

## АНОТАЦІЯ

*Єрьомін А.В.* Енергоефективні системи опалення сумісні із сталою комплексною термомодернізацією будівлі. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (кандидата технічних наук) за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія (05.23.03 – Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання). – Київський Національний університет будівництва і архітектури, Київ, 2021.

Однією з основних енергетичних стратегій Європейського Союзу (ЄС) є зменшення загальної кількості споживання енергії за рахунок підвищення енергоефективності теплових технологій. Будівлі споживають приблизно 40% загальної кількості теплоти та їх частка у глобальних Європейських викидах CO<sub>2</sub> складає близько 36%. Європейська Комісія ввела у дію у 2002р. і оновила у 2010р. законодавчий документ “Енергетика. Директива про ефективність будівель” (EPBD), спрямований на підвищення енергоефективності нових будівель так і тих що експлуатуються давно. Термомодернізація існуючого будівельного фонду ЄС, який складає 75% загального передбачуваного, повинна удвічі зменшити енергоспоживання та викиди двоокису вуглецю.

Будівлі і споруди відносяться до основних фондів які володіють найбільшим терміном придатності до використання. Тому за час своєї експлуатації впродовж усього терміну, відповідно, спостерігається найбільший розрив між технічним станом і функціональними властивостями будівлі, наприклад п’ятдесяти річної давнини, і сучасним технологічно-інноваційним рівнем будівництва, обумовленим науково-технічним прогресом. Визначальними у сучасному масовому будівництві є технології пов’язані із їх енергетичною ефективністю, енергозбереженням, екологізацією, простотою і надійністю експлуатації та еко корисною утилізацією. Існуючий впродовж десятиліть, в основному, житловий

фонд постійно системно і комплексно потребує розробки і впровадження термомодернізаційних заходів з метою досягнення встановлених нормативних енергоощадних експлуатаційних показників, які стрімко підвищуються на користь енергоефективної еко безпечної життєдіяльності. Наприклад у розвинених країнах (Німеччина, Данія, Швейцарія) нормативний коефіцієнт термічного опору зовнішнього стінового огородження десять років тому складав  $4-5 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ , у даний час  $6-8 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ , та постійно зростає. Зменшуються нормативні питомі показники енергоспоживання ( $\text{кВт}/(\text{м}^2 \text{ рік})$ ) та в процесі експлуатації з роками погіршуються від старіння, у тому числі, теплофізичні властивості конструкційних будівельних матеріалів. Отже, незалежно від застосування новітніх енергозберігаючих рішень в інженерних системах забезпечення мікроклімату та ступеня використання відновлюваних джерел енергії, тепловий захист будівель постійно підвищується. Таким чином комплексної термомодернізації потребують не тільки будівлі 60-90 тих років забудови, а й будівлі значно молодшого віку, і правдоподібно, цей процес є сталим для однієї і тієї ж будівлі. В Україні заходи з термомодернізації регламентуються Настановою з виконання термомодернізації житлових будинків (ДСТУ-Н Б В.3.2-3:2014). Цей стандарт поширюється на термомодернізацію житлових будинків під час їх технічного переоснащення, реконструкції або капітального ремонту і регламентує виконання робіт з теплової ізоляції зовнішніх огороджувальних конструкцій будинків, заміни вікон, балконних та зовнішніх дверей, модернізації систем опалення, вентиляції, кондиціонування, охолодження, гарячого водопостачання, електропостачання та електроосвітлення. Найбільш енергоємними із інженерних систем життєзабезпечення є системи опалення, які використовують більше 50% теплової енергії від загальної, що споживають разом системи гарячого водопостачання, вентиляції і кондиціонування повітря. Крім цього у колишніх країнах із плановою соціалістичною економікою, де визначальними був кількісний показник економіки, у багатоповерхових будівлях 60-90 тих років забудови експлуатуються однотрубні системи опалення із великими гідравлічними втратами на прокачування теплоносія та неможливістю рівномірного гідравлічного

балансування конкретних опалювальних приладів, які через це, мають над низькою тепловою ефективністю. Отже метою дисертаційного дослідження було теоретичне і експериментальне обґрунтування удосконаленої енергоефективної системи опалення сумісної із сталюю комплексною термомодернізацією будівлі. На основі критичного аналізу літературних джерел і патентних досліджень, згідно до встановленої мети сформульовано завдання, які полягають у фізико-математичному моделюванні теплопровідності за граничних умов першого роду через багат шарову стінку зовнішнього огороження із внутрішніми вертикальними теплопроводами системи опалення та змінами інтенсивності теплової інерції, експериментальні дослідження теплопровідності та теплової інерції і верифікація експериментальних та теоретичних даних, а також розроблення методики інженерного розрахунку та техніко-економічного обґрунтування для впровадження енергоефективних систем опалення сумісних із сталюю комплексною термомодернізацією будівель. Об'єктом дослідження визначено енергоефективні системи опалення сумісні із сталюю комплексною термомодернізацією будівлі, а предметом - нестационарні процеси теплопровідності та теплової інерції за граничних умов першого роду через багат шарову стінку зовнішнього огороження із внутрішніми джерелами теплоти, утвореними вертикальними подавальним і зворотнім трубопроводами двотрубною системи опалення з теплоносієм. У роботі застосовано сучасні фізико-математичні та експериментальні методи теоретичних досліджень нестационарних процесів теплопровідності за граничних умов першого роду через багат шарову стінку зовнішнього огороження із внутрішніми джерелами теплоти, утвореними вертикальними подавальним і зворотнім трубопроводами з теплоносієм двотрубною системи опалення. Методи чисельного моделювання, експериментальних лабораторних та натурних досліджень на основі сучасних теорій постановки, виконання, математичної обробки і отримання достовірних даних результатів теплофізичного експерименту. Вірогідність отриманих результатів, їх аналіз, висновки та рекомендації зумовлені задовільною збіжністю результатів теоретичних та експериментальних досліджень. Наукова новизна

отриманих результатів полягає у теоретичному обґрунтуванні та експериментальному підтвердженні удосконаленої енергоефективної системи опалення сумісної із сталюю комплексною термомодернізацією будівлі на основі розробленої фізико-математичної моделі теплопровідності за граничних умов першого роду через конструкцію багат шарової різношарової стінки зовнішнього огороження із внутрішнім джерелом теплоти у вигляді вертикальних подавального і зворотного трубопроводів системи опалення із теплоносієм, водою, в середині них, теоретичного обґрунтування і експериментального підтвердження підвищення до 10 % теплової інерції запропонованої конструкції стінки зовнішнього огороження із збереженням відносно вищої і сталої температури у товщі конструкції при періодичних різких змінах зовнішніх теплових впливів, особливо при мінімальних температурах навколишнього середовища, або інтенсивності сонячного випромінювання. Удосконалено методику експериментальних досліджень теплопровідності за граничних умов першого роду через запропоновану конструкцію багат шарової різношарової стінки зовнішнього огороження та набули подальшого розвитку наукове обґрунтування сталої комплексної термомодернізації будівель на основі енергоефективних систем опалення сумісних із сталюю зміною конструкції стіни зовнішнього огороження з підвищенням теплової інерції будівлі та енергетичної, екологічної і експлуатаційної ефективності джерела теплоти і системи опалення в цілому.

У **вступі** дисертації обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, завдання, предмет і об'єкт дослідження. Зазначені положення, що визначають наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, вказаний особистий внесок здобувача і надано інформацію про апробацію результатів дослідження.

У **першому** розділі проаналізовано літературні джерела і виконано патентні дослідження енергоефективних систем опалення сумісних із сталюю комплексною термомодернізацією будівель серій типової забудови 60-90 тих років. Розглянуто структуру енергозбереження у контексті інфраструктури міст, керуючих і керованих факторів в цілому та термомодернізації будівель зокрема. Встановлено, що основними керованими факторами, які суттєво впливають на ефективність

термомодернізації є утеплення елементів огороження будівлі та реконструкція інженерних систем життєзабезпечення, з яких найбільш енергоємними та такими, що становлять критичні технічні та соціальні ризики є системи опалення. Проаналізовано фізико-математичне моделювання тепломасообміну через зовнішні огороження будівель. Встановлено, що визначальним на ефективність теплового захисту будівлі є вплив теплопровідності через конструкцію багат шарової огорожувальної стінки, яка не суттєво може змінюватись від сумісних явищ повітропроникнення і паропроникнення та перевіряється на критичність їх впливу. При цьому, в кожному окремому випадку необхідно проводити теплофізичний аналіз теплопровідності та масообміну на основі величини та напрямів градієнта температури, і градієнта концентрацій в залежності від величини густини теплового потоку та баро-, термо- і молярних дифузії. Для нестационарних процесів теплопровідності через зовнішнє огороження під дією зовнішніх впливів, які динамічно змінюються (різке зниження температури або зміна інтенсивності сонячного випромінювання) суттєвого значення набуває явище теплової інерції будівельної конструкції зовнішнього огороження (акумуляційна здатність), величина якої безпосередньо впливає на енергетичну ефективність роботи джерела теплоти (котлоагрегат, тепловий насос, тепловий пункт) через різке прискорене збільшення або зменшення виробництва теплоти і подачу її у систему опалення. Встановлено також, що реальні значення теплофізичних параметрів (теплопровідність, теплоємність, густина) конструкції стінового огороження будівель забудови 60-90 тих років не можливо встановити без інструментальних їх вимірювань часто через не відповідність проектній документації та зміні властивостей з часом. Проаналізовано методи і методики на яких ґрунтуються експериментальні дослідження теплофізичних характеристик шарів структури конструкції зовнішнього огороження. Встановлено вплив кількості і якості вимірювань теплофізичних величин на реальні значення теплопровідності і теплової інерції. Проаналізовано модернізацію інженерних систем життєзабезпечення будівель. Системи опалення є найбільш енергоємними та такими, що становлять критичні

технічні та соціальні ризики для жителів та операторів з надання послуг і суттєве підвищення енергетичної ефективності можливе за рахунок використання двотрубних систем опалення з гідравлічним балансуванням окремих віток і стояків та безпосередньо перед опалювальним приладом.

У **другому** розділі проведено теоретичні дослідження теплопровідності через конструкцію багатошарової різномірної стінки зовнішнього огороження із суміщеними вертикальними теплопроводами всередині її. Обґрунтовано конструкції прокладання вертикальних подавального і зворотного трубопроводів системи опалення у товщі конструкції стіни, що утепляється, в штробах різної геометричної форми та у товщі із зовнішньої поверхні стіни або внутрішньої поверхні теплової ізоляції і які сумісні із комплексною термомодернізацією будівлі. Розроблено фізико-математичну модель теплопровідності за граничних умов першого роду через багатошарову різномірну стінку зовнішнього огороження із внутрішнім джерелом теплоти у вигляді вертикальних падаючого і зворотного трубопроводів системи опалення на основі системи диференціальних і алгебраїчних рівнянь теплопровідності. Коректно задано початкові і граничні умови та розв'язано чисельним методом поздовжньо-поперечної прогонки багатовимірну задачу теплопровідності. Алгоритм розв'язання було реалізовано в обчислювальному комплексі ANSYS. Встановлено, що табличні значення коефіцієнтів теплопровідності стінових конструкційних будівельних матеріалів можуть відрізнятись більше ніж у два рази від фактичних значень через неоднозначність, неоднорідність та старіння відповідного матеріалу і потребують їх експериментально-лабораторного дослідження для ефективної термомодернізації.

У **третьому** розділі виконано комплекс експериментальних досліджень теплопровідності через конструкцію стіни зовнішнього огороження старої будівлі з метою визначення фактичних значень коефіцієнтів теплопровідності шарів та їх верифікації із теоретичними табличними значеннями. Розроблено методику експериментального дослідження на основі повного факторного експерименту із зміною факторів – температури та товщини шару конструкції.

Підібрано і використано засоби вимірювань температури і густини теплового потоку з однаковими класами точності та виконано статистичний аналіз отриманих експериментальних даних. Досліджено вплив додаткового облаштування в товщі стіни вертикальних падаючого та зворотного трубопроводів системи опалення з теплоносієм водою на підвищення теплової інерції конструкції. Отримано поправкові коефіцієнти для визначення фактичних значень коефіцієнтів теплопровідності матеріалів конструкції стіни, та на їх основі проведено верифікацію теоретичних та експериментальних даних. Встановлено що підвищення теплової інерції запропонованої конструкції зовнішнього стінового огороження до 10% сприяє підвищенню енергетичної ефективності джерела теплоти на 5-7 % за рахунок згладжування піків теплового навантаження і відповідно прискорень-сповільнень (ривків) роботи пальника теплогенератора або іншого джерела теплоти.

У **четвертому** розділі розроблено методику інженерного розрахунку та виконано техніко-економічний аналіз системи опалення з вертикальними теплопроводами з теплоносієм водою у товщині стіни зовнішнього огороження термомодернізованої будівлі. Виконано техніко-економічне обґрунтування від впровадження енергоефективних систем опалення сумісних із сталюю комплексною термомодернізацією будівлі з річним економічним ефектом 250 грн. на один м<sup>2</sup> зовнішнього стінового огороження будівель забудови 60-90 тих років (за цінами 2020р.).

У дисертаційному дослідженні теоретично і експериментально обґрунтовано удосконалення енергоефективної системи опалення на основі розташування подавального і зворотного вертикальних трубопроводів системи опалення з теплоносієм - водою у товщині стінової конструкції зовнішнього огороження між зовнішньою поверхнею стіни і внутрішньою – утеплювача та сумісною із сталюю комплексною термомодернізацією будівлі.

**Ключові слова:** термомодернізація, тепла ізоляція, теплопровідність, система опалення, гідравлічний режим, тепла потужність, тепла інерція, енергоефективність.

## **SUMMARY**

*Eremin A.V.* Energy efficient heating systems are compatible with sustainable integrated thermal modernization of the building. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy (candidate of technical sciences) on a specialty 192 - Construction and civil engineering (05.23.03 - Ventilation, lighting and heat and gas supply). - Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 2021.

One of the main energy strategies of the European Union (EU) is to reduce the total amount of energy consumption by increasing the energy efficiency of thermal technologies. Buildings consume about 40% of the total heat and their share in global European CO<sub>2</sub> emissions is about 36%. The European Commission entered into force in 2002 and updated in 2010 legislative document “Energy. Building Efficiency Directive” (EPBD), aimed at improving the energy efficiency of new and long-standing buildings. Thermal modernization of the existing EU building stock, which accounts for 75% of the total projected, should halve energy consumption and carbon dioxide emissions.

Buildings and structures are among the fixed assets that have the longest shelf life. Therefore, during its operation throughout the term, respectively, there is the largest gap between the technical condition and functional properties of the building, such as fifty years ago, and the current technological and innovative level of construction, due to scientific and technological progress. Technologies related to their energy efficiency, energy saving, greening, simplicity and reliability of operation and eco-friendly utilization are decisive in modern mass construction. Existing for decades, mainly the housing stock is constantly systematically and comprehensively in need of development



and implementation of thermal modernization measures in order to achieve the established normative energy-saving performance, which is rapidly increasing in favor of energy-efficient environmentally friendly life. For example, in developed countries (Germany, Denmark, Switzerland) the normative coefficient of thermal resistance of the external wall fence ten years ago was  $4\text{-}5 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ , currently  $6\text{-}8 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ , and is constantly growing. Normative specific indicators of energy consumption ( $\text{kW} / (\text{m}^2 \text{ year})$ ) decrease and in the course of operation over the years deteriorate from aging, including thermos physical properties of structural building materials. Therefore, regardless of the application of the latest energy-saving solutions in engineering systems to ensure the microclimate and the degree of use of renewable energy sources, thermal protection of buildings is constantly increasing. Thus, not only buildings of the 60s and 90s of that year need complex thermal modernization, but also buildings of a much younger age, and it is probable that this process is sustainable for the same building. In Ukraine, thermal modernization measures are regulated by the Guidelines for thermal modernization of residential buildings (DSTU-N B B.3.2-3: 2014). This standard applies to thermal modernization of residential buildings during their technical re-equipment, reconstruction or overhaul and regulates the performance of work on thermal insulation of external enclosing structures of buildings, replacement of windows, balcony and exterior doors, modernization of heating, ventilation, air conditioning, cooling, heating power supply and electric lighting. The most energy-intensive of the life support engineering systems are heating systems that use more than 50% of the total thermal energy, consuming together hot water supply, ventilation and air conditioning systems. In addition, in the former countries with planned socialist economies, where the quantitative indicator of the economy was decisive, in multi-story buildings of the 60-90s of that building single-pipe heating systems with high hydraulic losses for pumping coolant and the impossibility of uniform hydraulic balancing of specific heaters. have over low thermal efficiency. Thus, the aim of the dissertation research was the theoretical and experimental substantiation of the improved energy efficient heating system compatible with the sustainable complex thermal modernization of the building. Based on a critical analysis of literature sources and patent research, according to the goal

formulated tasks, which are physical and mathematical modeling of thermal conductivity under boundary conditions of the first kind through a multilayer wall of the outer enclosure with internal vertical heating pipes and changes in thermal inertia intensity. Thermal inertia and verification of experimental and theoretical data, as well as the development of methods of engineering calculation and feasibility study for the introduction of energy-efficient heating systems compatible with sustainable integrated thermal modernization of buildings. The object of study is energy efficient heating systems compatible with sustainable integrated thermal modernization of the building, and the subject - non-stationary processes of thermal conductivity and thermal inertia under boundary conditions of the first kind through a multilayer wall of external enclosure with internal heat sources formed by vertical supply and return. Modern physical-mathematical and experimental methods of theoretical researches of nonstationary processes of thermal conductivity under boundary conditions of the first kind through a multilayer wall of an external protection with the internal heat sources formed by vertical supply and return pipelines with the heat carrier of two-pipe heating system are applied. Methods of numerical modeling, experimental laboratory and field research on the basis of modern theories of formulation, execution, mathematical processing and obtaining reliable data on the results of thermos physical experiment. The probability of the obtained results, their analysis, conclusions and recommendations are due to the satisfactory convergence of the results of theoretical and experimental studies. The scientific novelty of the obtained results lies in the theoretical substantiation and experimental confirmation of the improved energy efficient heating system compatible with sustainable complex thermal modernization of the building on the basis of the developed physical and mathematical model of thermal conductivity under boundary conditions of the first kind. Of return pipes of heating system with coolant, water, in the middle of them, theoretical substantiation and experimental confirmation of increase to 10% of thermal inertia of the offered design of a wall of an external protection with preservation of rather higher and constant temperature in a design thickness at periodic sharp changes of external thermal influences, especially at the minimum ambient temperatures, or the intensity of solar radiation. The method of experimental studies of

thermal conductivity under boundary conditions of the first kind has been improved due to the proposed design of a multilayer heterogeneous wall of external enclosure and further substantiation of scientific substantiation of sustainable complex thermal modernization of buildings on the basis of energy efficient heating systems. And operational efficiency of the heat source and the heating system as a whole.

In the **introduction** of the dissertation the relevance of the topic is substantiated, the purpose, tasks, subject and object of research are formulated. The specified provisions defining scientific novelty and practical value of the received results, the personal contribution of the applicant are specified and the information on approbation of results of research is provided.

In the **first** section the literature sources are analyzed and patent researches of energy-efficient heating systems compatible with the constant complex thermal modernization of buildings of series of typical construction of 60-90 years are executed. The structure of energy saving in the context of urban infrastructure, control and management factors in general and thermal modernization of buildings in particular is considered. It is established that the main controlled factors that significantly affect the efficiency of thermal modernization are insulation of building enclosures and reconstruction of life support engineering systems, of which the most energy-intensive and critical technical and social risks are heating systems. Physical and mathematical modeling of heat and mass transfer through external enclosures of buildings is analyzed. It is established that the influence of thermal conductivity through the construction of a multilayer enclosing wall, which cannot change significantly from the combined phenomena of air penetration and vapor permeation and is checked for criticality of their influence, is decisive for the effectiveness of thermal protection of the building. In this case, in each case it is necessary to conduct thermos physical analysis of thermal conductivity and mass transfer based on the magnitude and directions of the temperature gradient and concentration gradient depending on the magnitude of heat flux density and bar-, thermo- and molar diffusion. For non-stationary processes of thermal conductivity through the outer enclosure under the influence of external influences that change dynamically (sharp decrease in temperature or change in the intensity of solar radiation) the phenomenon of

thermal inertia of the building structure of the outer enclosure (accumulation capacity) is significant. (boiler, heat pump, heat point) due to a sharp accelerated increase or decrease in heat production and its supply to the heating system. It is also established that the real values of thermos physical parameters (thermal conductivity, heat capacity, density) of the wall enclosure of buildings of 60-90 years cannot be established without their instrumental measurements often due to non-compliance with design documentation and changes in properties over time. Methods and techniques on which experimental researches of thermos physical characteristics of layers of structure of a design of an external protection are based are analyzed. The influence of quantity and quality of measurements of thermos physical quantities on real values of thermal conductivity and thermal inertia is established. The modernization of engineering life support systems of buildings is analyzed. Heating systems are the most energy-intensive and pose critical technical and social risks to residents and service providers, and a significant increase in energy efficiency is possible through the use of two-pipe heating systems with hydraulic balancing of individual branches and risers and directly in front of the heater.

In the **second** section, theoretical studies of thermal conductivity through the construction of a multilayer heterogeneous wall of the outer enclosure with combined vertical heat pipes inside it. The constructions of laying vertical supply and return pipelines of the heating system in the thickness of the insulated wall structure, in gates of different geometric shape and in the thickness from the outside of the wall surface or inner surface of thermal insulation and which are compatible with complex thermal modernization of the building. A physical and mathematical model of thermal conductivity under boundary conditions of the first kind through a multilayer heterogeneous wall of an external enclosure with an internal heat source in the form of vertical incident and return pipelines of a heating system based on a system of differential and algebraic equations of thermal conductivity. The initial and boundary conditions are set correctly and the multidimensional thermal conductivity problem is solved by the numerical method of longitudinal-transverse distillation. The solution algorithm was implemented in the ANSYS computing system. It is established that the tabular values of thermal conductivity of wall structural building materials may differ more than twice

from the actual values due to ambiguity, heterogeneity and aging of the material and require their experimental and laboratory studies for effective thermal modernization.

In the **third** section a set of experimental studies of thermal conductivity through the construction of the wall of the outer enclosure of the old building in order to determine the actual values of the thermal conductivity of the layers and their verification with theoretical tabular values. The technique of experimental research on the basis of full factorial experiment with change of factors - temperature and thickness of a design layer is developed. Means for measuring the temperature and heat flux density with the same accuracy classes were selected and statistical analysis of the obtained experimental data was performed. The influence of additional arrangement in the wall thickness of vertical falling and return pipelines of the heating system with the heat carrier water on the increase of thermal inertia of the structure is investigated. Correction coefficients were obtained to determine the actual values of the thermal conductivity coefficients of the wall construction materials, and on their basis the verification of theoretical and experimental data was carried out. It is established that increasing the thermal inertia of the proposed design of the external wall enclosure to 10% increases the energy efficiency of the heat source by 5-7% by smoothing the peaks of heat load and, accordingly, accelerations (jerks) of the burner or other heat source.

In the **fourth** section the technique of engineering calculation is developed and the technical and economic analysis of the heating system with vertical heat pipelines with the heat carrier water in a wall thickness of an external protection of the thermal modernized building is executed. Feasibility study for the introduction of energy-efficient heating systems compatible with sustainable integrated thermal modernization of the building with an annual economic effect of UAH 250 has been performed. per one m<sup>2</sup> of external wall fencing of buildings built in the 60-90s of those years (at 2020 prices).

The dissertation research theoretically and experimentally substantiates the improvement of energy efficient heating system based on the location of supply and return vertical pipes of the heating system with coolant - water in the thickness of the wall structure of the outer enclosure between the outer surface of the wall and the inner

- insulation and compatible with sustainable integrated thermal modernization of the building.

**Key words:** thermal modernization, thermal insulation, thermal conductivity, heating system, hydraulic regime, thermal power, thermal inertia, energy efficiency.