

АНОТАЦІЯ

Очеретянко М. Д. Енергоефективне опалення приміщень комбінованим застосуванням електричних інфрачервоних випромінювачів та водяних опалювальних приладів. - 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.

Дисертаційне дослідження, яке направлене на підвищення енергетичної та екологічної ефективності систем опалення приміщень різного призначення є актуальним через високі затрати виробництва енергії для їх потреб в енергетичному балансі України (до 40%) і відповідно, високі викиди парникових газів та інших забруднювачів доквілля при спалюванні органічних палив. Актуальність роботи підтверджується її виконанням в рамках наукових досліджень кафедри теплотехніки та Київського національного університету будівництва і архітектури. Метою дисертаційної роботи є наукове обґрунтування енергоощадних технологій при формуванні комфортного тепловологісного режиму приміщень різного призначення із застосуванням комбінованої системи опалення на основі електричних інфрачервоних випромінювачів та водяних опалювальними приладів. Відповідно до поставленої мети виконано такі завдання: проаналізовано літературні джерела та виконано патентні дослідження радіаційно-конвективних систем опалення в приміщеннях різного призначення та визначено напрямки їх вдосконалення; розроблено фізико-математичну модель, що описує тепловологісні процеси в середині приміщення, яке опалюється за допомогою електричних інфрачервоних випромінювачів і водяних опалювальних приладів; проведено експериментальні дослідження роботи електричних інфрачервоних випромінювачів та водяних опалювальних приладів з визначенням їх впливу на зональні тепловологісні параметри повітря та внутрішні огороження залежно від

вмісту водяної пари в повітрі з розробленням нової конструкції електричного інфрачервоного випромінювача; розроблено методику інженерного розрахунку радіаційно-конвективної системи опалення на основі отриманих теоретичних та експериментальних даних та проведено техніко-економічне обґрунтування доцільності застосування радіаційно-конвективної системи опалення. Об'єктом дослідження визначено радіаційно-конвективні системи опалення приміщень різного призначення а предметом – тепловологісні процеси в них. В роботі застосовувалися сучасні методи технічної термодинаміки і тепломасообміну, фізико-математичного моделювання тепломасообмінних процесів та експериментальні дослідження системи “опалювальні прилади - вологе повітря - поверхні огорожень”, техніко-економічного та інженерно-технологічного аналізів.

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

У **першому** розділі виконано аналіз науково-технічних робіт і патентних досліджень, що присвячені формуванню комфортного тепловологісного режиму приміщень, які опалюються за рахунок радіаційно-конвективних систем опалення. На основі аналізу приведено класифікацію систем опалення та узагальнено відповідні науково-дослідні проблеми, що потребують розв'язання та є областю дослідження даної роботи. Встановлено, що метою сучасного проектування водяних та електричних систем опалення є облаштування в приміщенні опалювальних приладів, що будуть компенсувати теплові втрати розраховані за нормативною методикою. Даний підхід не є раціональним для приміщень зі складними архітектурними формами та геометричними розмірами, оскільки не забезпечує комфортні тепловологістні параметри у всьому об'ємі приміщення. З іншого боку проблемою є значна витрата енергоресурсів на підтримування постійних параметрів внутрішнього повітря на заданому рівні, або відсутність можливості зонального опалення приміщення. Крім того, зазвичай

системи опалення проектуються з одним видом енергоносія - водяні, електричні, парові, тощо, що не дозволяє забезпечити надійність роботи такої системи. Для вирішення вище зазначених науково-технічних завдань пропонується використання комбінованої системи опалення, що складається з постійно діючої фонові водянної системи опалення та періодично працюючої догрівуючої електричної системи опалення. При цьому передбачається, що водяні опалювальні прилади будуть нерегульовані і працюватимуть з постійним гідравлічним режимом підтримуючи певну базову температуру повітря в приміщенні, а електричні опалювальні прилади будуть регульованими за допомогою датчиків і локально, зонально, створюватимуть комфортні тепловологісні параметри, в основному, шляхом підвищенням радіаційної складової тепловіддачі у визначеній області (зоні). Зазначений напрям створення енергоефективних систем опалення дозволяє комбінувати електричні інфрачервоні випромінювачі з водяними системами опалення, що використовують в якості джерела теплової енергії теплоту з теплового пункту централізованої системи теплопостачання, індивідуальної котельні або теплонасосної установку (ТНУ). Використання останньої дозволяє підвищити ексергетичний коефіцієнт корисної дії (ККД) комбінованої системи опалення, оскільки на відміну від інших джерел теплоти для водянної системи опалення, зниження внутрішньої температури повітря в приміщенні не потребує зменшення температурного потенціалу теплової енергії, що виробляється за допомогою ТНУ. Крім того слід зазначити, що електричні інфрачервоні випромінювачі які використовуються в даній системі опалення мають максимальну довжину хвиль випромінювання $\lambda_{\max} > 8,0$ мкм. Ці довжини хвиль є найбільш близькими до хвиль які випромінює поверхня тіла людини, та до довжин хвиль які ми сприймаємо від сонця і відносяться до діапазону сонячних інфрачервоних (ІЧ-С), відповідно із класифікацією міжнародної комісії з освітленості. На основі останніх медико-біологічних досліджень спектральних властивостей людської шкіри встановлено, що в діапазонах ІЧ-А та ІЧ-В спостерігається нижча поглинальна здатність, а також значна частка випромінювання цих ділянок спектру пропускається та

відбивається в порівнянні з діапазоном ІЧ-С, що робить їх менш ефективними для передачі теплової енергії безпосередньо до людини. Отже, можна стверджувати, що надходження теплового випромінювання від електричних інфрачервоних випромінювачів не є шкідливим, а є ефективним способом підведення теплоти до людини і може бути корисним, компенсуючи денну потребу в інфрачервоному випромінюванні. Проаналізовано сучасні дослідження комбінованих радіаційно-конвективних систем опалення на базі енергетичного та ексергетичного методів технічної термодинаміки. Проведений аналіз показав, що в наукових роботах достатньо ґрунтовно досліджена енергетична ефективність систем опалення з одним джерелом теплоти, натомість енергетична ефективність комбінованих систем опалення потребує більш детального вивчення. Зокрема дуже мало робіт присвячено вивченню енергетичної ефективності комбінованих систем опалення, в яких в якості джерела теплоти для водяної частини системи опалення використовується ТНУ, а для електричної частини системи опалення – інфрачервоні нагрівачі. На основі проведеного аналізу літературних джерел було сформульовано мету і завдання дослідження.

У **другому** розділі показані перспективні шляхи створення комбінованих систем на основі проведеного енергетичного та ексергетичного порівняльних аналізів ефективності систем опалення з різними джерелами теплоти та енергопостачання. Проведено аналіз ТНУ за допомогою методу циклів, що дозволив оцінити вплив окремих необоротних процесів на коефіцієнт перетворення теплоти (COP) дійсного циклу теплового насосу, на основі якого було показано значний вплив температурного градієнту між гріючим теплоносієм та повітрям в опалюваному приміщенні на ефективність роботи дійсного циклу ТНУ. В основному даний температурний градієнт знижує ефективність роботи ТНУ за рахунок розширення температурного діапазону на якому побудований цикл Карно та через властивості холодильного агента в ТН. Проведено порівняння впливів різних холодильних агентів (R717, R12, R22, R134a) на ефективність циклу. Отримано рівняння для розрахунку ефективності реального циклу ТНУ на основі відомого COP базового парокомпресійного циклу Карно та

ізоентропного ККД компресора, а також рівняння для оцінки економії палива при використанні ТНУ в порівнянні з котельнею. Для оцінки ефективності роботи комбінованої системи опалення був виконаний термодинамічний аналіз на базі енергетичних та ексергетичних балансових рівнянь для водяних та електричних систем окремо. Встановлено, що за умов зниження температури повітря в опалюваному приміщенні водяною системою з теплопостачанням від котельні або електричною системою опалення знижується ексергетичний ККД відповідних систем. Також встановлено, що темп зниження ексергетичного ККД внаслідок зниження температури повітря в приміщенні для електричної системи опалення приблизно в два рази менший у порівнянні з водяною системою опалення з теплопостачанням від котельні, що в основному обумовлено низьким її енергетичним ККД. Отримано співвідношення для розрахунку енергетичного та ексергетичного ККД комбінованої системи опалення, з яких випливає, що використання електроопалювальних приладів знижує енергетичні показники комбінованої системи. Отже необхідно максимально зменшити час їх використання, що пропонується зробити за допомогою застосування нестационарного зонального обігріву в межах кожного приміщення.

Проведено аналіз математичної моделі тепловологісного режиму приміщення при радіаційно-конвективному опаленні та отримано аналітичний розв'язок диференційних рівнянь, що описують тепломасообмінні процеси в системі “опалювальні прилади - вологе повітря - поверхні огорожень”, та визначено завдання для експериментального дослідження.

У **третьому** розділі виконано повний комплекс експериментальних досліджень формування динамічного тепло вологісного режиму приміщення, що опалюється за допомогою електричних інфрачервоних випромінювачів та водяних опалювальних приладів. Досліджено вплив вологовмісту повітря на опромінення поверхонь внутрішніх огорожень приміщення і їх відповідний вплив на параметри теплового комфорту. Для верифікації отриманих теоретичних залежностей були проведені експериментальні дослідження, що включали опромінення 23 датчиків на поверхні стіни за відстаней електричного

інфрачервоного випромінювача від поверхні стіни на 1,75м та 1,25м та вологовмістів повітря 5, 7,5 та 10 г пари на один кг сухого повітря, що проводилися у трьох серіях. Експериментальні дані показали задовільну збіжність с теоретичними. Для розуміння меж областей на поверхні стіни, що нагрівались випромінювачем була написана підпрограма для Scilab, що візуалізує температурні поля на поверхні стіни. Було проведено фізичне моделювання руху повітря в досліджуваній кімнаті з використанням k-ε моделі при цьому в якості граничних умов 3-го роду для внутрішніх огорожень було використано температури, що були раніше отримані експериментальним шляхом при опроміненні стіни. Результати моделювання представлено у вигляді градієнтних полів, що показують розподіл температури, швидкості та відносної вологості повітря, а також індекси рівня комфорту PMV/PPD, що відображають комплексне дослідження комфортних тепловологісних параметрів на робочому місці. Результати вимірювання є об'єктивним твердженням про рівень теплового комфорту, а індекс PMV - прогнозований середній рівень комфорту на відстані 1м від опромінюваної стіни. Аналіз градієнтних полів підтвердив, що області які знаходилися навпроти ввімкненого електричного інфрачервоного випромінювача мали суттєво кращий рівень комфорту в порівнянні з відповідними областями за умов відсутності випромінювача. Розроблені рекомендації щодо оптимізації конструкції електричних інфрачервоних випромінювачів для більш ефективної їх роботи в комбінованих радіаційно-конвективних системах опалення. Для аналізу роботи електричного інфрачервоного випромінювача в нестационарних режимах були отриманні співвідношення для розрахунку температури поверхні випромінювача та опромінюваної стіни, що враховували вміст трьохатомних газів (H₂O, CO₂) в повітрі та відстань нагрівального приладу від опромінюваної поверхні. За результатами проведених досліджень електричного інфрачервоного випромінювача Элтон ИП-700МК було запропоновано конструктивні зміни, направлені на підвищення його енергетичної ефективності в складі комбінованої системи опалення.

У четвертому розділі розроблено методику інженерного розрахунку комбінованої радіаційно-конвективної системи опалення, що дозволяє раціонально підібрати теплові потужності опалювальних приладів та визначити раціональне місце їх розташування. Розроблено методику розрахунку комбінованої системи опалення з використанням водяного опалювального приладу та електричного інфрачервоного випромінювача, що розрахована на новозбудовані приміщення, але за певних умов може буде застосована в проектах реконструкцій приміщень різного призначення. Розрахунок за даною методикою дозволяє забезпечити оптимальні параметри тепловологісного режиму в приміщенні при використанні комбінованої системи опалення, що складається з водяного опалювального приладу та електричного інфрачервоного випромінювача. Досягнути енергозбереження за рахунок зниження температури повітря і відповідно теплових втрат опалюваного приміщення з підвищенням надійності роботи системи опалення за рахунок застосування опалювальних приладів, що мають живлення від різних джерел енергії. Досягається підвищення екологічної ефективності системи за рахунок використання електроенергії, що вироблена на основі відновлюваних джерел енергії та економічної - за рахунок використання електроенергії за зниженою вартістю нічного тарифу.

У п'ятому розділі проведеного аналіз отриманих техніко-економічних показників ефективності комбінованих водяних та електричних систем опалення, що використовують інфрачервоні випромінювачі. В результаті проведеного аналізу виявлено, що найбільш дешево теплопостачання за умови централізації теплових мереж, а найбільш ефективна комбінація водяної та електричної системи опалення коли водяна використовується як чергова система опалення, а електрична як зональна або пікова. При цьому комбінована системи опалення з джерелом теплопостачання від теплового насосу та електричними системами опалення підвищує їх економічну ефективність до 6%, а комбінована система з джерелом теплоти - твердопаливним котлом економічно не доцільна.

Ключові слова: комфортний тепловологісний тепловий режим, радіаційно-конвективна система опалення, інфрачервоний випромінювач, водяний опалювальний прилад, ексергія, енергія, ефективність, тепловий насос.

ABSTRACT

Ocheretianko M. D. Energy efficient indoor heating by means of combined use of electric infrared heaters and water heating devices – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Thesis for a Doctor of Philosophy (candidate of technical sciences) degree by specialty 05.23.03 "Ventilation, lighting, heat and gas supply" – Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 2021.

The dissertation research, which is aimed increasing the energy and environmental heating systems efficiency, is relevant due to the high costs of energy production in the energy balance of Ukraine for this purpose (up to 40%) and, accordingly, high emissions of greenhouse gases and other pollutants. The relevance of the work is confirmed by scientific research which were held on the basis of Heat Engineering Department in Kyiv National University of Construction and Architecture. The purpose of the dissertation is the scientific substantiation of energy-saving technologies in the formation of a comfortable heat and moisture regime for premises with various purposes using a combined heating system based on electric infrared and water heaters. In accordance with the set goal, the following tasks were performed: literature sources were analyzed, patent studies of radiation-convective heating systems in rooms for various purposes were performed and directions for their improvement were identified; developed a physico-mathematical model that describes indoor heat and moisture processes for premises heated by electric infrared and water heaters; conducted experimental studies of electric infrared and water heaters with determination of their influence on zonal heat and humidity parameters of air and internal enclosures depending on the content of water vapor in the air; developed a new design of electric infrared heater; developed engineering calculation technique for radiation-convective heating system on the basis of the received theoretical

and experimental data; technical and economic substantiation of radiation-convective heating system expediency were carried out. The object of the study is radiation-convective heating systems for premises with various purposes and the subject - heat and moisture processes inside this premises. Modern methods of technical thermodynamics and heat and mass transfer, physical and mathematical modeling of heat and mass transfer processes and experimental studies for system "heaters - humid air - the indoor enclosures surface", technical, economic and engineering analysis were held.

In the introduction of the dissertation the relevance of the topic is substantiated, the purpose, tasks, subject and object of research were formulated. Indicated guidelines that determine the scientific novelty and practical significance of the obtained results, the personal contribution of the applicant and provide information on the research results evaluation.

In the first section the analysis of scientific and technical works and patent researches devoted to formation of a comfortable heat and moisture regime for rooms which are heated with radiation-convective heating systems. Based on the analysis, the classification of heating systems were given and the relevant research problems that need to be solved and are the area of research of this work were summarized. It is established that the purpose of modern design of water and electric heating systems to be about arrangement of heating devices in the room, which will compensate heat losses that were calculated according to the normative method. This approach is not rational for rooms with complex architectural shapes and geometric dimensions, as soon as, it doesn't provide comfortable heat and humidity parameters throughout all room volume. On the other hand, the problem is that such approach requires significant energy resources consumption to maintain indoor air parameters at given level, or provide low possibility for zonal heating. In addition, heating systems are usually designed with one type of energy source - water, electric, steam, etc., which does not allow to ensure system reliability. To solve above mentioned scientific and technical problems, it is proposed to use a combined heating system, consisting of a permanent background water heating system and a periodically operating electric heating system. It is assumed that water heaters will be unregulated and will operate with a constant hydraulic regime maintaining a certain base indoor room

temperature, and electric heaters will be regulated by sensors and will create comfortable heat and humidity parameters in each zone, mainly by increasing radiation heat transfer in a certain area (zone). Energy-efficient heating systems created in such manner allows to combine electric infrared heaters with water heating systems that use as a heat source: central heating system, individual boiler room or heat-pump system (HPS). The use of HPS allows to increase the exergy efficiency of the combined heating system, because unlike other heat sources for water heating system, reducing the indoor air temperature does not require reducing temperature potential of thermal energy produced by HPS. In addition, it should be noted that the electric infrared heaters used in this heating system have a maximum emittance wavelength at $\lambda_{\max} > 8.0 \mu\text{m}$. These wavelengths close to the waves emitted by the surface of the human body, and to the wavelengths we receive from the sun and belongs to the solar infrared range (IR-C), according to the classification of the International Commission on Illumination. Based on recent medical and biological studies of human skin spectral properties, it is established that in the IR-A and IR-B ranges there is lower absorption capacity, and a significant proportion of radiation in these spectrum range were transmitted and reflected compared to the IR-C range, which made it less efficient for direct heating of human body. Therefore, it can be concluded that thermal radiation from electric infrared heaters aren't harmful, but an effective way to supply heat to human body and it can be useful to compensate daily infrared radiation needs. Analysis of combined radiation-convective heating systems modern researches on the basis of energy and exergy methods of technical thermodynamics were held. The analysis showed that the energy efficiency of heating systems with one heat source has been thoroughly studied in scientific works, while the energy efficiency of combined heating systems needs to be studied in more detail. In particular, very little work is devoted to the study of energy efficiency of combined heating systems, in which as a heat source for the water part of the heating system is used HPS, and for the electric part of the heating system - infrared heaters. Based on the analysis of literature sources, the purpose and objectives of the study were formulated.

The second section shows promising ways to create combined systems based on energy and exergy comparative analyzes of heating systems with different heat and power

sources efficiency. The analysis of HPS using the method of cycles, which allowed to measure the impact of individual irreversible processes on the heat conversion coefficient (COP) of the actual cycle of the heat pump (HP), which showed a significant effect of temperature gradient between the heating medium and air in the heated room on the actual cycle efficiency. Basically, this temperature gradient reduces the efficiency of HPS due to the expansion of the temperature range on which the Carnot cycle is built and due to the properties of the refrigerant in the HP. A comparison of the effects of different refrigerants (R717, R12, R22, R134a) on the efficiency of the cycle were held. The equation for calculating the efficiency of the real cycle of HPS based on the known COP of the basic steam compression cycle of Carnot and isentropic efficiency of the compressor, as well as the equation for estimating fuel savings when using HPS in comparison with the boiler. To assess the efficiency of the combined heating system, thermodynamic analysis was performed on the basis of energy and exergy balance equations for water and electrical systems separately. It is established that under conditions of lower air temperature in a heated room by a water system with heat supply from a boiler room or an electric heating system, the exergy efficiency of the respective systems decreases. It was also found that the rate of decrease in exergy efficiency due to lower air temperature in the room for electric heating system is about twice lower compared to water heating system with heat supply from the boiler room, which is mainly due to its low energy efficiency. The relations for calculation of energy and exergy efficiency of the combined heating system are obtained, from which follows that the use of electric heating devices reduces the energy performance of the combined system. Therefore, it is necessary to minimize the time of its use, which is proposed to do through the use of non-stationary zonal heating within each room.

The analysis of the mathematical model of the heat-moisture regime of the room during radiation-convective heating is carried out and the analytical solution of differential equations describing heat-mass transfer processes in the system “heaters - humid air - the indoor enclosures surface” were obtained, and the tasks for experimental research were defined.

In the third section the full complex of experimental researches of dynamic heat-moisture regime formation for room heated by means of electric infrared and water heaters were developed. The influence of moisture content of air on irradiation of surfaces of internal protections of the room and their corresponding influence on parameters of thermal comfort were investigated. To verify the obtained theoretical dependences, experimental studies were performed, which included irradiation of 23 sensors on the indoor wall surface at a distance of electric infrared emitter from the wall surface by 1.75 m and 1.25 m and air humidity of 5, 7.5 and 10 g of steam per kg of dry air, conducted in three series. Experimental data showed satisfactory agreement with the theoretical ones. To understand the boundaries of the areas on wall surface which were heated by the electric infrared heater, a subroutine for Scilab was written. The latter visualizes the temperature fields on the wall surface. The air movement in the study room was simulated with k- ϵ CFD model. In this simulation for boundary conditions of the 3rd kind were used internal enclosures temperatures, which were previously obtained experimentally by mean of wall irradiation. The simulation results are presented in the form of gradient fields showing the distribution of temperature, velocity and relative humidity, as well as PMV / PPD comfort level indexes, which reflect a comprehensive study of workplace thermal comfort conditions. The measurement results are an objective statement of the level of thermal comfort, and the PMV index is the predicted average level of comfort at a distance of 1 m from the irradiated indoor wall. Analysis of the gradient fields confirmed that the areas opposite the switched on electric infrared heater had a significantly better level of comfort compared to the corresponding areas in the absence of it. Recommendations for optimizing the design of electric infrared heaters for more efficient operation in combined radiation-convection heating systems have been developed. To analyze the operation of the electric infrared heater in non-stationary modes, the equations for calculating the surface temperature of the emitter and the irradiated indoor wall were obtained, taking into account the content of triatomic gases (H_2O , CO_2) in the air and the distance of the heater from the irradiated wall surface. According to the studies results for electric infrared heater Eltron IP-700MK, structural changes were proposed to improve its energy efficiency as part of the combined heating system.

In the fourth section the engineering calculation technique for combined radiation-convective heating system were developed. The latter allows to select rationally thermal capacities of heating devices and define a rational place of their arrangement. This calculation technique for combined heating system, which include water and electric infrared heater mainly designed for new construction, but under certain conditions can be used in projects for the reconstruction of premises with various purposes. The calculation according to this technique allows to ensure the optimal parameters of the heat and humidity regime in the room when using a combined heating system which include water and electric infrared heater. Achieve energy savings by reducing the air temperature and, accordingly, heat loss of the heated room with increasing the reliability of the heating system through the use of heating devices powered by different energy sources. An increase in the environmental efficiency of the system is achieved through the use of electricity, which were previously generated with renewable energy sources. Economic efficiency increase by means of using electricity at a reduced cost in during the night hours.

The fifth section analyzes the obtained technical and economic efficiency indicators for combined water and electric heating systems which include electric infrared heaters. As a result of the analysis, it was found that the cheapest heat supply provided by centralized heating networks, and the most effective combination of water and electric heating system obtained when water is used as a regular heating system, and electric as a zonal or peak. At the same time, a combined heating system with a heat supply source from a heat pump system and electric heating systems increases their economic efficiency up to 6%, and a combined system with a heat source which burns solid fuel is not economically feasible.

Key words: comfortable heat-moisture thermal regime, radiation-convective heating system, electric infrared heater, water heater, exergy, energy, efficiency, heat pump.