

dr inż. Magdalena Nakielska^{1)*}

ORCID: 0000-0001-6349-6988

dr inż. Anna Kaczmarek¹⁾

ORCID: 0000-0002-9081-4520

Impact of external wall insulation of office buildings on the interior microclimate

Wpływ docieplenia ścian zewnętrznych budynków biurowych na mikroklimat wnętrz

DOI: 10.15199/33.2024.10.12

Abstract. The feeling of thermal comfort, is a state of thermal equilibrium between a person and the surrounding space. Thermal comfort for a person in an office space occurs when neither heat nor cold is felt, as well as when there is no feeling of draught. If any of the basic air parameters are disturbed, the wellbeing of the office occupants can be adversely affected and their health and efficiency at work can be negatively affected. This article aims to analyse selected microclimate parameters (temperature, air humidity and air movement velocity and ambient radiation temperature) affecting the thermal comfort of office rooms undergoing thermal upgrading. The study was conducted in four rooms located in a building that underwent thermal modernisation. The results obtained indicate that the thermomodernisation did not significantly affect the analysed parameters of the microclimate of the rooms and the comfort of people's work, their efficiency, as well as their well-being and health.

Keywords: microclimate; office building; PMV; PPD; thermal comfort.

Streszczenie. Odczucie komfortu cieplnego to stan równowagi termicznej człowieka z otaczającą go przestrzenią. W przypadku osoby znajdującej się w pomieszczeniu biurowym występuje wówczas, jeśli nie odczuwa się ciepła, chłodu oraz przeciągu. Zaburzenie któregokolwiek z podstawowych parametrów powietrza może mieć negatywny wpływ na samopoczucie osób przebywających w biurze oraz ich zdrowie i efektywność w pracy. W artykule przeanalizowano wybrane parametry mikroklimatu (temperaturę, wilgotność powietrza oraz prędkość ruchu powietrza i temperaturę promieniowania otoczenia) wpływających na komfort cieplny pomieszczeń biurowych poddanych procesowi termomodernizacji. Badania przeprowadzono w czterech pomieszczeniach znajdujących się w budynku po termomodernizacji. Uzyskane wyniki wskazują, że termomodernizacja nie wpłynęła znacznie na analizowane parametry mikroklimatu pomieszczeń i na komfort pracy osób, ich efektywność oraz samopoczucie i zdrowie.

Słowa kluczowe: mikroklimat; budynek biurowy; PMV; PPD; komfort cieplny.

Human thermal comfort is a state of satisfaction with the parameters of the environment. This feeling is subjective and individual for each person in the room. It changes over time and space.

Due to different tastes, age, gender, diet or body shape, it is not possible for the microclimate in a room to be assessed as comfortable by all the people in it [1]. In the opinion of most people, activities such as working, staying at home or leisure time should take place in spaces that are functionally adapted and have appropriate indoor conditions.

The main microclimate parameters are: air temperature, average partition surface temperature, air movement velocity, relative humidity. Non-thermal factors, on the other hand, include air pollution, air ionisation, noise levels, lighting, etc. These factors have a variety of effects on the human body. On the one hand, they help to maintain the thermal stability and equilibrium of the body, while on the other hand, they can negatively affect the health and comfort of the occupants [2]. Indoor installations, especially heating and ventilation, are also important.

Komfort cieplny człowieka to stan zadowolenia z parametrów otoczenia. Odczucie to jest subiektywne i indywidualne każdej osoby przebywającej w pomieszczeniu. Ponadto zmienia się w czasie oraz przestrzeni.

Ze względu na różne upodobania, wiek, płeć, sposób odżywiania się czy budowę ciała nie ma takiej możliwości, aby mikroklimat w danym pomieszczeniu został oceniony jako komfortowy przez wszystkie znajdujące się tam osoby [1]. Zdaniem większości z nich czynności takie, jak praca, przebywanie w domu czy czas wolny powinny odbywać się w przestrzeniach dostosowanych pod względem funkcjonalnym i odpowiednich warunków wewnętrznych.

Główne parametry mikroklimatu to: temperatura powietrza; średnia temperatura powierzchni przegród; prędkość ruchu powietrza; wilgotność względna powietrza. Do czynników nietermicznych zalicza się natomiast: zanieczyszczenie i jonizację powietrza; poziom hałasu; oświetlenie itp. Czynniki te mają różny wpływ na organizm człowieka. Z jednej strony ułatwiają utrzymanie stabilności termicznej i równowagi organizmu, a z drugiej mogą negatywnie wpływać na zdrowie i komfort osób przebywających w pomieszczeniach [2]. Istotne są również instalacje wewnątrz pomieszczeń, przede wszystkim grzewcze i wentylacyjne.

Celem instalacji grzewczej jest podniesienie temperatury w chłodnych porach roku, aby zapewnić komfort cieplny, czyli stan, w któ-

¹⁾ University of Science and Technology, Bydgoszcz, Faculty of Civil and Environmental Engineering and Architecture

^{*} Correspondence address: magdalena.nakielska@pbs.edu.pl

The purpose of the heating installation is to raise the temperature in the colder seasons in order to ensure thermal comfort, i.e. a state in which people feel neither warm nor cold [3]. Regardless of the type of heating system, comfort, safety and economy must be taken into account when designing it [4]. The formation of the microclimate inside a room is also influenced by the thermal insulation of the building envelope. Properly designed thermal insulation has the effect of limiting the flow of heat masses between areas of different temperatures, while minimising heat loss to the outside. Currently, this is a very complex problem, especially when analysing existing buildings built in different periods. These buildings are not able to meet current thermal requirements and provide a comfortable living environment.

This paper presents the impact of external wall insulation together with the replacement of the heating system and window joinery on the internal microclimate parameters of the rooms and the occupants' perception of comfort. Four office rooms were assessed. The analysis of the results obtained consisted of determining the indices used to assess thermal comfort [1, 5].

Thermal comfort indicators influencing the indoor microclimate

The most important indicators of thermal comfort are the PMV (*Predicted Mean Vote*) index, which predicts the average rating of a group of people defining their thermal sensations, and the PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*) index, which predicts the percentage of people who are dissatisfied with indoor comfort in a room [6]. The PMV index is based on the thermal equilibrium of the human body and is expressed on a 7-point scale from -3 to +3, whose successive titres mean: +3 – hot; +2 – warm; +1 – fairly warm; 0 – indifferent; -1 – fairly cool; -2 – cool; -3 – cold. Thermal equilibrium in the human body can be said to exist when the internal heat generation of the human body is equal to the heat loss from the body to the environment [1].

The PMV parameter can be determined provided [1]:

- the room air temperature is: 10 – 30°C;
- the average radiation temperature of the room partitions is: 10 – 40°C;
- the air velocity in the room is: 0 – 1 m/s;
- partial pressure of water vapour in the room is: 0 – 2700 Pa;
- the energy expenditure of the occupants in the room is: 46.6 – 232.8 W/m²;
- thermal insulation of clothing is: 0 – 2 clo .

It is described as a function of a number of variables, including metabolic rate values, thermal insulation of the clothing used, ambient temperature, radiation temperature, air velocity or relative humidity. The IREQmin index (Km²/W) provides an overall assessment of acceptable body cooling [7]. The WBGT index [°C] is a function of temperature, and the calculated value must not exceed the WBGT limits over an 8-hour working day, depending on the metabolic rate, air velocity and the worker's level of acclimatisation to the hot environment (Table 1).

rym człowiek nie odczuwa ciepła ani zimna [3]. Niezależnie od rodzaju instalacji grzewczej, przy jej projektowaniu należy uwzględnić kwestie komfortu, bezpieczeństwa i ekonomii [4]. Na kształtowanie mikroklimatu wewnątrz pomieszczenia ma również wpływ sposób wyizolowania termicznego przegród zewnętrznych. Właściwie zaprojektowana termoizolacja wpływa na ograniczenie przepływu mas ciepła pomiędzy obszarami o zróżnicowanej temperaturze, minimalizując przy tym straty ciepłe na zewnątrz. Obecnie jest to problem bardzo złożony, szczególnie w przypadku analizy budynków istniejących wybudowanych w różnych okresach. Obiekty te nie są w stanie spełnić aktualnych wymagań cieplnych i zapewnić komfortu przebywania w nich ludzi.

W artykule przedstawiono wpływ docieplenia ścian wewnętrznych wraz z wymianą instalacji grzewczej oraz stolarki okiennej na parametry mikroklimatu wewnętrznego pomieszczeń i odczucie komfortu przez użytkowników. Dokonano oceny czterech pomieszczeń biurowych. Analiza uzyskanych wyników polegała na wyznaczeniu wskaźników stosowanych do oceny komfortu cieplnego [1, 5].

Wskaźniki komfortu cieplnego wpływające na mikroklimat wewnątrz

Najważniejszymi wskaźnikami komfortu cieplnego są: wskaźnik PMV (*Predicted Mean Vote*), przewidujący średnią ocenę grupy osób określających swoje wrażenia cieplne oraz wskaźnik PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*), określający przewidywany procent niezadowolonych osób z komfortu wewnętrznego w pomieszczeniu [6]. Wskaźnik PMV bazuje na równowadze cieplnej ludzkiego ciała i wyrażany jest w siedmiostopniowej skali od -3 do +3, której kolejne miana oznaczają: +3 – gorąco; +2 – ciepło; +1 – dość ciepło; 0 – obojętnie; -1 – dość chłodno; -2 – chłodno; -3 – zimno. O równowadze cieplnej w ciele człowieka można mówić wtedy, gdy wytwarzanie ciepła wewnętrznego jego organizmu jest równe utracie ciepła z ciała do otoczenia [1].

Wskaźnik PMV można wyznaczyć pod warunkiem, że [1]:

- temperatura powietrza w pomieszczeniu wynosi 10 – 30°C;
- średnia temperatura promieniowania przegród w pomieszczeniu wynosi 10 – 40°C;
- prędkość powietrza w pomieszczeniu wynosi 0 – 1 m/s;
- ciśnienie cząstkowe pary wodnej w pomieszczeniu wynosi 0 – 2700 Pa;
- wydatek energetyczny osób przebywających w pomieszczeniu wynosi 46,6 – 232,8 W/m²;
- izolacja termiczna odzieży wynosi 0 – 2 clo.

Jest on opisany funkcją wielu zmiennych, m.in. wartości tempa metabolizmu, izolacyjności cieplnej stosowanej odzieży, temperatury otoczenia, temperatury radiacyjnej, prędkości przepływu powietrza czy wilgotności względnej powietrza. Wskaźnik IREQmin (Km²/W) pozwala na ogólną ocenę dopuszczalnego wychłodzenia organizmu [7]. Wskaźnik WBGT [°C] jest funkcją temperatury, a obliczona wartość w ciągu ośmiogodzinnego dnia pracy nie może przekraczać wartości dopuszczalnych WBGT, zależnych od tempa metabolizmu, prędkości powietrza oraz poziomu aklimatyzacji pracownika do środowiska gorącego (tabela 1).

Table 1. Selected indicators for describing heat load and potential health effects of working in different heat environments

Tabela 1. Wybrane wskaźniki służące do opisu obciążenia cieplnego oraz potencjalne skutki zdrowotne wynikające z pracy w różnym środowisku cieplnym

	Cold environment/Środowisko zimne	Temperate environment/Środowisko umiarkowane	Hot environment/Środowisko gorące
Indicators for evaluation/ Wskaźniki do oceny	$PMV \leq -2$ IREQ	$-2 > PMV > +2$ PMV	$PMV \geq +2$ WBGT
Description/Opis	the amount of heat generated by the body is insufficient in relation to the heat absorbed from the human body by the surrounding environment/ilość ciepła generowanego przez organizm jest niedostateczna w stosunku do odbierania ciepła z organizmu człowieka przez otaczające środowisko	the amount of heat generated by the body is balanced with the amount of heat received by the surrounding environment/ilość ciepła generowanego przez organizm jest zrównoważona z ilością ciepła odbieranego przez otaczające środowisko	the amount of heat produced by the body is higher than the heat absorption capacity of the surrounding environment/ilość ciepła produkowana przez organizm jest wyższa niż zdolność odebrania ciepła przez otaczające środowisko
Health effects/ Skutki zdrowotne	<ul style="list-style-type: none"> – lower internal body temperature/obniżenie temperatury wewnętrznej ciała – hypothermia/wychłodzenie organizmu – hypothermia/hipotermia – frostbite/odmrożenia 	– do not occur, except in cases of discomfort due to individual differences in the sensation of heat/nie występują, z wyjątkiem przypadków odczuwania dyskomfortu wynikającego z indywidualnych różnic w odczuwaniu ciepła	<ul style="list-style-type: none"> – increase in internal body temperature/wzrost temperatury wewnętrznej ciała – overheating of the body/przegrzanie organizmu – hyperthermia/hipertermia – burns/oparzenia

The second criterion is the PPD, an indicator representing the thermal sensations of a group of people who are dissatisfied with the conditions that prevail in a given environment. Included in this indicator is: the predicted percentage of people who are dissatisfied with: draught, head-to-toe temperature difference and floor temperature. The minimum value of the PPD is 5%, as it is impossible to select the thermal parameters of a room in such a way that the occupants experience thermal comfort. The standard [8] introduces a classification of rooms and gives recommended values of PPD and PMV for each room category (Table 2).

The categories shown in Table 2 represent rooms with high, normal and moderate requirements. Knowing this division, it is possible to proceed to an indication of the internal design temperature, with reference to the example rooms (Table 3).

Drugim kryterium jest PPD – wskaźnik przedstawiający wrażenia cieplne grupy ludzi, którzy nie są zadowoleni z warunków, jakie panują w danym otoczeniu. Do tego wskaźnika wliczany jest przewidywany odsetek osób niezadowolonych z: przeciągu; różnicy temperatury pomiędzy głową a kostkami nóg oraz temperatury podłogi. Minimalna wartość wskaźnika PPD wynosi 5%, gdyż nie da się tak dobrać parametrów cieplnych pomieszczenia, aby przebywające w nim osoby odczuły komfort cieplny. Norma [8] wprowadza klasyfikację pomieszczeń i podaje zalecane wartości wskaźników PPD i PMV w przypadku każdej kategorii pomieszczeń (tabela 2).

Przedstawione w tabeli 2 kategorie prezentują pomieszczenia o wymaganiach wysokich, normalnych i umiarkowanych. Znając ten podział, można przejść do wskazania wewnętrznej projektowanej temperatury w przykładowych pomieszczeniach (tabela 3).

Table 2. Recommended selected values for thermal comfort indicators [8]

Tabela 2. Zalecane wybrane wartości wskaźników komfortu cieplnego [8]

Room category/ Kategoria pomieszczeń	Whole body thermal sensation/ Odczucie termiczne całego ciała	
	PMV	PPD [%]
A	$-0,2 < PMV < +0,2$	< 6
B	$-0,5 < PMV < +0,5$	< 10
C	$-0,7 < PMV < +0,7$	< 15

A – high requirements, recommended for premises with very sensitive and weak people with special requirements such as the disabled, the sick, young children and the elderly/wymagania wysokie zalecane w pomieszczeniach, w których przebywają osoby bardzo wrażliwe i słabe, o specjalnych wymaganiach, takich jak: niepełnosprawni; chorzy; małe dzieci i seniorzy

B – normal requirements, should be used for new and refurbished buildings/wymagania normalne, które powinny być stosowane w przypadku budynków nowych i modernizowanych

C – moderate requirements, acceptable, can be used for existing buildings/wymagania umiarkowane, akceptowalne, które mogą być stosowane w przypadku istniejących budynków

Table 3. Design operating temperature depending on the selected room type

Tabela 3. Projektowana temperatura operatywna w zależności od wybranego typu pomieszczeń [9]

Type of rooms/ Typ pomieszczeń	Thermal insulation of clothing/ Izolacyjność cieplna odzieży [clo]	Physical activity/ Aktywność fizyczna [met]	Internal category of the thermal environment/ Kategoria wewnętrznego środowiska cieplnego	Operating temperature/ Temperatura operacyjna [°C]
Single office/ Pojedyncze biuro	1,0	1,2	A	21–23
			B	20–24
			C	19–25
Auditorium/ Audytorium	1,0	1,2	A	21–23
			B	20–24
			C	19–25
Bathroom/Łazienka	0,2	1,6	A	24,5–25,5
			B	23,5–26,5
			C	23–27

Description of the test facility

The analysis and evaluation of the thermal comfort of the occupants in the study rooms was carried out on the basis of the calculated PMV and PPD indices. The research was conducted in a building on the campus of University in Bydgoszcz, before thermal insulation of external walls, replacement of the heating system and window, and after thermal insulation of external walls and comprehensive replacement of the heating system and window.

The building under analysis has a partial basement. The building contains rooms for various purposes. The building was constructed according to industrialised panel building technology. The building has a skeleton construction, the load-bearing elements are solid reinforced concrete walls. The load-bearing structure of the roof is made up of open-work steel beams. Some of the rooms in the building have the so-called old wooden joinery, some have PVC windows. The building is heated from the district heating network. Various types of radiators have been installed in the rooms (photo 1). Thermostatic valves have not been installed in the radiators. The central heating system is regulated by a district heating substation. The external wall partitions are characterised by low thermal insulation and thus the building generates high energy consumption for heating purposes.

The study was carried out in selected four office rooms during the heating season. The rooms have an area of approximately 16 m² and are equipped with a gravity ventilation system. One person works in each of the selected rooms. During the research, natural conditions were maintained in the rooms without interfering with the execution of work included in a typical daily schedule.

The heat transfer coefficient for the existing external wall was 1.53 W/(m²·K), for wooden window frames 1.80 W/(m²·K) and for PVC window frames 1.60 W/(m²·K). As a result of changes in legal regulations and the financial outlay generated on heating, the building underwent a process of thermomodernisation, i.e. insulation of external walls, replacement of the heating system and window joinery. After insulation, the walls meet current thermal requirements. The building underwent a comprehensive replacement of the heating system with a two-pipe pump system with bottom distribution and panel radiators. The new PVC window frames meet current thermal requirements.

An assessment of the occupant's thermal comfort was carried out in two phases before and after the thermomodernisation. Measurements were taken in:

Opis badanego obiektu

Analizę i ocenę komfortu cieplnego osób przebywających w badanych pomieszczeniach wykonano na podstawie obliczonych wskaźników PMV i PPD. Badania przeprowadzono w budynku wchodzącym w skład kampusu Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich; przed dociepleniem ścian zewnętrznych, wymianą instalacji grzewczej oraz stolarki okiennej oraz po wykonaniu ich docieplenia wraz z kompleksową wymianą instalacji grzewczej oraz stolarki okiennej.

Analizowany budynek jest częściowo podpiwniczony i znajdują się w nim pomieszczenia o różnym przeznaczeniu. Został zbudowany z zastosowaniem uprzemysłowionej technologii budownictwa panelowego. Budynek ma konstrukcję szkieletową, a elementami nośnymi są pełne ściany żelbetowe. Konstrukcję nośną dachu stanowią ażurowe belki stalowe. Część pomieszczeń w budynku ma starą stolarkę drewnianą, a część okna z PVC. Budynek ogrzewany jest z miejskiej sieci ciepłowniczej. W pomieszczeniach zainstalowano różne rodzaje grzejników bez zaworów termostatycznych (fotografia 1). Instalacja centralnego ogrzewania jest regulowana przez węzeł ciepłny. Przegrody ścian zewnętrznych charakteryzują się słabą izolacyjnością cieplną, a tym samym budynek generuje duże zużycie energii na cele grzewcze.

Badania przeprowadzono w czterech wybranych w sezonie grzewczym pomieszczeniach biurowych o powierzchni ok. 16 m², wyposażonych w system wentylacji grawitacyjnej. W każdym z wytypowanych pomieszczeń miejsce pracy ma jedna osoba. Podczas prowadzenia badań w pomieszczeniach zachowano naturalne warunki bez ingerowania w realizację prac objętych typowym harmonogramem dnia.

Współczynnik przenikania ciepła istniejącej ściany zewnętrznej wynosił 1,53 W/(m²·K), drewnianej stolarki okiennej 1,80 W/(m²·K), a dla stolarki okiennej z PVC 1,60 W/(m²·K). W wyniku zmian regulacji prawnych oraz dużych nakładów finansowych na ogrzewanie obiekt przeszedł proces termomodernizacji, tj. docieplenie ścian zewnętrznych, wymiana instalacji grzewczej oraz stolarki okiennej. Po dociepleniu ściany spełniają obecne wymagania cieplne. W budynku wykonano kompleksową wymianę instalacji grzewczej na pompową dwururową z rozdzielaczem dolnym i grzejnikami płytowymi. Nowa stolarka okienna z PVC spełnia również obecne wymagania cieplne.

Ocenę komfortu cieplnego użytkownika pomieszczeń przeprowadzono w dwóch fazach – przed i po termomodernizacji. Pomiary wykonano w:

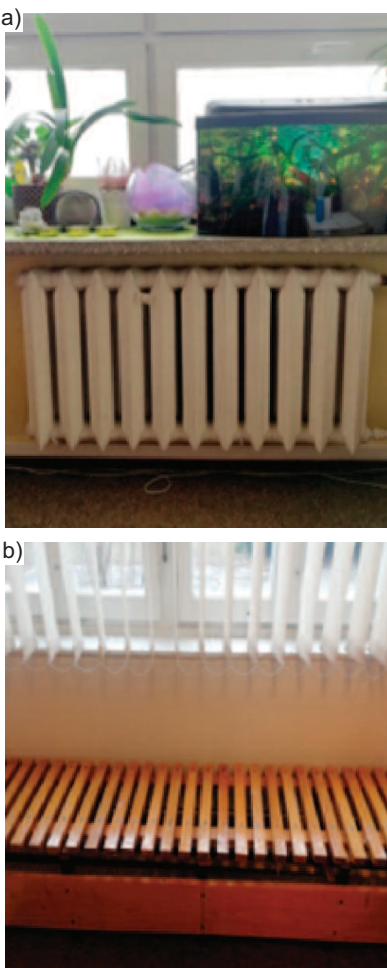


Photo 1. Radiators in the surveyed rooms: a) cast iron radiator; b) radiators made of FAVIERA steel pipes

Fot. 1. Grzejniki w badanych pomieszczeniach: a) grzejnik żeliwny; b) grzejniki z rur stalowych FAVIERA

- two rooms with windows facing north, with PVC windows and cast-iron radiators placed under the windows;
- two rooms located on the south side, with wooden window frames and radiators made of FAVIERA steel tubes.

Method of testing

According to the standard [5], the following measurements of selected indoor microclimate parameters were taken into account to assess the thermal comfort of the rooms:

- relative air velocity;
- relative humidity;
- ambient air temperature;
- air humidity.

The value of the relative air velocity was assumed to be constant – assumed according to [10]. A Comet C3120 thermohygrometer was used to determine the air temperature and humidity (photo 2). The aforementioned device has a certificate of conformity and calibration. During the air temperature and humidity measurements, the windows and doors inside the room were closed, the lighting was on and one computer was running. Measurements were taken three times a day. The first measurement was taken at around 8.00 a.m., the next at 12.00 p.m. and the last at 4.00 p.m.

Measurement dates prior to thermomodernisation – 9 measurement days:

- 21, 22, 23 November 2017, with an average outside air temperature of 2.40°C;
- 18, 19, 20 December 2017, with an average outside air temperature of -1.80°C;
- 15, 16, 17 January 2018, with an average outside air temperature of -2.8°C.

Measurement dates after thermal modernisation – 9 measurement days:

- 18, 19, 20 November 2019, with an average outside air temperature of 2.60°C;
- 16, 17, 18 December 2019, with an average outside air temperature of -1.90°C;
- 20, 21, 22 January 2020, with an average outside air temperature of -3.1°C.

Then, on the basis of the collected data [11, 12] and accepted standard values [9, 10], the following were determined: metabolic energy production – 70 W/m²; basic insulation of clothing – 1 clo; air velocity in the occupied area – 0.1 m/s; radiation temperature is equal to the indoor air temperature. These values were the basis for determining the PMV and PPD indices. The calculated PMV and PPD indices were compared with reference values [7].

Research results and analysis

Firstly, an analysis was made of the basic thermal microclimate parameters that have a major influence on the development of PMV and PPD values. Indoor air flow

- dwóch pomieszczeniach z oknami z PVC skierowanymi na północ oraz z grzejnikami żeliwnymi umieszczonymi pod oknami;
- dwóch pomieszczeniach zlokalizowanych od strony południowej, z drewnianą stolarką okienną oraz grzejnikami wykonanymi z rurek stalowych.

Metoda badań

Zgodnie z normą [5], w celu oceny komfortu cieplnego pomieszczeń uwzględniono pomiary następujących parametrów mikroklimatu wewnętrznego pomieszczeń:

- prędkości względnej powietrza;
- wilgotności względnej;
- temperatury powietrza otoczenia;
- wilgotności powietrza.

Wartość prędkości względnej powietrza przyjęto jako stałą – zgodnie z [10]. Do określenia temperatury i wilgotności powietrza wykorzystano termohigrometr posiadający certyfikat zgodności i wzorcowania (fotografia 2). W czasie wykonywania pomiarów temperatury i wilgotności powietrza okna i drzwi wewnątrz pomieszczenia były zamknięte, włączone było oświetlenie i działał jeden komputer. Pomiary wykonywano trzy razy dziennie. Pierwszy ok. godz. 8.00; kolejny o godz. 12.00, a ostatni o godz. 16.00.

Terminy pomiarów przed termomodernizacją (9 dni pomiarowych):

- 21, 22, 23 listopada 2017 r., przy średniej temperaturze powietrza zewnętrznego 2,40°C;
- 18, 19, 20 grudnia 2017 r., przy średniej temperaturze powietrza zewnętrznego -1,80°C;
- 15, 16, 17 stycznia 2018 r., przy średniej temperaturze powietrza zewnętrznego -2,8°C.

Terminy pomiarów po termomodernizacji (9 dni pomiarowych):

- 18, 19, 20 listopada 2019 r., przy średniej temperaturze powietrza zewnętrznego 2,60°C;
- 16, 17, 18 grudnia 2019 r., przy średniej temperaturze powietrza zewnętrznego -1,90°C;
- 20, 21, 22 stycznia 2020 r., przy średniej temperaturze powietrza zewnętrznego -3,1°C.

Następnie, na podstawie zebranych danych [11, 12] i przyjętych wartości normowych [9, 10], określono: produkcję energii metabolicznej, która wynosiła 70 W/m²; podstawową izolację odzieży – 1 clo; prędkość powietrza w obszarze przebywania ludzi – 0,1 m/s oraz temperaturę promieniowania, która była równa temperaturze powietrza wewnętrznego. Wartości te były podstawą do wyznaczenia wskaźników PMV i PPD. Obliczone wskaźniki PMV i PPD porównano z wartościami referencyjnymi [7].

Wyniki badań i ich analiza

W pierwszej kolejności wykonano analizę podstawowych termicznych parametrów mikroklimatu, mających zasadniczy wpływ na kształtowanie się wartości PMV i PPD, uzyskanych z badań przed termomodernizacją ścian zewnętrz-



Photo 2. Thermohygrometer used in tests

Fot. 2. Termohigrometr wykorzystany w badaniach

velocity (v_a), temperature (t_a) and relative humidity (ϕ_a), and ambient radiation temperature (t_r) were analysed. The results are presented in Table 4.

The indoor air flow velocity was assumed to be at a level acceptable to the occupants of the rooms [10]. In typical Polish buildings with gravitational ventilation, we usually deal with a small and relatively constant speed of air movement during the day.

Table 4 shows that regardless of the orientation of the offices with respect to the world and the type of heating system, the indoor temperature is similar (around 21°C). Offices located on the south side had an average humidity of 52.4% and on the north side 57.5%.

The results of the post-thermal refurbishment of the office premises presented in Table 5 included the average values for temperature (t_a) and relative humidity (ϕ_a), as well as the values adopted for the indoor air velocity (v_a) and ambient radiation temperature (t_r). On the basis of these, it was found that after thermomodernisation there was an increase in the indoor temperature of almost 1°C for the offices analysed. The relative air humidity for the offices located on the north side before and after thermomodernisation had higher values than in the offices located on the south side.

The thermomodernisation process reduced the relative humidity in rooms located on the north side by an average of 3.7%, and by 1% for rooms on the south side. The results were mainly influenced by the way the rooms were heated.

After thermomodernisation, the heat transfer coefficient for the walls of the analysed building was 0.19 W/(m²·K) and thus meets current standard requirements. The results obtained allowed the PMV and PPD indices to be calculated. The calculations were made using the PMV 2008 version 1.0 programme, Ingvar Holmer calculator [5]). Tables 6 and 7 summarise the averaged results of the indices from the nine test days, for the four selected office spaces before and after thermomodernisation.

Compiled in Tables 7 and 8, the calculated thermal comfort index values were: PPD below 10% and PMV values ranged from -0.5 to 0.5. The investigated office rooms 1, 2, 3, 4 fall into category B. The thermal comfort parameters of the occupant both before and after thermomodernisation were met

Table 4. Thermal microclimate parameters in the office premises before thermal modernisation (average values from 27 measurements; 3 after measurements x 9 measurement days)

Tabela 4. Termiczne parametry mikroklimatu w pomieszczeniach biurowych przed termomodernizacją (wartości średnie z 27 pomiarów; 3 pomiary x 9 dni pomiarowych)

Room averaging values/Rodzaje pomieszczeń	Averaged parameter values/Średnione wartości parametrów			
	t_a [°]	ϕ_a [%]	v_a [m/s]	t_r [°]
Office 1/Biuro 1	20,7	58,1	0,1	20,7
Office 2/Biuro 2	20,7	56,9	0,1	20,7
Office 3/Biuro 3	20,6	51,9	0,1	20,6
Office 4/Biuro 4	20,7	53,0	0,1	20,7

Markings/Oznaczenia:

Office 1,2 located facing north, with UPVC windows and cast iron radiators located under the windows/Biura 1, 2 z oknami z PVC skierowanymi na północ oraz grzejnikami żeliwnymi umieszczonymi pod oknami

Office 3,4 located on the south side, with wooden window frames and radiators made of FAVIERA steel tubes/Biura 3, 4 zlokalizowane od strony południowej, z drewnianą stolarką okienną oraz grzejnikami wykonanymi z rurek stalowych

Table 5. Thermal microclimate parameters in selected office rooms after thermal modernisation (average values from 27 measurements; 3 measurements x 9 measurement days)

Tabela 5. Termiczne parametry mikroklimatu w wytypowanych pomieszczeniach biurowych po termomodernizacji (wartości średnie z 27 pomiarów; 3 pomiary x 9 dni pomiarowych)

Room averaging values/Rodzaje pomieszczeń	Averaged parameter values/Średnione wartości parametrów			
	t_a [°]	ϕ_a [%]	v_a [m/s]	t_r [°]
Office 1/Biuro 1	21,3	54,6	0,1	21,3
Office 2/Biuro 2	21,4	53,1	0,1	21,4
Office 3/Biuro 3	21,6	51,7	0,1	21,6
Office 4/Biuro 4	21,6	51,2	0,1	21,6

nych, wymianą instalacji grzewczej oraz stolarki okiennej. Analizie poddano prędkość przepływu powietrza w pomieszczeniach (v_a), temperaturę (t_a) i wilgotność względną powietrza (ϕ_a) oraz temperaturę promieniowania otoczenia (t_r). Wyniki przedstawiono w tabeli 4.

Prędkość przepływu powietrza w pomieszczeniach przyjęto na poziomie akceptowanym przez użytkowników pomieszczeń [10]. W typowych polskich budynkach z wentylacją grawitacyjną mamy do czynienia zwykle z niewielką i w miarę stałą prędkością ruchu powietrza w ciągu dnia.

Z tabeli 4 wynika, że niezależnie od zorientowania biur względem stron świata oraz rodzaju instalacji grzewczej temperatura wewnątrz pomieszczeń jest zbliżona (ok. 21°C). Biura zlokalizowane od strony południowej miały średnią wilgotność względną powietrza na poziomie 52,4%, a od strony północnej 57,5%.

Wyniki badań pomieszczeń biurowych po termomodernizacji przedstawione w tabeli 5 obejmowały średnie wartości temperatury (t_a) i wilgotności względnej powietrza (ϕ_a) oraz wartości przyjęte dla prędkości przepływu powietrza w pomieszczeniach (v_a) i temperatury promieniowania otoczenia (t_r). Na ich podstawie stwierdzono, że po termomodernizacji analizowanych biur zwiększyła się temperatura wewnątrz pomieszczeń o ok. 1°C. Wilgotność względna powietrza w biurach zlokalizowanych od strony północnej była większa przed i po termomodernizacji niż w biurach zlokalizowanych od strony południowej.

Proces termomodernizacji wpłynął na zmniejszenie wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniach zlokalizowanych od północy średnio o 3,7%, a w pomieszczeniach od strony południowej o 1%. Na uzyskane wyniki miał wpływ przede wszystkim sposób ogrzewania pomieszczeń

Po termomodernizacji współczynnik przenikania ciepła ścian analizowanego budynku wyniósł 0,19 W/(m²·K), a więc spełnia obecne wymagania normowe. Uzyskane wyniki pozwoliły na obliczenie wskaźników PMV i PPD. Obliczenia wykonano w programie PMV 2008 wersja 1.0 kalkulator Ingvar Holmer [5]). W tabelach 6 i 7 zestawiono uśrednione wskaźniki z dziewięciu dni testowych, w przypadku czterech wybranych powierzchni biurowych przed i po termomodernizacji.

Zestawione w tabelach 6 i 7 obliczone wartości wskaźników komfortu cieplnego wynosiły: PPD poniżej 10%, a wartości PMV znajdowały się w przedziale od -0,5 do 0,5. Badane pomieszczenia biurowe 1, 2, 3, 4 należą do kategorii B. Parametry komfortu cieplnego użytkownika zarówno przed,

– a normal environment existed in the rooms. The amount of heat generated by the human body is balanced with the amount of heat received by the surrounding environment. The user should not experience discomfort [13]. It can therefore be concluded that the thermal upgrading process carried out did not perceptibly affect the user's comfort. The temperature obtained in the room was favourable, regardless of the insulation of the walls, the window frames and the type of radiators. The thermal insulation carried out had a positive impact on energy consumption and reduced emissions of harmful substances into the atmosphere. The process forms part of the sustainable development strategy.

Summary

This paper presents the results of a study relating to a building undergoing thermal modernisation in terms of the thermal comfort of its occupants. Two microclimate parameters were taken into account in the analysis:

air temperature and humidity in four office rooms. The remaining parameters: air velocity and ambient radiation temperature were taken as assumed values.

On this basis, the values of PPV and PPD indices were determined in the surveyed offices before and after thermomodernisation. The results obtained allow us to conclude that the thermomodernisation carried out did not significantly affect the interior microclimate. It should be emphasised that after the changes, the building meets the current requirements for thermal parameters. The drive to reduce the building's energy demand did not come at the expense of the occupants' thermal comfort and indoor air quality [14, 15].

Table 6. Results of calculations of PMV and PPD in the studied rooms before thermal upgrading

Tabela 6. Wyniki obliczeń wskaźników PMV i PPD w badanych pomieszczeniach przed termomodernizacją

XI 2017	PMV	PPD	XII 2017	PMV	PPD	I 2018	PMV	PPD
Office 1/ Biuro 1	-0,42	8,70	Office 1/ Biuro 1	-0,02	5,00	Office 1/ Biuro 1	-0,25	6,30
	-0,38	8,10		0,13	5,30		0,04	5,00
	-0,30	6,90		0,02	5,00		-0,05	5,10
Office 2/ Biuro 2	-0,47	9,60	Office 2/ Biuro 2	-0,13	5,40	Office 2/ Biuro 2	-0,31	7,00
	-0,43	8,80		-0,06	5,10		-0,15	5,40
	-0,34	7,40		0,04	5,00		-0,19	5,70
Office 3/ Biuro 3	-0,31	7,00	Office 3/ Biuro 3	-0,23	6,10	Office 3/ Biuro 3	-0,31	6,90
	-0,24	6,20		-0,12	5,30		-0,26	6,40
	-0,20	5,80		-0,10	5,20		-0,24	6,20
Office 4/ Biuro 4	-0,32	7,20	Office 4/ Biuro 4	-0,08	5,10	Office 4/ Biuro 4	-0,16	5,50
	-0,28	6,60		-0,08	5,10		-0,17	5,60
	-0,25	6,30		-0,11	5,30		-0,24	6,20

These are the average values from three measurements taken on designated measuring days, e.g. 21 November at 8.00, 12.00, 16.00/Są to wartości średnie z trzech pomiarów wykonanych w wyznaczonych dniach pomiarowych, np. 21 listopada godzina 8.00, 12.00, 16.00

Table 7. Calculation results of PMV and PPD indices in the investigated rooms after thermomodernisation

Tabela 7. Wyniki obliczeń wskaźników PMV i PPD w badanych pomieszczeniach po termomodernizacji

XI 2019	PMV	PPD	XII 2019	PMV	PPD	I 2020	PMV	PPD
Office 1/ Biuro 1	-0,07	5,10	Office 1/ Biuro 1	0,09	5,20	Office 1/ Biuro 1	-0,29	6,80
	-0,11	5,20		0,24	6,20		-0,12	5,30
	-0,27	6,50		0,16	5,50		-0,11	5,20
Office 2/ Biuro 2	-0,20	5,80	Office 2/ Biuro 2	-0,06	5,10	Office 2/ Biuro 2	-0,05	5,00
	-0,17	5,60		0,05	5,00		0,12	5,30
	-0,08	5,10		-0,01	5,00		0,07	5,10
Office 3/ Biuro 3	-0,02	5,00	Office 3/ Biuro 3	0,00	5,00	Office 3/ Biuro 3	-0,16	5,50
	-0,11	5,20		0,07	5,10		0,12	5,30
	-0,19	5,70		0,05	5,10		0,22	6,00
Office 4/ Biuro 4	-0,27	6,50	Office 4/ Biuro 4	0,09	5,20	Office 4/ Biuro 4	-0,04	5,00
	0,01	5,00		0,11	5,20		0,04	5,00
	-0,13	5,40		0,15	5,50		0,09	5,20

These are the average values from three measurements taken on designated measuring days, e.g. 21 November at 8.00, 12.00, 16.00/Są to wartości średnie z trzech pomiarów wykonanych w wyznaczonych dniach pomiarowych, np. 21 listopada godzina 8.00, 12.00, 16.00

jak i po termomodernizacji pomieszczeń były więc spełnione – występowało w pomieszczeniach środowisko normalne. Ilość ciepła generowanego przez organizm ludzki jest zrównoważona z ilością ciepła odbieranego przez otaczające środowisko. Użytkownik nie powinien odczuwać dyskomfortu [13]. Można zatem stwierdzić, że przeprowadzony proces termomodernizacji nie wpłynął w odczuwalny sposób na komfort użytkownika. Uzyskana w pomieszczeniu temperatura była korzystna, niezależnie od sposobu izolowania ścian, stolarki okiennej i rodzaju grzejników. Przeprowadzona termoizolacja wpłynęła korzystnie na energochłonność i ograniczyła emisję szkodliwych substancji do atmosfery. Proces wpisuje się w część strategii zrównoważonego rozwoju.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki badań budynku poddanego procesowi termomodernizacji w aspekcie komfortu cieplnego użytkowników. W analizie uwzględniono dwa parametry mikroklimatu: temperaturę i wilgotność powietrza w czterech pomieszczeniach biurowych. Pozostałe parametry: prędkość powie-

trza oraz temperaturę promieniowania otoczenia przyjęto jako założone. Na tej podstawie wyznaczono wartości wskaźników PPV i PPD w badanych biurach przed i po termomodernizacji.

Uzyskane wyniki wykazały, że termomodernizacja nie wpłynęła w istotny sposób na mikroklimat wewnątrz. Należy podkreślić, że po wprowadzeniu zmian obiekt spełnia obecne wymagania dotyczące parametrów cieplnych. Dążenie do ograniczenia zapotrzebowania budynku na energię nie odbywało się kosztem komfortu cieplnego mieszkańców i jakości powietrza w pomieszczeniach [14, 15].

Komfort cieplny panujący w pomieszczeniach wywiera bardzo duży wpływ na osoby w nich przebywające. Przestrzega-

Indoor thermal comfort has a very strong impact on the occupants. Observing standards and maintaining microclimate parameters at the right level improves the quality of staying in a given room [16, 17]. Properly selected parameters of a building's heating system are an important factor determining the correct value of the room air temperature during the heating season [12].

Photo: authors
 Received: 31.07.2024
 Revised: 11.09.2024
 Published: 22.10.2024

nie norm oraz zachowywanie parametrów mikroklimatu na odpowiednim poziomie poprawia jakość przebywania w danym pomieszczeniu [16, 17]. Odpowiednio dobrane parametry systemu ogrzewania budynku są istotnym czynnikiem warunkującym właściwą wartość temperatury powietrza w pomieszczeniu w sezonie grzewczym [12].

Fotografie: autorzy
 Artykuł wpłynął do redakcji: 31.07.2024 r.
 Otrzymano poprawiony po recenzjach: 11.09.2024 r.
 Opublikowano: 22.10.2024 r.

Literature

- [1] Fanger PO. Komfort cieplny. 1974, Arkady, Warszawa.
- [2] Chojnacka A, Sudół-Szopińska I. Komfort termiczny w pomieszczeniach biurowych w aspekcie norm. Bezpieczeństwo Pracy. 2007; 6: 16 – 19.
- [3] Recknagel, Sprenger, Honmann, Schramek. Przewodnik Ogrzewanie i klimatyzacja. EWFE. 2008; Gdańsk
- [4] Koczyk H. Ogrzewanie praktyczne. Projektowanie, montaż, eksploatacja. Systherm Serwis. 2006; Poznań.
- [5] PN-EN ISO 7730:2006 (U): Ergonomia. Środowisko termicznie umiarkowane. Analityczne wyznaczanie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów lokalnego komfortu termicznego.
- [6] Hendiger J, Ziętek P, Chłudzińska M. Wentylacja i klimatyzacja. Pomoc projektowe. Venture Industries. 2013; Warszawa.
- [7] Bogdan A. Kształtowanie środowiska cieplnego w pomieszczeniach – przegląd aktualnych wytycznych i norm. Chłodnictwo i Klimatyzacja. 2011; 2: 42-47.
- [8] PN-EN 16798-1:2019-06 Charakterystyka energetyczna budynków – Wentylacja budynków – Część 1: Parametry wejściowe środowiska wewnętrznego do projektowania i oceny charakterystyki energetycznej budynków w odniesieniu do jakości powietrza wewnętrznego, środowiska cieplnego, oświetlenia i akustyki – Moduł M1-6.
- [9] Zwolińska M, Bogdan A. Izolacyjność cieplna odzieży. Bezpieczeństwo Pracy. 2010; 2: 17 – 20.
- [10] PN-78/B-03421 Wentylacja i klimatyzacja. Parametry obliczeniowe powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach przeznaczonych do stałego przebywania ludzi.
- [11] PN-EN ISO 9920:2009 Ergonomia środowiska termicznego – Szacowanie izolacyjności cieplnej i oporu pary wodnej zestawów odzieży.
- [12] Śliwowski L. Mikroklimat wnętrz i komfort cieplny ludzi w pomieszczeniach. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. 2000.
- [13] Eun Ji Choi, Ji Young Yun, Young JaeChoi, Min ChaeSeo, JinWoo Moon. Impact of thermal control by real-time PMV using estimated occupants personal factors of metabolic rate and clothing insulation. Energy and Buildings. 2024; doi:10.1016/j.enbuild.2024.113976.
- [14] Grygierek K, Ferdyn-Grygierek J. Design of ventilation systems in a single-family house in terms of heating demand and indoor environment quality. Energies. 2022; DOI:10.3390/en15228456.
- [15] Verbeke S, Audenaert A. Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use. Renewable Sustainable Energy Reviews. 2018; doi:10.1016/j.rser.2017.08.083.
- [16] Shaharon MN, Jalaludin J. Ocena komfortu cieplnego – badanie dotyczące zadowolenia pracowników w budynku biurowym o niskim zużyciu energii. American Journal of Applied Sciences. 2012; t.9: 1037–1045.
- [17] Djongyang N, Tchinda R, Njomo D. Thermal comfort: A review paper. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010; Vol. 14, Issue 9:2626-2640.