \text{ м}$; $x = 1,62 \text{ м}$ (б): 1 – при відсутності сонячної радіації; 2 – при наявності сонячної радіації.

З отриманих результатів чисельного моделювання випливає, що в зимовий період року сонячна радіація, яка потрапляє в приміщення через вікно, може суттєво підвищити температуру його стін і повітря. Це дозволяє (при наявності в будинку індивідуального теплового пункту) дещо знизити температуру теплоносія в радіаторі і тим самим зменшити витрати теплоти на обігрів приміщення без суттєвого зниження середньої температури повітря в приміщенні.

4.3 Висновки

1. Побудовано математичну модель температурного режиму приміщення в опалювальний період з урахуванням додаткового теплового надходження на

внутрішні поверхні стін та підлогу від сонячного випромінювання через віконні прорізи.

2. На основі отриманих результатів чисельного моделювання виконано аналіз особливостей впливу на повітряно тепловий стан приміщень сонячного випромінювання, що надходить через віконні прорізи. При цьому:

- показано, що за наявності сонячного випромінювання помітно змінюється картина течії повітря; це насамперед, стосується зони, прилеглої до протилежної вікну внутрішньої стіни приміщення;
- встановлено, що дія сонячного випромінювання проявляється у зміні характеру температурних полів приміщення, підвищенні на 16-18 °С локальних значень температури протилежної вікну стінки, збільшенні температури повітря поблизу стелі на 6-7 °С, та зростанні середньої температури повітря на 2-3 °С. Це дозволяє отримати енергозберігаючий ефект за рахунок зниження температури теплоносія опалювальних пристроїв.

3. Основні наукові результати опубліковані в роботах [123 – 126].

ВИСНОВКИ

1. З метою довгострокового накопичення даних про інтенсивність сонячної радіації на території ІТТФ НАНУ за допомогою піранометра СР-М1 проведено вимірювання інтенсивності сумарного сонячного випромінювання протягом року. Аналіз даних, які фіксувались автоматично, дозволив отримати інформацію про густини променевих потоків на горизонтальну поверхню та поверхні обернені по сторонах Світу; мінімальні і максимальні надходження сонячної енергії в залежності від орієнтації сприймаючої поверхні; відсоток сонячних і похмурих днів в кожному місяці, інтегральні променеві потоки.

2. На основі математичної моделі зміни інтенсивності сонячного випромінювання Американського товариства інженерів з опалення, охолодження і кондиціонування повітря ASHRAE проведено математичне моделювання інтенсивності сонячної радіації на горизонтальну поверхню для окремих днів року. Порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними показує їх достатньо задовільний збіг в будь-який час року, що свідчить про можливість ефективного використання даного розрахункового підходу для оцінки інтенсивності сонячної радіації в регіонах України. Відмінності експериментальних даних від розрахункових значень пояснюється наявністю хмар в районі вимірювання в той чи інший момент часу.

3. Розроблено математичну модель динаміки тепло- і вологоперенесення в огорожувальних конструкціях, яка на відміну від існуючих моделей враховує зміну концентрації рідкої і парової фаз в залежності від тепловологісного стану оточуючого середовища та інтенсивності сонячного випромінювання. Результати розрахункових досліджень температурно-вологісного стану стінових конструкцій показали значний вплив сонячної радіації на розподіл температури і вологовмісту по товщині стіни в денні часи. Встановлено, що в часи найбільшої інтенсивності сонячного випромінювання в денні години в холодний період року температура на зовнішній поверхні огорожувальної

конструкції може суттєво перевищувати температуру у глибинних шарах стінки. Внаслідок цього спостерігається інверсія теплового потоку біля зовнішньої поверхні стіни, при якій тепловий потік надходить з зовнішньої поверхні в середину стіни.

4. Розроблена математична модель спряженої задачі динаміки тепловологоперенесення в багатошаровій огорожувальній конструкції, яка враховує зміну температури і концентрацій рідкої і парової фаз в кожному шарі в залежності від тепловологісного стану оточуючого середовища та інтенсивності сонячного випромінювання. Результати розрахункових досліджень показали, що при наявності шару утеплювача на зовнішній поверхні стіни сонячне випромінювання переважно впливає на температурно-вологісний стан утеплювача. Температурно-вологісний режим несучої стінової конструкції за умов дії сонячного випромінювання змінюється несуттєво.

5. Для визначення рівноважного вологовмісту будівельних матеріалів розроблений чисельний метод побудови ізотерм сорбції, який забезпечує задовільний збіг отриманих розрахункових результатів з експериментальними даними. Даний метод, у порівнянні з експериментальними методами, дозволяє значно скоротити час отримання ізотерм сорбції в усьому діапазоні зміни відносного вологовмісту оточуючого середовища та може застосовуватися на практиці, якщо для капілярно-пористого матеріалу відомі інтегральна або диференціальна функції розподілу пор по радіусу.

6. Побудована математична модель температурного режиму приміщення в опалювальний період з урахуванням інтенсивності сонячного випромінювання, що визначалась на основі математичної моделі ASHRAE. Математична модель замикалась рівняннями k - ϵ моделі турбулентності. Результати чисельного моделювання свідчать, що в зимовий період року сонячна радіація, яка потрапляє в приміщення через вікно, може суттєво підвищити (на 2...3 °C) температуру його стін і повітря. Це дозволяє дещо знизити температуру теплоносія в радіаторі і тим самим зменшити витрати теплоти на обігрів

приміщення без помітного зниження середньої температури повітря в приміщенні.

7. Результати проведених досліджень впроваджено в будівельну практику на підприємстві ПП «Ірпін'ятеплосервіс» в робочому проєкті «Капітальний ремонт будівлі спортивного залу Державного закладу професійно-технічної освіти зі специфічними умовами навчання «Академія патрульної поліції» за адресою м. Київ, вул. Святослава Хороброго, 9» (Додаток 1)

- при розробці заходів з енергозбереження, а саме для визначення товщини шару захисних покриттів огорожувальних конструкцій було використано результати математичного моделювання тепловологісного стану огорожувальних приміщень будівель, які отримано на базі математичної моделі, розробленої в дисертаційній роботі Сорокового Р.Я.;

- при проєктуванні на даху спортивного залу сонячної фотовольтаїчної станції, кут нахилу панелей, з пріоритетом роботи в зимовий період, уточнювався на основі отриманих в дисертаційній роботі Сорокового Р.Я. даних експериментальних досліджень по інтенсивності сонячного випромінювання на поверхні різної орієнтації.

8. Запропоновані підходи при проведенні досліджень а також отримані в дисертаційній роботі результати використовуються у навчальному процесі підготовки фахівців за спеціальностями (ОП) «Теплогазопостачання та вентиляції», ОП «Теплоенергетика обладнання хімічних виробництв та підприємств будівельних матеріалів» Київського національного університету будівництва і архітектури. (Додаток 2)

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гончарук С.М., Лисенко О.М. Теплофізичні аспекти підвищення енергоефективності громадських будівель. Київ : Наук. думка. 231 с. ISBN 978-966-00-1775-7
2. Маляренко В.А. Енергетика і навколишнє середовище., Х.: Видавництво САГА, 2008. – 364 с. ISBN 978-966-2918-47-2.
3. Форкун Я. Б., Шкурпела О.О. Сонячна теплоенергетика: конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітньої програми – «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії»); Харків нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. 88 с.
4. Відновлювані джерела енергії / За заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. – 392 с. ISBN 978-966-999-077-8
https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Monografia_final_21.12.2020.pdf
5. Р. Титко Відновлювальні Джерела Енергії (досвід Польщі для України) : навч. посібник / Р. Титко, В. М. Калініченко. – Варшава : OWG, 2010. – 530 с.
6. Стрельцов О.А., Шкарупа А.О. Аналіз особливостей сонячних батарей. Automation and development of electronic devices. 2022. Part 2. С. 89 – 94.
<https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/53fc32f9-b5cd-4536-95eb-7d58b7606b1d/content>
7. Santhi D. Recent developments and future advancements in solar panels technology. Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1495. №. 1. IOP Publishing, 2020.
8. Sabady P. R. The Solar House. London: Newnes-Butterworth. 1978. 116 p.
9. Nishant Modi, Bhargav Pandya. Integration of evacuated solar collectors with an adsorptive ice maker for hot climate region. Energy and Built Environment. 2022. V. 3, Issue 2. P. 181–189
10. Танака С., Суда Р. Жилые дома с автономным солнечным теплохладоснабжением. М.: Строиздат. 1989. 243 с.

11. Пасивний будинок: що це, переваги та недоліки. Електронний ресурс: <https://comfortsellers.com.ua/pasyvnyy-budynok-shcho-tse-perevahy-ta-nedoliky/>
12. Adamson B. Passive Climatization of Residential Houses in People's Republic of China. Lund Univ., Report BKL 1987:2.
13. Feist W. "Forschungsprojekt Passive Hauser." Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt: 1988.
14. (PDF) Der Härtetest: Passivhäuser im strengen Winter 1996/97. Available from: https://www.researchgate.net/publication/343675507_Der_Hartetest_Passivhauser_im_strengen_Winter_199697 [accessed Jun 22 2024]
https://www.researchgate.net/publication/343675507_Der_Hartetest_Passivhauser_im_strengen_Winter_199697
15. Іванішена К. В., Ніколайчук І.І. Використання сонячної енергії у сушильних камерах для деревини. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2007. № 4. С. 66 – 70.
16. Клименко О.А., Постникова М.В. Використання сонячних колекторів для сушки зерна на зернопунктах. Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної Інтернет-конференції студентів та магістрантів за підсумками наукових досліджень 2015 року «Проблеми механізації та електрифікації АПК» Мелітополь: ТДАТУ, 2016. Випуск III. С. 131 – 134.
17. Чалаєв Д.М., Шаврин В.С., Дабіжа Н.О. Сонячний адсорбційний холодильник. Матеріали 10-ї ювілейної міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика XXI століття», АР Крим, смт. Миколаївка, 14 – 18 вересня 2009 р. – Крим, 2009. – С. 191-194.
18. Forkun Ya. B. Analysis of structures and methods of calculation of solar collectors as an alternative source of heat energy [Text] / O.B. Yegorov, Ya. B. Forkun, O. Ju. Yegorova // Lighting engineering and power engineering. 2017. Vol.3. P. 31–36.

19. Матях С.В., Суржик Т.В., Рєзцов В.Ф. Визначення ефективності впровадження систем сонячного гарячого водопостачання / Відновлювана енергетика. 2020. № 1. С. 34-42.
20. Priscila Gonçalves Vasconcelos Sampaio, Mario Orestes Aguirre González. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. Renewable and Sustainable Energy Reviews. V.74. 2017. P. 590-601, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.081>.
21. Мхитарян Н.М. Гелиотехника. Системы, технологии, применение. К.: Наукова думка, 2002. 313 с.
22. Кудря С.О., Рєпкін О.О., Яценко Л.В., Ткаленко М.Д., Шинкаренко Л.Я., Пепелов О.В. Напрями розвитку водневої енергетики та водневої економіки в Україні. Матеріали XX-ої міжнародної науковопрактичної конференції “Відновлювана енергетика та енергоефективність XXI століття”, м. Київ, 15 –16 травня 2019 р., С. 58 – 65.
23. Ju S., Kim H., Kwak H. *et al.* Dielectric light-trapping nanostructure for enhanced light absorption in organic solar cells. 2023. Sci Rep: 13 , Article number: 20649. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47898-9>
24. Мхитарян Н.М., Яценко Л.В. Шинкаренко Л.Я., Будько В.І. Розвиток водневої енергетики в Україні / Матеріали IX міжнародної конференції “Відновлювана енергетика XXI століття” 15-19 вересня 2008 р., АР Крим: 2008. С. 24 – 29.
25. Автономна фотоелектрична установка. Патент України № 80770, МПК (2006), P243 2/02, НОН 31/042, Н02И 3/00, автори Дзензерський В.О., Плаксін С.В., Погорелая Л.М., Соколовський І.І., Тарасов С.В., Шкиль Ю.В., патентовласник ІТСТ НАНУ "Трансмаг" та "ВЕСТА-Дніпро", заявка № а200600074, заявл. 03.01.2006, опубл. 25.10.2007, Бюл. № 17
26. Сонячна комбінована енергоустановка водного базування. Патент України № 110986, МПК (2016.01), F03B 13/00 Н01L 31/042, Н02S 20/30, автори

Дзензерський В.О.; Тарасов С.В.; Костюков І.Ю.; Буряк О.А. заявка № а201401463, заявл. 14.02.2014, опубл. 10.03.2016, Бюл. № 5

27. Гаєвський О. Ю. Фотоенергетика. Частина І. Сонячна радіація і фотоелектричні модулі [Ел. ресурс]: підручник. Електрон. текстові дані (1 файл: 5,57 Мб). Київ : КПІ імені Ігоря Сікорського, 2023. 150 с. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/11874d49-250c-45c6-84a2-203c546e3104/content>

28. Корбан В.Х. Методи метеорологічних вимірювань. Одеса: ТЕС. 2009. 400 с.

29. Паламарчук Л.В., Шевченко О.Г. Метеорологічні прилади та вимірювання. Київ: Видавництво «Інтерконтиненталь-Україна», 2012. 123 с. https://www.researchgate.net/publication/338633844_METEOROLOGICNI_PRILADI_TA_VIMIRUVANNA [accessed Oct 06 2024].

30. Actinometer sensing element. Pat. RU 2011953 C1, G01J5/02, Sheletun V.I. application 4624125/25, 20.12.1988, date of publ. 30.04.1994. 5 с.

31. Actinometer. Pat. WO 20011/081548A1, G01J 5/12 (2006.01), G01W 1/12 (2006.01), Tsarev V.V., Alekseevich A.N., Goroin A.V., application PCT/RU2009/000752, 30.12.2009, date of publ. 07.07.2011. 20 с.

32. Нетробчук І. М. Вимірювання метеорологічних величин : навч. посіб. / Ірина Марківна Нетробчук. Луцьк: Вежа-Друк, 2015. 128 с. ISBN 978-617-7272-12-9.

33. Електронний ресурс: What is a pyrheliometer? A quick introduction to pyrheliometer basics. <https://www.hukseflux.com/uploads/inline/what-is-a-pyrheliometer-v2407.pdf>

34. Blanc P., Espinar B., Geuder N., Gueymard C., Meyer R., Pitz-Paal R., Reinhardt B., Renné D., Sengupta M., Wald L., Wilbert S., Direct normal irradiance related definitions and applications; the circumsolar issue. Solar Energy, 2014. V. 110. P. 561-577. doi.org/10.1016/j.solener.2014.10.001.

35. Gueymard C.A. Turbidity determination from broadband irradiance measurements: a detailed multi-coefficient approach. Journal of Applied Meteorology, 1998. V.37. P. 414–435. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1998\)037<0414:TDFBIM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1998)037<0414:TDFBIM>2.0.CO;2).

36. Ångström A. Radiation to actinometric receivers in its dependence on aperture conditions. *Tellus*, 1961. V.13. P. 425–431
37. WMO, 2010. CIMO guide to meteorological instruments and methods of observation. In: *Measurement of Radiation*, World Meteorological Organization, 2010. №. 8. P. 157–198 (Chapter 7).
38. Reinhardt, B., 2013. On the Retrieval of Circumsolar Radiation from Satellite Observations and Weather Model Output. Dissertation, LMU München. 5. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:19-164380>
39. Reinhardt, B., Buras, R., Bugliaro, L., Wilbert, S., and Mayer, B.: Determination of circumsolar radiation from Meteosat Second Generation, *Atmos. Meas. Tech.*, 2014. V.7. P. 823–838. <https://doi.org/10.5194/amt-7-823-2014>.
40. Ватаман Р., Тягур Ю. Вимірювання потужності сонячного випромінювання. Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування, 2017. С. 135–136.
41. Сонячна теплоенергетика. [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/уклад.: Ю.П. Вишневська, О.В. Козачук / КПІ ім. Ігоря Сікорського, Електронні текстові дані (1 файл: 2,43 Мбайт). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 53 с. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/11874d49-250c-45c6-84a2-203c546e3104/content>
42. Електронний ресурс: What is a pyranometer? A quick introduction to pyranometer basics <https://www.hukseflux.com/applications/solar-energy-pv-system-performance-monitoring/what-is-a-pyranometer>
43. Волоконно-оптичний піранометр. Патент на корисну модель. Номер заявки: u 2019 10966. Дата подання заявки: 07.11.2019; Дата публікації відомостей про видачу патенту: 27.04.2020, Бюл. № 8.
44. Pat. FR 2685767 AI France. Un dispositif de mesure d'intensite de rayonnement solaire ultraviolet direct et total.

45. Басок Б.І., Воробйов Л.Й., Гончарук С.М., Декуша Л.В., Чорна Н.О. Прилад для дослідження надходження сонячної енергії на похилий геліоколектор. 2013. С. 78-87. [Теплофізика та теплоенергетика \[Текст\] : науч.-прикл. журн. Т. 35. № 5 / ин-т технич. теплофиз. НАНУ. — К.: Наук. думка, 2013.](#)
46. Воробйов Л.Й., Декуша Л.В. Багатоканальні піранометри серії СР та методика їх калібрування. Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference «Recent Advances in Global Science» (May 6-8, 2024). Vilnius, Lithuania. No 199. ENERGETICS. С.423-427.
47. Прилад для вимірювання інсоляції будівель та споруд / Б. І. Басок, Л. В. Декуша, С. М. Гончарук, Н. О. Чорна // Будівельні конструкції : зб. наук. праць / Київ. держ. підприємство «Держ. наук.-досл. ін.-тут буд. конструкцій» ; гол. ред. П. І. Кривошеєв. Київ : ДНДІБК, 2013. Вип. 77. С. 55 – 59.
48. ДСТУ ISO 9846:2006 Энергия солнечная. Калибровка пиранометра с использованием пиргелиометра (ISO 9846:1993, IDT)
49. Wong L.T., Chow W.K. Solar radiation model. Applied Energy 69. 2001. P. 191–224.
50. Danny H.W Li, Joseph C Lam. Solar heat gain factors and the implications to building designs in subtropical regions, Energy and Buildings, V. 32, Issue 1, 2000, P. 47 – 55, ISSN 0378-7788, [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00035-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00035-3).
51. Sherry J.E., Justus C.G., A simple hourly all-sky solar radiation model based on meteorological parameters. Solar Energy. 1984. V. 32, Issue 2. P.51, 52, 195 – 204. ISSN 0038-092X, [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(84\)80036-5](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(84)80036-5).
52. Christian Gueymard. Critical analysis and performance assessment of clear sky solar irradiance models using theoretical and measured data, Solar Energy. 1993 V. 51, Issue 2. P. 121 – 138, ISSN 0038-092X, [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90074-X](https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90074-X).
53. Christian Gueymard. Mathematically integrable parameterization of clear-sky beam and global irradiances and its use in daily irradiation applications, Solar

- Energy. 1993. V. 50, Issue 5. P. 385 – 397, ISSN 0038-092X, [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90059-W](https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90059-W).
54. Clarke J A. Energy Simulation in Building Design 2nd Edition 2001, 362 p.
55. ASHRAE Handbook – Fundamental: ASHRAE 2009. CHAPTER 14. <https://www.mepengineerings.com/wp-content/uploads/2020/10/2009-ashrae-handbook.pdf>
56. Reda I. and Andreas A. National Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications. Technical Report. Revised January 2008.
57. ASHRAE Handbook – HVAC applications. Atlanta (GA): ASHRAE, 2001.
58. Kuo Wei Liang, Chen Wu. Numerical simulation and visualization for building envelope thermal distribution analysis. Proceedings of the 11th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality, 2011. P.31–39. https://www.db-thueringen.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbt_derivate_00026107/21.pdf
59. Gueymard Chris. Revising ASHRAE climatic data for design and standards – Part 2: Clear-sky solar radiation model. ASHRAE Transactions January 2013.
60. Noorian A. M., Morad I., Kamal G. A. Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces. Renewable Energy. 2008. V.33. P. 1406 –1412.
61. Duffie John A. Beckman William A. Solar Engineering of Thermal Processes. Fourth Edition. 2013. 910 p.
62. Волощук В. А. Використання теплоенергетичного потенціалу зовнішнього клімату для зменшення енергозатрат при опаленні будівель. Lviv Polytechnic National University Institutional Repository. Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. 2013. № 758. С. 97 – 105. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPT_2013_758_16
63. Szokolay S. V. Solar geometry. Second revised edition. 2007. <https://ru.scribd.com/document/665268551/SOLAR-GEOMETRY>
64. Spencer, J. W. Fourier Series Representation of the Position of the Sun. 1071. Search 2, № 5. P. 162 – 172.
65. Iqbal M. An Introduction to Solar Radiation. 1983. Toronto: Academic. 390 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373750-2.X5001-0>

66. Doost A. K., Akhlaghi M. Estimation and Comparison of Solar Radiation Intensity by Some Models in a Region of Iran. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2014. Is. 2. 345–351.
67. Myers Dary R. *Solar radiation Practical Modeling for Renewable Energy Applications*. 2013. 199 p.
68. Малярєнко В.А., Орлова Н.А. Аналіз критерію енергоефективності будівель і споруд. *Інтегровані технології та енергозбереження*, 2004. №2. С. 43–48.
69. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Моделювання режимів опалення приміщень. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2016. № 3. С. 97–104
70. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Математичні моделі будівель для оцінки енергоспоживання С. 68 – 72 (вторая папка, файл bouko_2014)
71. Енергоефективність будівель. Розрахунок енергоспоживання при опаленні та охолодженні [Текст]: ДСТУ Б EN ISO 13790:2011. На заміну ГОСТ 26629.85; чинний з 01.01.2013. К. : НДІБК, 2011. 229 с.
72. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Суходуб І.О. Моделювання сумісного впливу сонячної та теплової радіації на температуру внутрішніх поверхонь огорожень будівлі. *Вісник КНУТД. Серія «Технічні науки»*. 2015. Т. 90, №5. С. 24 – 31.
73. ДСТУ Б А.2.2-12:2015 Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні. Мінрегіон України. Київ, 2015. 140 с.
https://www.znu.edu.ua/pidrozdily/atest_energoef/zakonodavcha/dstuba_2_2-122015.pdf
74. Будівельна кліматологія. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Київ: Мінрегіонбуд України. 2021. 123 с.
75. Marnix Van Belleghem. *Modelling Coupled Heat and Moisture Transfer Between Air and Porous Materials for Building Applications*. Universiteity Gent. 2013. 232 p.
76. Marnix Van Belleghem, Hendrik-Jan Steeman, Marijke Steeman, Arnold Janssens, Michel De Paepe. Sensitivity analysis of CFD coupled non-isothermal heat and moisture modelling. *Building and Environment*. 2010, V.45, №11. P. 2485–2496.

77. Gendelis S., Jakovics A. Applications of 3D Mathematical Models for Improvement of Thermal Comfort Conditions in Living-Rooms. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2005. №. 3. P. 40–52.
78. Басок Б. І., Давиденко Б. В., Гончарук С. М., Новіцька М. П. Теплофізичне моделювання теплового режиму будівлі. Енергозбереження та промислова безпека: виклики та перспективи. Науково-технічний збірник. Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції (4–5 червня 2019 року, м. Київ). Київ: Основа. 2019. 352 с. ISBN 978-966-984-010-3 С. 9 – 19.
79. Gendelis S., Jakovics A. Mathematical modelling of a living room with solar radiation source and different boundary conditions. *Heat & Power and Thermal Physics*. 2008. №. 1. P. 73–83. <file:///C:/Users/Nata/Downloads/pub4843.pdf>
80. Дворкін Л.Й. Будівельне матеріалознавство. Навчально-довідковий посібник українською та англійською мовами. Рівне: НУВГП. 2017. 355 с. https://ep3.nuwm.edu.ua/7473/1/MATERIALS%20STRUCTURE_%D0%904_zah.pdf
81. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель. К.: Мінрегіон України, 2017. 31с.
82. Luikov, A.V. Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies. Pergamon Press, Oxford. 1966; P. 233 – 303. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-0065-1.50010-6>
83. ДСТУ Б В.2.6-189:2013 Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. К.: Мінрегіон України 2014. 51с.
84. ДСТУ Б А.1.1-48-94 Матеріали будівельні. Методи визначення теплофізичних властивостей. Терміни та визначення.
85. Basok B.I., Davydenko B.V., Pavlenko A.M. Numerical Network Modeling of Heat and Moisture Transfer through Capillary-Porous Building Materials. *Materials* 2021. V. 14. P. 1819 – 1840. <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/8/1819>
86. Сорокова Н.М. Математичне моделювання динаміки тепломасопереносу в процесах сорбції і сушіння в апаратах періодичної і безперервної дії. Дисертація на здобуття наук. ступеня доктора технічних наук. Київ, 2017.

87. Явоорський Б.М., Детлаф, А.А., Лебедєв А.К. Довідник з фізики для інженерів та студентів вищих навчальних закладів. Тернопіль: Навчальна книга – Богдан. 2016. 1040 с.
88. Nikitenko N.I., Snezhkin Yu.F., Sorokovaya N.N. Mathematical simulation of heat and mass transfer, phase conversions, and shrinkage for optimization of the process of drying of thermolabile materials. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2005. V. 78, № 1. P. 75 – 89.
89. Whitaker S. Simultaneous heat and momentum transfer in porous media: a theory of drying. Advavce in Heat Transfer. Academic Press, New York. 1977. P. 119–203.
90. Junfeng L.U., Wenqiang L.U. Review: Heat and mass transfer in porous medium, mathematic/numerical models and research directions. J. Int. J. Petrochem. Sci. Eng. 2018, 3, P. 97–100.
91. Wasik M., Cieslikiewicz Ł., Łapka P., Furmanski P., Kubis M., Serebinski M., Pietrak K., Wisniewski T.S., Jaworski M. Initial credibility analysis of a numerical model of heat and moisture transfer in porous building materials. AIP Conf. Proc. 2019. V. 2078, Is.1. P. 020106-1 – 020106-5. DOI: [10.1063/1.5092109](https://doi.org/10.1063/1.5092109)
92. Serebinski M., Wasik M., Łapka P., Furmanski P., Cieslikiewicz Ł., Pietrak K., Kubis M., Wisniewski T.S., Jaworski M. Investigation of the equilibrium and non-equilibrium models of heat and moisture transport in a wet porous building material. E3S Web. Conf. 2019. V.128. P. 06008-1 – 06008-7. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912806008>
93. Allam R., Issaadi N., Belarbi R., El-Meligy M., Altahrany A. Hygrothermal behavior for a clay brick wall. Heat Mass Transf. 2018. V. 54. P. 1579–1591.
94. Karima S., M'barek F., Nabila L., M'hand O., Youb K.B. Numerical Study of Heat and Mass Transfer during the Evaporative Drying of Porous Media. MATEC Web.Conf. 2020. V.307.P.01050-1–01050-6.DOI: 10.1051/matecconf/202030701050
95. Andreas G., Yiotis I.N., Tsimpanogiannis A.K., Stubos Y.C.Y. Pore-network study of the characteristic periods in the drying of porous materials. J. Colloid Interface Sci. 2006. V.297. P. 738–748.

96. Vorhauer N., Wang Y.J., Kharaghani A. et al. Drying with Formation of Capillary Rings in a Model Porous Medium. *Transp Porous Med.* 2015. V. 110. P. 197– 223. <https://doi.org/10.1007/s11242-015-0538-1>
97. Moghaddam Alireza Attari, Kharaghani Abdolreza, Tsotsas Evangelos and Prat Marc. Kinematics in a slowly drying porous medium: Reconciliation of pore network simulations and continuum modeling. 2017. *Physics of Fluids*. 2017. V. 29, № 2. P. 1 – 13. ISSN 1070-6631
98. Moghaddam A.A., Prat M., Tsotsas E., Kharaghani A. (2017). Evaporation in capillary porous media at the perfect piston-like invasion limit: Evidence of nonlocal equilibrium effects. *Water Resources Research*. V. 53, Issue 12. P. 10,433–10,449. <https://doi.org/10.1002/2017WR021162>
99. Кліматичні дані по Києву. Електронний ресурс: <http://cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/uk/diialnist/klimatolohichna/klimatychni-dani-po-kyievu>
100. Сонце і Земля. Електронний ресурс: <https://uahistory.co/pidruchniki/gilberg-natural-sciences-10-class-2018/47.php>
101. Давиденко Б.В., Декуша Л.В., Воробйов Л.Й., Кравченко В.П., Новіков В.Г., Гончарук С.М., Сороковий Р.Я. Експериментальні дослідження сонячної радіації на поверхнях різної орієнтації. «Проблеми теплофізики та теплоенергетики»: Х міжн. конф. Київ. 2017. Промислова теплотехніка. 2017. Т. 39, № 7. С. 57.
102. Басок Б.И., Давиденко Б.В., Новиков В.Г., Сороковой Р.Я. Моделирование солнечного излучения для использования в возобновляемой энергетике и в строительной теплофизике. *Пром. теплотехника*. 2018. Т.40. №1. С. 44–50.
103. ДСТУ – Н.Б.В.2.6-192:2013 Настанова з розрахункової оцінки тепловологісного стану огорожувальних конструкцій. Київ: Мінрегіон України 2014. 50 с.
104. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. 2022. 23 с.
105. Басок Б.И., Давиденко Б.В., Тимошенко А.В. Гончарук С.М. Температурно - вологісний стан стінової конструкції з шаром утеплювача в зимовий період

року. Промислова теплотехніка. 2016. Т. 38, № 6. С. 38-46.

106. ДБН В.2.6-31:2006. Конструкції будинків та споруд. Теплова ізоляція будівель. Зі зміною №1 від 1 липня 2013р. – К.: Укрархбудінформ, 2006. – 65с.

107. Brunower S. The Adsorption of Gases and Vapors. 2007. Vol. I - Physical Adsorption. English. 520 p.

108. Nikitenko N.I. (2002). Investigation of the evolution dynamics of condensed bodies on the basis of the law of the intensity of spectral particle emission, Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2002. V.75, №3. P. 128–134.

109. Kaneko K. Determination of pore size and pore size distribution 1. Adsorbents and catalysts. J.Membrane Sci. 1994. V. 96. P. 59 – 69.

110. Rudobashta S.P. Mass transfer in systems with a solid phase. 1980. M.: Chemistry. 248 p.

111. Keltsev, N.V. *Fundamentals of adsorption technology*. (2 th ed.). 1984. M.: Khimiya. 590 p.

112. Дерев'янюк В. М., Гришко Г. М., Кушнірєва Л. О. Мороз Л. В., Бегун А. І. Фактори шпаруватості керамічної цегли на основі техногенної сировини. Будівництво, матеріалознавство, машинобудування. 2016. С. 97–104. Ел. ресурс: <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/bitstream/123456789/3247/1/Derevianko.pdf>

113. Basok B., Davydenko B., Timoshchenko A., Novikov V., Sorokoviy R., Moroz M. Influence of Solar Radiation on the Temperature Regime of Buildings Walls. No Conference Proceedings of Scientific Papers, «CASSOTHERM 2018» Technical University of Kosice. 2018. P. 70-76.

114. Давиденко Б.В., Сороковий Р.Я. Вплив сонячного випромінювання на теплофізичний стан огорожуючих конструкцій будівель. Збірник тез доповідей XV міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання", Київ, НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. С. 84–85. http://ci.kpi.ua/METODA/15_teza_mizhnarodna.pdf

115. Нікітенко М.І., Сорокова Н.М., Кольчик Ю.М., Сороковий Р.Я. Алгоритм чисельного визначення ізотерми адсорбції на базі інтегральної функції розподілу пор по розмірах. 36. тез доп. Міжн. наук.-практ. конф.«Хімічна технологія та інженерія» Львів, Нац. університет «Львівська політехніка», 26–30 червня 2017 р., С. 62–63.
116. Сорокова Н.М., Кольчик Ю.М., Сороковий Р.Я. Метод визначення рівноважного вологовмісту будівельних матеріалів огорожувальних конструкцій. *Energy Efficiency in Civil Engineering and Architecture*. 2018. Issue 10. С. 62 – 67. ISSN 2310-0516.
117. Сороковий Р.Я., Сорокова Н.М., Кольчик Ю.М. Чисельний метод визначення ізотерми сорбції капілярно-пористих матеріалів. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2019. Т. 41, № 5. С. 38. ISSN 2663-7235.
118. Sorokovoi R, Sorokova N, Julia Kolchyk Ju. Numerical method of determination of sorbtion isotherm capillary-porous materials. XI Int. Conf. «Problems of thermophysics and heat engineering» May 21–22, 2019. http://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2019/05/22_abst..pdf
119. Basok B.I., Novikov V.G., Davydenko B.V. Belyaeva T.G. Novitskaya M.P. , Sorokovoi R. Y. Radiative-Convective Heat Exchange of a Building with the Environment on Exposure to Solar Radiation. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics* 2020. V. 93, Issue 1. P.45–53.
121. Енергоефективність процесів сушіння Тематичний збірник статей у двох томах. Київ: Видавництво «Тропеа», 2021. I том. 343 с.; С. 272–274. ISBN 978-617-7894-24-6 (загальний) ISBN 978-617-7894-25-3 (том 1). Ум. друк.арк. 24,7. <http://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2021/04/snezhkin-zbirnik-statej-2021.pdf>
122. Басок Б.І., Давиденко Б.В., Тимощенко А.В., Гончарук С.М. Температурний режим приміщення, що обігрівається двома двохпанельними радіаторами. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2018. № 4, С.20–26. ISSN 1813-5420.

123. Фіалко Н., Басок Б., Давиденко Б., Сороковий Р., Сорокова Н., Новіков В. Вплив сонячного випромінювання на температурний режим приміщення в зимовий період. Енергетичні технології та ресурсозбереження. 2024. Т.80, №3. С.135–145. DOI: 10.33070/etars.3.2024.09
124. Fialko N., Basok B., Davydenko B., Sorokovyi R., Sorokova N., Novikov V. Comparative analysis of temperature conditions of rooms in the presence and absence of solar radiation. Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». №9, Т.164, 2024. С.62–65. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2024-9-10390>
125. Fialko N., Basok B., Davydenko B., Sorokovyi R., Sorokova N., Novikov V. Mathematical modeling of air flow in rooms taking into account solar radiation. International scientific journal "Internauka". 2024. № 10. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2024-10-10412>
126. Fialko N., Basok B., Davydenko B., Sorokovyi R. Air-thermal conditions of the rooms in the winter period of the year in the presence and absence of solar radiation. 2nd International scientific and practical conference “Science and technology: challenges, prospects and innovations” (October 4-6, 2024) CPN Publishing Group, Osaka, Japan. P.65–70.

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача,

в яких представлені основні наукові результати дисертації:

Статті

1. Basok B.I., Novikov V.G., Davydenko B.V. Belyaeva T.G. Novitskaya M.P. Sorokovoi R.Y. Radiative-Convective Heat Exchange of a Building with the Environment on Exposure to Solar Radiation. Journal of Engineering Physics and Thermophysics 2020. V. 93. Issue 1. P.45–53. (Scopus, Web of Science)
2. Фіалко Н., Басок Б., Давиденко Б., Сороковий Р., Сорокова Н., Новіков В. Вплив сонячного випромінювання на температурний режим приміщення в зимовий період. Енергетичні технології та ресурсозбереження. 2024. Т.80, №3, С.135-145. DOI: 10.33070/etars.3.2024.09. (Scopus)
3. Басок Б.И., Давиденко Б.В., Новиков В.Г., Сороковой Р.Я. Моделирование солнечного излучения для использования в возобновляемой энергетике и в строительной теплофизике. Пром. теплотехника. 2018, Т.40. №1. С. 44–50.
4. Сорокова Н.М., Кольчик Ю.М., Сороковий Р.Я. Метод визначення рівноважного вологовмісту будівельних матеріалів огорожувальних конструкцій. Energy Efficiency in Civil Engineering and Architecture. 2018. Iss. № 10. С. 62 – 67. ISSN 2310-0516.
5. Тимощенко А.В., Беляева Т.Г., Стецюк В.Г., Мороз М.В., Сороковий Р.Я. Конвективна сушка теплоізоляційних базальто-бентонітових виробів. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2018. № 3 С. 103 –109. ISSN 1813-5420.
6. Basok B., Davydenko B., Timoshchenko A., Novikov V., Sorokoviy R., Moroz M. Influence of Solar Radiation on the Temperature Regime of Buildings Walls. No Conference Proceedings of Scientific Papers, «CASSOTHERM 2018» Technical University of Kosice. 2018. P. 70-76.
7. Fialko N., Basok B., Davydenko B., Sorokoviy R., Sorokova N., Novikov V. Comparative analysis of temperature conditions of rooms in the presence and absence of solar radiation. Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». № 9 (164), 2024. С.62-65. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2024-9-10390>
8. Fialko N., Basok B., Davydenko B., Sorokoviy R., Sorokova N., Novikov V. Mathematical modeling of air flow in rooms taking into account solar radiation. International scientific journal "Internauka". 2024. № 10. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2024-10-10412>

розділи колективних монографій

9. Sorokova N.N., Kolchik Yu.N., Sorokoviy R. Y. Mathematical modeling of sorption and desorption dynamics in adsorption systems Chemical Technology and Engineering: Monograph. (Atamanyuk V.M. et al., Eds.) Lviv: SPOLOM, 2021. 146 p. P.19-23. ISBN 978-966-919-760-3 <http://cte.org.ua/3rd-chemical-technology-engineering-2021/monograph>.

10. Енергоефективність процесів сушіння Тематичний збірник статей у двох томах. Київ: Видавництво «Тропеа», 2021. I том. 343 с.; С. 137-140; 272-274; 283-298. ISBN 978-617-7894-24-6 (загальний) ISBN 978-617-7894-25-3 (том 1). Ум. друк.арк. 24,7. <http://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2021/04/snezhkin-zbirnik-statej-2021.pdf>

які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

11. Чалаєв Д.М., Сороковий Р.Я. Аналіз ефективності холодильних установок за різними типами конденсаторів. Роб. прогр. та тези доп. I всеукр. наук.-практ. конф. мол. вчених, асп. і студ. «буд-майстер-клас-2015» 26-27 листопада 2015 р. в КНУБА.

12. Сорокова Н.М., Шапар Р.О., Безгін М.М., Сороковий Р.Я. Математичне моделювання тепломасопереносу і фазових перетворень при сушінні біомаси в умовах рівномірного омивання сушильним агентом. Збірник матеріалів IV Міжнародного конгресу «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», Львів. 2016. С. 77.

13. Давиденко Б.В., Декуша Л.В., Воробйов Л.Й., Кравченко В.П., Новіков В.Г., Гончарук С.М., Сороковий Р.Я. Експериментальні дослідження сонячної радіації на поверхнях різної орієнтації. «Проблеми теплофізики та теплоенергетики»: X міжн. конф. Київ, 2017. Промислова теплотехніка, 2017. Т. 39, № 7. С. 57.

14. Нікітенко М.І., Сорокова Н.М., Кольчик Ю.М., Сороковий Р.Я. Алгоритм чисельного визначення ізотерми адсорбції на базі інтегральної функції розподілу пор по розмірах. Зб. тез доп. Міжн. наук.-практ. конф. «Хімічна технологія та інженерія» Львів, Нац. університет «Львівська політехніка», 26–30 червня 2017 р., С. 62–63.

15. Давиденко Б.В., Сороковий Р.Я. Вплив сонячного випромінювання на тепловологісний стан огорожуючих конструкцій будівель. Збірник тез доповідей XV міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання", Київ, НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. С. 84–85. http://ci.kpi.ua/METODA/15_teza_mizhnarodna.pdf

16. Сороковий Р.Я., Сорокова Н.М., Кольчик Ю.М. Чисельний метод визначення ізотерми сорбції капілярно-пористих матеріалів. Теплофізика та теплоенергетика, 2019. Т. 41, № 5. С. 38. ISSN 2663-7235.
17. Sorokovoi R, Sorokova N, Kolchyk Ju. Numerical method of determination of sorbtion isotherm capillary-porous materials. XI Int. Conf. «Problems of thermophysics and heat engineering» May 21-22, 2019. http://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2019/05/22_abst..pdf
18. Сорокова Н.М., Корінчук Д.М., Сороковий Р.Я. Математичне моделювання динаміки сушіння і термодеструкції торфу. Тези доп. XVIII міжн. наук. конф. «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв». Одеса 12-16 жовтня 2020, ОНАХТ. С. 26-29: <https://card-file.onaft.edu.ua/handle/123456789/16075>.
19. Natalia Sorokova, Julia Kolchyk, Rodion Sorokovoi. Mathematical modeling of sorption and desorption dynamics in adsorption systems. 3rd International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering»: Proceedings. June 21–24th, 2021, Lviv, Ukraine. Lviv Polytechnic National University. P. 51-55. <http://cte.org.ua/3rd-chemical-technology-engineering-2021/proceedings>
20. Sorokova N.N., Kolchik Yu.N. Sorokoviy R. Y. Theoretical basis of continuous drying of dispersed materials. 4th Int. Sc. Conf. «Chemical Technology and Engineering»: Proceedings June 26–29th, 2023, Lviv. Lviv Polytechnic Nat. University, p. 41–44.
21. Fialko N., Basok B., Davydenko B., Sorokoviy R. Air-thermal conditions of the rooms in the winter period of the year in the presence and absence of solar radiation. 2nd International scientific and practical conference “Science and technology: challenges, prospects and innovations” (October 4-6, 2024) CPN Publishing Group, Osaka, Japan. P.65-70.

Статті, що додатково відображають наукові результати дисертації

22. Sorokova N.N., Snezhkin, Yu. F. Shapar R. A., Sorokoviy R. Mathematical Simulation and Optimization of the Continuous Drying of Thermolabile Materials. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2019, V.92, Issue 5, P.1180–1190. DOI 10.1007/s10891-019-02032-3. (Scopus, Web of Seience)
23. Сорокова Н.М., Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О., Сороковий Р.Я. Способ сушки термолабильных материалов в ленточной сушильной установке с применением теплового насоса. Наукові праці ОНАХТ, 2015. Вип. 47. Т.2. С. 91 – 97.

ДОДАТОК Б



Energizing Visions, Building Realities

<https://www.smartart.space/>

Приватне підприємство «Ірпін'ятеплосервіс»
м. Буча, вул. Тарасівська, 3а
ЄДРПОУ 34357537

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Директор ПП «Ірпін'ятеплосервіс»

С.О. Нігован
« 27 » серпень 2024 р.

АКТ

впровадження результатів кандидатської дисертації Сорокового Родіона Ярославовича «Теплофізичне обґрунтування впливу сонячного випромінювання на формування тепловологісного стану будівель»

Ми, які нижче підписалися, від підприємства ПП «Ірпін'ятеплосервіс»: головний інженер проекту, к.т.н., Погосов О.Г., провідний інженер-проектувальник Кваленко Н.О, від Інституту технічної теплофізики НАН України: зав. відділом Теплофізичних основ енергоощадних теплотехнологій, чл.-кор. НАН України, Басок Б.І., д.т.н., гол. н.с. відділу Теплофізичних основ енергоощадних теплотехнологій Давиденко Б.В., зав. відділом Теплофізики енергоефективних теплотехнологій, чл.-кор. НАН України Фіалко Н.М. склали дійсний акт про те, що в **робочому проєкті** «Капітальний ремонт будівлі спортивного залу Державного закладу професійної (професійно-технічної) освіти зі специфічними умовами навчання «Академія патрульної поліції» за адресою м. Київ, вул. Святослава Хороброго, 9»

- при розробці заходів з енергозбереження, а саме визначення товщини шару захисних покриттів огорожувальних конструкцій було використано результати математичного моделювання тепловологісного стану огорожуючих приміщень будівель, які отримано на базі математичної моделі, розробленої в дисертаційній роботі Сорокового Р.Я.;

- при проєктуванні на даху спортивного залу сонячної фотовольтаїчної станції, кут нахилу панелей, з пріоритетом роботи в зимовий період, уточнювався на основі отриманих в дисертаційній роботі Сорокового Р.Я. даних експериментальних досліджень по інтенсивності сонячного випромінювання на поверхні різної орієнтації.

Цей Акт не є підставою для фінансових розрахунків

Голова комісії:

Мироненко Е.О.

Члени комісії:

зав. відділом ТОЕТ, чл.- кор. НАН
України

Б.І. Басок

д.т.н., гол. н.с. відділу ТОЕТ

Б.В. Давиденко

зав. відділом ТЕТ, чл.- кор. НАН
України

Н.М. Фіалко

Головний інженер проєкту, к.т.н.



О.Г. Погосов

Провідний інженер-проектувальник

Н.О. Коваленко

Н.О. Коваленко

ДОДАТОК В

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор з наукової роботи та інноваційного розвитку Київського національного університету будівництва і архітектури

к.т.н., С. Н. С. Ковальчук О. Ю.

“25” вересня 2024 р.

АКТ

“23” вересня 2024 р.

Ми, які нижче підписалися, представники «Київського національного університету будівництва і архітектури», декан факультету Інженерних систем та екології, професор кафедри теплотехніки, д.т.н., професор, залужений діяч науки і техніки України, Приймак О.В., доцент кафедри теплотехніки, к.т.н., доцент Кольчик Ю.М., доцент кафедри теплотехніки, к.т.н., доцент Чепурна Н.В., асистент кафедри теплотехніки Кулінко Є.О. склали даний акт про те, що у навчальному процесі підготовки фахівців за спеціальностями (ОП) «Теплогазопостачання та вентиляція», ОП «Енергетичний менеджмент, енергоефективні муніципальні та промислові технології» використовуються результати кандидатської дисертації молодшого наукового співробітника Інституту технічної теплофізики НАН України Сорокового Родіона Ярославовича *«Теплофізичне обґрунтування впливу сонячного випромінювання на формування тепловологісного стану будівель»*.

Результати наукової роботи, а саме чисельне моделювання тепломасообміну через огорожувальні будівельні конструкції з урахуванням інтенсивності сонячного випромінювання та розрахунковий метод визначення ізотерм сорбції будівельних матеріалів використовуються у лекційних курсах та відображені у навчальних програмах з дисциплін: «Будівельна теплофізика»; «Чисельні методи розв'язку задач тепломасообміну».

Використання результатів дисертаційної роботи Сорокового Р.Я. сприяє вдосконаленню підготовки фахівців.

Голова комісії

Члени комісії:

Приймак О.В.

Кольчик Ю.М.

Чепурна Н.В.

Кулінко Є. О.