

OCENA KOMFORTU CIEPLNEGO W JEDNORODZINNYM BUDYNKU MIESZKALNYM PO JEGO TERMOMODERNIZACJI

Grzegorz KOWALEWSKI*, Izabela KOSTECKA, Walery JEZERSKI

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

Streszczenie: Praca zawiera ocenę komfortu cieplnego w pomieszczeniach wybranego jednorodzinnego budynku mieszkalnego po jego termomodernizacji. Budynek usytuowany jest w Białymstoku przy ul. Cyprysowej i powstał w roku 1970. Termomodernizację budynku wykonano z uwzględnieniem wymagań ochrony cieplnej aktualnych dla roku 2012. Przedsięwzięcia termomodernizacyjne obejmowały dodatkowe ocieplenie ścian zewnętrznych, stropodachu, stropu nad piwnicą nieogrzewaną oraz wymianę okien, bez zmiany źródła ciepła. Termomodernizacja istotnie zmieniła warunki komfortu cieplnego w pomieszczeniach wybranego budynku. Na podstawie danych o parametrach mikroklimatu w budynku przeanalizowano warunki komfortu cieplnego. Do analizy zastosowano metodę oceny komfortu Fanger'a za pomocą wskaźników *PMV* i *PPD*. Wykryto istotną poprawę warunków komfortowych, co niejednoznacznie wpłynęło na zdrowie mieszkańców.

Słowa kluczowe: komfort cieplny, termomodernizacja, zapotrzebowanie na energię, wskaźniki komfortu, *PMV*, *PPD*.

1. Wprowadzenie

Przy określaniu warunków panujących w pomieszczeniach używa się zwykle dwóch pojęć: mikroklimat i komfort cieplny. Przez pojęcie mikroklimatu wewnątrz rozumie się zespół wszystkich parametrów fizycznych i chemicznych danego pomieszczenia, wywierający wpływ na organizm człowieka. Natomiast komfort cieplny określa warunki dobrego samopoczucia, to jest taki stan otoczenia, w którym jest zachowana równowaga cieplna organizmu ludzkiego (Klemm, 2005).

Odczuwanie ciepła lub zimna przez człowieka, czyli stopień obciążenia układu termoregulacyjnego organizmu, zależy od parametrów mikroklimatu. System regulacji termicznej człowieka, którego zadaniem jest utrzymywanie stałej temperatury ciała, wynoszącej około 37°C, oddziałuje na ilość ciepła oddawanego przez organizm poprzez promieniowanie, konwekcję, przewodzenie i odparowanie wilgoci. Ponadto, ilość oddawanego ciepła związana jest z wydatkiem energetycznym organizmu, a więc zależy od rodzaju wykonywanych czynności. Równocześnie straty ciepła organizmu zależą od izolacyjności cieplnej odzieży (Klemm, 2005; Śliwowski, 1999).

Środowisko termiczne, jest ważnym czynnikiem, wpływającym na samopoczucie człowieka, jego zdrowie, zdolność wykonywania pracy, a przede wszystkim na jego bezpieczeństwo. Istotne jest zapewnienie odpowiedniego komfortu cieplnego, czyli środowiska, w którym człowiek stosownie ubrany do panujących warunków i rodzaju

wykonywanej pracy nie odczuwa chłodu ani gorąca. Zachowany zostaje, zatem stan równowagi cieplnej organizmu.

Niestety często brakuje tego komfortu. W budynkach przez cały rok zmienia się temperatura razem ze zmianą pór roku. Klimatyczne warunki w kraju charakteryzują się chłodnymi zimami oraz gorącym latem. Stąd w słabo ocieplonych domach mogą występować duże wahania temperatury wewnętrznej w zależności od pory roku.

Po wykonaniu zabiegów termomodernizacyjnych w pomieszczeniach budynków zwykle oczekiwac można podwyższenia komfortu cieplnego. Związane jest to z tym, że przez elementy przegród budowlanych z podwyższonym oporem cieplnym traci się mniej ciepła, niż przez przegrody przed termomodernizacją. Następnym tego działania jest podwyższenie temperatury na powierzchni wewnętrznej ocieplonych przegród. Dodatkowo, temperatura w pomieszczeniach ulega mniejszym wahanom w ciągu roku. Dlatego łatwiej jest zachować komfort cieplny. Oznacza to, że w ocieplonym budynku odzież może mieć niższą oporność cieplną. Przy niższej wartości wytwarzanej energii metabolicznej zachowane będzie odczucie komfortu cieplnego.

Celem pracy jest analiza komfortu cieplnego w pomieszczeniach wybranego jednorodzinnego budynku mieszkalnego, wzniesionego w roku 1970 na terenie Białymstoku, po wykonaniu termomodernizacji tego budynku w sierpniu-październiku 2009 roku. Termomodernizacja obejmowała dodatkowe ocieplenie

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: kowalewskigrzesiu@gmail.com

ścian zewnętrznych, stropodachu, stropu nad piwnicą nieogrzewaną oraz wymianę okien, bez zmiany źródła ciepła. Parametry cieplne przegród zostały dostosowane do wymagań aktualnych dla roku 2012.

2. Metody oceny warunków komfortu cieplnego

Środowisko przeznaczone na pobyt ludzi powinno być stworzone w taki sposób, aby przebywające w nim osoby nie czuły się ani za ciepło, ani za zimno. Powinno dążyć się do tego, aby odczucia kształtowały się w strefie, w której komfort jest zachowany. Najważniejszymi parametrami wpływającymi na stan komfortu cieplnego wnętrza są (Dylla, 2015):

- temperatura powietrza wewnętrznego t_i [°C],
- średnia temperatura promieniowania t_r [°C],
- prędkość przepływu powietrza v [m/s],
- ciśnienie cząstkowe pary wodnej w pomieszczeniu p [Pa] lub [%],
- metabolizm ludzi w pomieszczeniu Q [W],
- opór przewodzenia ciepła przez odzież R_{ci} [clo].

Według norm, obowiązujących w wielu krajach, klasyfikacja stopnia komfortu cieplnego pomieszczeń została powiązana jedynie z temperaturą powietrza wewnętrznego. Do oceny komfortu uwzględnia się temperaturę wynikową t_M , czyli kombinację t_i oraz t_r . Według Missenarda (Dylla, 2015) wartość t_M określa się za pomocą wzoru:

$$t_M = \frac{h_c \cdot t_i + h_r \cdot t_r}{h_c + h_r} \quad (1)$$

gdzie h_c i h_r są współczynnikami przejmowania ciepła, odpowiednio przez konwekcję i promieniowanie w $W/m^2 \cdot K$.

Bardziej kompleksową ocenę zapewnia metoda van Zuilena (Dylla, 2015), wiążąca poziom komfortu z relacją czterech parametrów:

$$S = M + 0,25 \cdot (t_i + t_r) + 0,1 \cdot x - 0,1 \cdot (37,8 - t_i) \cdot \sqrt{v} \quad (2)$$

gdzie: t_i jest temperaturą powietrza wewnętrznego w °C, t_r jest średnią temperaturą promieniowania w °C, x jest zawartością pary wodnej w powietrzu w g/kg, v jest prędkością przepływu powietrza w m/s, M jest stałą (dla okresu grzewczego +9,2, a poza okresem grzewczym +10,6).

Do przeprowadzenia analizy komfortu cieplnego w niniejszym badaniu wykorzystano metodę Fangera (Fanger, 1974). Bazuje ona na zjawisku równowagi termicznej ludzkiego ciała. Komfort cieplny wyraża się za pomocą wskaźników PMV (*Predicted Mean Vote*) i PPD (*Predicted Percentage Dissatisfied*). Wskaźnik PMV charakteryzuje się w 7 stopniowej skali wrażenia cieplnego człowieka, natomiast wskaźnik PPD prezentuje procentowy udział osób niezadowolonych w powstałej równowadze cieplnej (Fanger, 1974). Pełne równanie pozwalające określić wskaźnik PMV wygląda następująco:

$$PMV = [0,303 \exp(-0,036M) + 0,028] \cdot \left\{ (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99(M - W) - p_a] - 0,42[(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} M (5867 - p_a) - 0,001 \cdot 4M(34 - t_i) - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_{cl} (t_{cl} - t_i) \right\} \quad (3)$$

gdzie: M jest poziomem metabolizmu, który należy oszacować na podstawie aktywności osób przebywających w pomieszczeniu w W/m^2 , W jest pracą zewnętrzną w W/m^2 , p_a jest cząstkowym ciśnieniem pary wodnej w Pa, t_i jest temperaturą powietrza wewnętrznego w °C, t_r jest średnią temperaturą promieniowania w °C, t_{cl} jest temperaturą powierzchni odzieży w °C, f_{cl} jest stosunkiem pola powierzchni ciała odkrytego odzieżą do pola powierzchni ciała odkrytego, h_{cl} jest współczynnikiem przejmowania ciepła przez konwekcję w $W/m^2 \cdot K$.

Temperaturę powierzchni odzieży wyznacza się w następujący sposób:

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028(M - W) - I_{cl} (3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl}) \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} h_{cl} (t_{cl} - t_i) \quad (4)$$

gdzie I_{cl} jest oporem cieplnym odzieży w $m^2 \cdot K/W$.

Drugim istotnym wskaźnikiem zaproponowanym przez Fangera jest PPD , który określa przewidywany odsetek niezadowolonych z warunków cieplnych panujących w pomieszczeniu (Fanger, 1974). Wskaźnik ten jest związany zależnością ze wskaźnikiem PMV :

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp[-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)] \quad (5)$$

Dla warunków komfortu cieplnego zaleca się, aby wskaźnik PMV mieścił się w zakresie: $-0,5 < PMV < +0,5$, co odpowiada $PPD < 10\%$ (Fanger, 1974).

Podsumowując przegląd metod, można stwierdzić, że zakres temperatury powietrza, w której człowiek czuje się dobrze, jest bardzo zróżnicowany. Zależy on od preferencji osobistych, ubrania, odżywienia, pory roku, wieku, a nawet płci. Na przykład, temperatury zapewniające dobre samopoczucie są zazwyczaj wyższe dla kobiet i osób starszych niż dla mężczyzn i osób młodszych. Ponadto, w wyższych temperaturach człowiek czuje się lepiej latem niż zimą.

3. Opis rozwiązania architektoniczno-budowlanego wybranego budynku mieszkalnego

Budynek usytuowany jest w Białymstoku przy ul. Cyprysowej. Wybudowano go w roku 1970, jako typowy dom jednorodzinny, wolnostojący. Teren, na którym znajduje się obiekt jest płaski. Najbliższe otoczenie budynku stanowią inne budynki mieszkalne nieocieniające go.

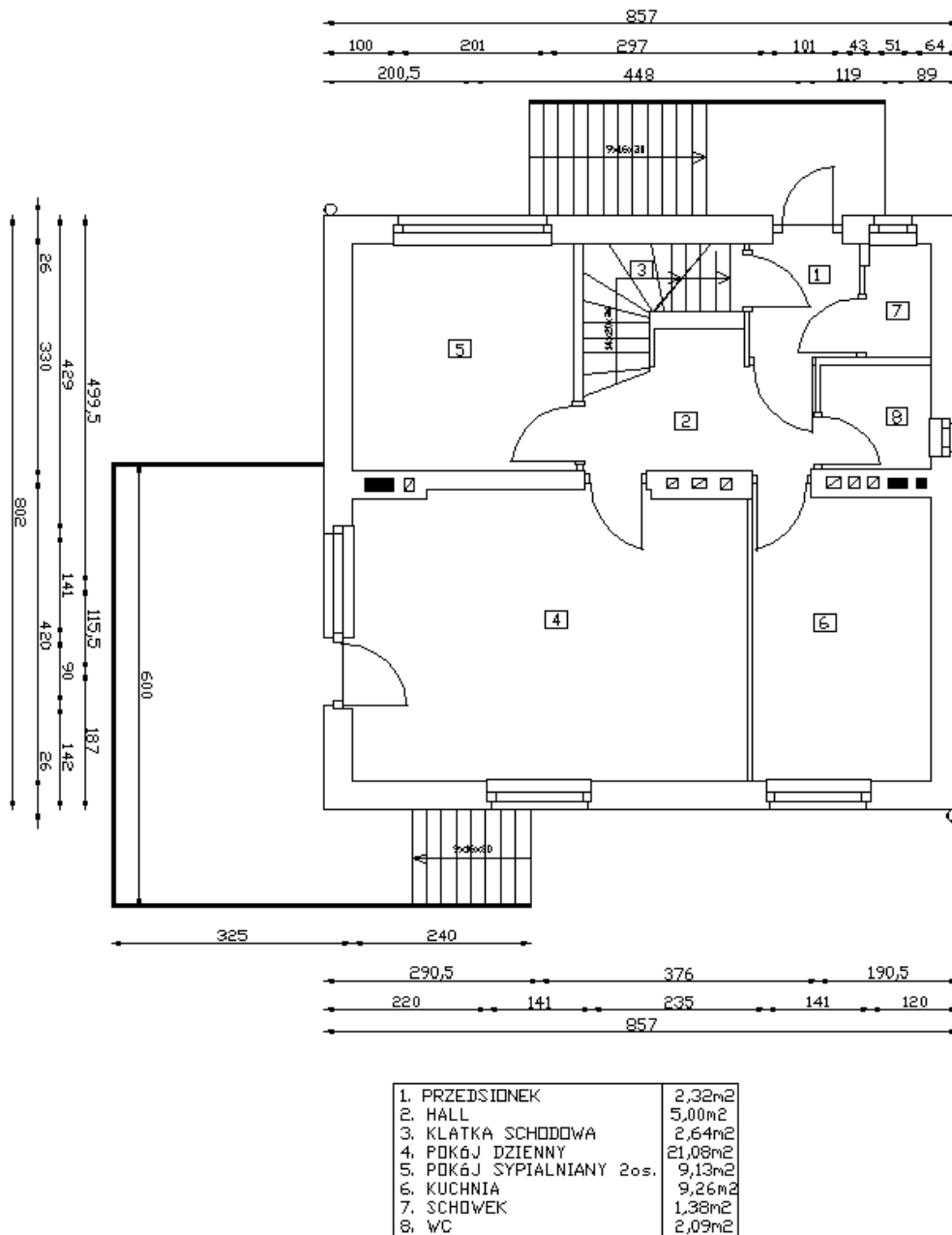
Rzut analizowanego budynku (rys. 1) ma wymiary bliskie kwadratu i wynoszące 857×802 cm. Budynek jest przeznaczony dla 8 osobowej rodziny. Jest on prostą bryłą o dwuspadowym płaskim dachu. Elewacja północna jest frontálną, usytuowano na niej 4 okna i wejście główne.

Wykończenie ścian budynku zostało wykonane z tynku wapienno-cementowego w kolorze beżowym. Cokoły są wykonane z tynku cementowego.

Na parterze zaprojektowano część dzienną: pokój sypialniany, kuchnię oraz WC. Powierzchnie pomieszczeń podano na rysunku 2. Na poddaszu znajdują się trzy sypialnie i łazienka. Wysokość parteru i poddasza wynosi 2,5 m. Budynek jest podpiwniczony. Wysokość piwnicy wynosi 2,20 m. W piwnicy znajduje się garaż, kotłownia ze źródłem centralnego ogrzewania (kocioł gazowy), pomieszczenie gospodarcze, a także pralnia.



Rys. 1. Elewacja północna



Rys. 2. Rzut parteru analizowanego budynku

Rozwiązania konstrukcyjne budynku podano na rysunku 3. Konstrukcja ścian zewnętrznych przed termomodernizacją składała się z muru ceglanego z cegły kratówki grubości 38 cm oraz warstwy tynku cementowo-wapiennego od wewnątrz i od zewnątrz grubości 1,5 cm. Podczas termomodernizacji ściany zewnętrzne zostały ocieplone od strony zewnętrznej z wykorzystaniem metody lekkiej mokrej. Płyty termoizolacyjne przyklejono do ściany masą klejącą. Jako materiał izolacyjny użyto srebrnoszarego styropianu z uszlachetnioną kompozycją grafitu, którego współczynnik przewodzenia ciepła wynosi $\lambda = 0,031 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (PN-EN ISO 6946:1999 *Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania*). Grubość warstwy styropianu przyjęto 15 cm. Oznacza to, że według obliczeń autorów współczynnik przenikania ciepła po zastosowaniu dodatkowej termoizolacji tych ścian zmienił się od $U = 1,14 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ do $U = 0,24 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

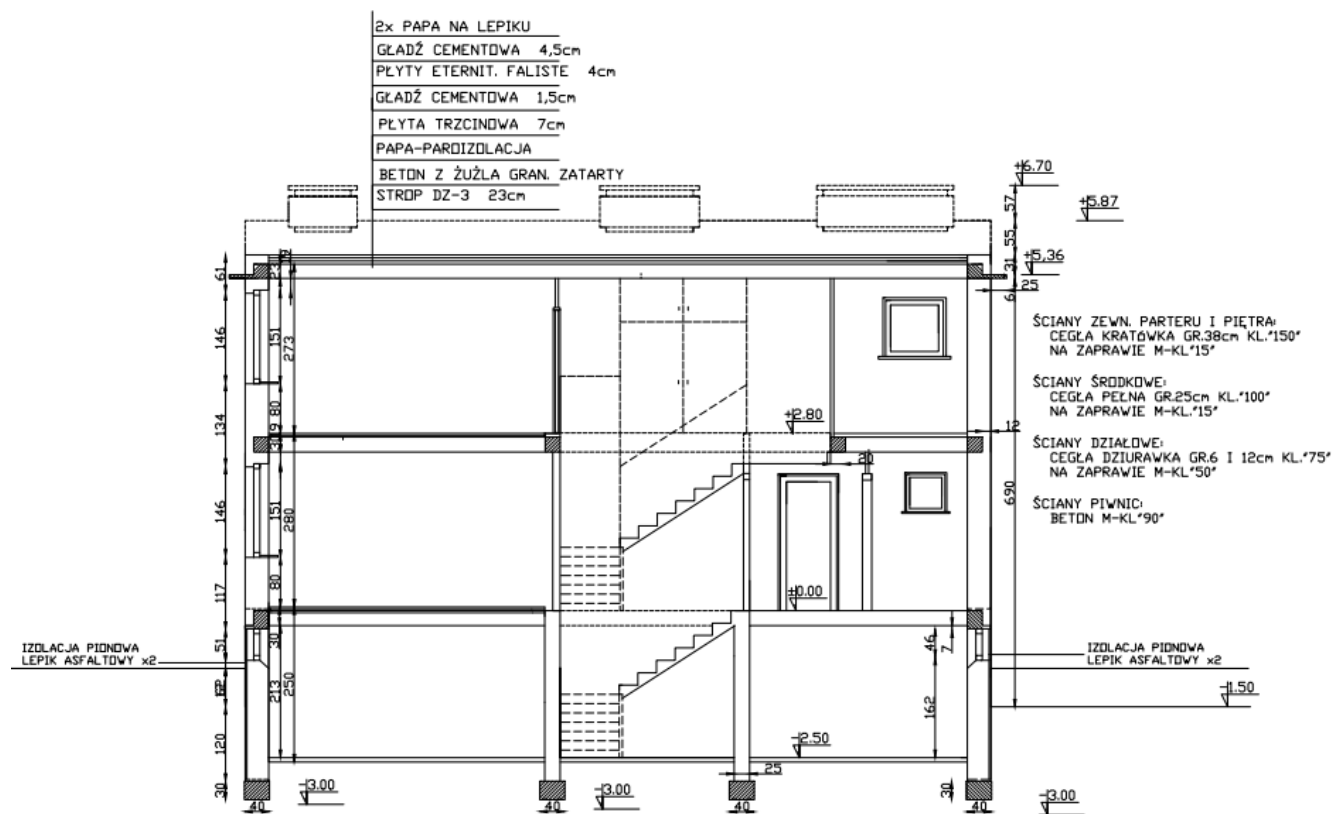
Termomodernizację stropodachu przeprowadzono dwuwarstwowym zestawem niepalnej izolacji termicznej do dachów płaskich składającym się z płyt wełny mineralnej szklanej, stosowanych pod bezpośrednie krycie papą. System dwuwarstwowo pozwalał na wyeliminowanie liniowych mostków termicznych na stykach płyt. Do izolacji termicznej użyto zestawu płyt z twardej wełny mineralnej o współczynniku

$\lambda = 0,038 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ grubości 15 cm. W wyniku ich zastosowania współczynnik przenikania ciepła zmalał od $U = 0,50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ do $U = 0,22 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

Do izolacji termicznej stropu nad piwnicą zastosowano płyty ze skalnej wełny mineralnej. Izolację termiczną umieszczano na spodniej powierzchni stropu powodując w ten sposób ograniczenie wpływu mostków termicznych w miejscach jego styku ze ścianami. Niepalne płyty z wełny mineralnej o współczynniku $\lambda = 0,035 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, grubości 5 cm mocowane są za pomocą zapraw klejących. Rolę warstwy wykończeniowej pełni zaprawa cementowa. Współczynnik przenikania ciepła po dociepleniu zmienił się od $U = 0,88 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ do $U = 0,39 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

Współczynnik przenikania ciepła wymienionego okna jednoskrzydłowego rozwierano-uchylanego o wymiarach $1230 \times 1480 \text{ mm}$ z szybą standardową według danych producenta wynosi $U = 1,22 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Wcześniej zamontowane okna według przybliżonej oceny miały $U = 1,80 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

W budynku wbudowano wentylację grawitacyjną kanałową. Kanały o wymiarach $14 \times 14 \text{ cm}$ i $14 \times 20 \text{ cm}$ umieszczono w ścianach wewnętrznych. Grubość ścian w miejscu kanałów wentylacyjnych wynosi 38 cm. System wentylacji podczas termomodernizacji nie uległ zmianie. Również nie uległ zmianie sprawnie działający kocioł gazowy.



Rys. 3. Charakterystyczny przekrój pionowy analizowanego budynku

Przed rozpoczęciem robót termomodernizacyjnych (styczeń 2009 roku) przeprowadzono pomiary parametrów charakteryzujących mikroklimat w wybranych pomieszczeniach rozpatrywanego budynku, a mianowicie temperatury powietrza wewnętrznego, wilgotności względnej oraz prędkości ruchu powietrza. Po realizacji w roku 2009 opisanych wyżej przedsięwzięć termomodernizacyjnych analizowany budynek był eksploatowany w ciągu 3 lat przed ponownym przeprowadzeniem pomiarów parametrów mikroklimatu i oceną komfortu cieplnego w jego pomieszczeniach. Taki okres pozwoli na wyschnięcie elementów przegród budowlanych po zakończeniu działań termomodernizacyjnych oraz osiągnięcie ustabilizowanego stanu wilgotności.

4. Wyniki pomiarów parametrów mikroklimatu oraz analiza warunków komfortu cieplnego

W styczniu 2012 roku wykonano badanie parametrów mikroklimatu w pomieszczeniach rozpatrywanego budynku. Temperaturę powietrza mierzono przy pomocy termometru cieczowego. Średnią temperaturę na wewnętrznej powierzchni ścian zmierzono termometrem termoelektrycznym. Pomiar wilgotności względnej powietrza dokonano za pomocą psychrometru Assmana. Dla każdego z parametrów dokonano po 10 pomiarów w każdym z trzech pomieszczeń rozpatrywanego budynku. Wyniki pomiarów zostały uśrednione najpierw dla każdego z pomieszczeń a potem dla całego budynku. Średnie wartości tych parametrów dla

całego budynku przed i po termomodernizacji w celu porównania zestawiono w tabeli 1.

Jak wynika z tabeli 1, podstawowe parametry mikroklimatu po termomodernizacji zostały istotnie zmienione. Temperatura powietrza wewnętrznego wzrosła o 22,2%; temperatura na powierzchni wewnętrznej ścian zewnętrznych wzrosła o 31,0%; wilgotność względna powietrza wewnętrznego zwiększyła się o 25%. W wyniku tych zmian mieszkańcy narzekali na odczucie duszności i zbyt ciepłego powietrza w pomieszczeniach. Na zlecenie właściciela powstała konieczność sprawdzenia warunków komfortu cieplnego w pomieszczeniach rozpatrywanego budynku.

W pierwszym etapie przeanalizowano możliwe efekty wpływu każdego z parametrów w tabeli 1 na wskaźnik komfortu *PMV*. W tym celu wykorzystano zależności graficzne tego wskaźnika od każdego z trzech badanych parametrów mikroklimatu. Jako pierwszy parametr przeanalizowano wpływ temperatury powietrza wewnętrznego. Wstępnie na podstawie obliczeń wskaźnika przy zmianie t_i od 10°C do 26°C opracowano wykres zależności $PMV = f(t_i)$ (rys. 4). Pozostałe parametry niezbędne do wykonania obliczeń *PMV* (metabolizm, praca zewnętrzna, oporność cieplna odzieży, prędkość przepływu powietrza, stosunek pola powierzchni ciała odkrytego odzieżą do pola powierzchni ciała odkrytego, temperatura powierzchni odzieży) przyjęto jako stałe, uśrednione i charakterystyczne dla pomieszczeń budynków mieszkalnych. Wartości tych parametrów podano w tabeli 2.

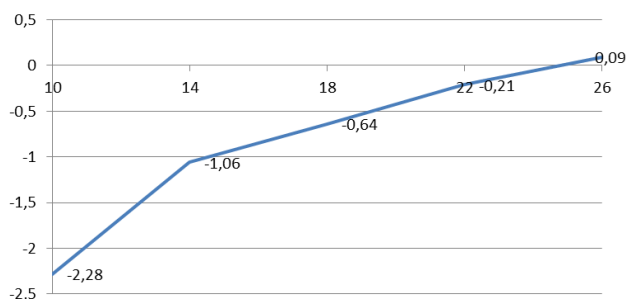
Tab. 1. Zestawienie wyników pomiarów parametrów mikroklimatu w rozpatrywanym budynku

Numer	Parametry mikroklimatu	Przed termomodernizacją (w roku 2009)	Po termomodernizacji (w roku 2012)
1	Temperatura powietrza wewnętrznego, [°C]	18,5	22,6
2	Wilgotność względna powietrza wewnętrznego, [%]	38	63
3	Temperatura na powierzchni wewnętrznej ścian zewnętrznych [°C]	15,5	20,3

Tab. 2. Zestawienie danych wejściowych do obliczeń programem MIKROKLIMAT

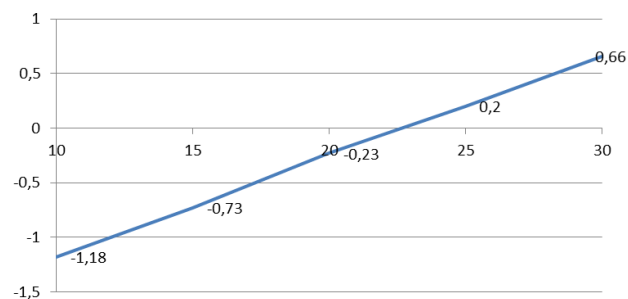
Czynniki komfortu cieplnego		Przed termomodernizacją	Po termomodernizacji
Metabolizm	W/m ²	70 wypoczynek w pozycji stojącej, aktywność niewielka w pozycji siedzącej	70 wypoczynek w pozycji stojącej, aktywność niewielka w pozycji siedzącej
Praca zewnętrzna	W/m ²	20 wykonywane niewielkie czynności	10 wykonywane drobne czynności
Oporność cieplna odzieży	m ² ·°C/W	0,23 odzież europejska: bielizna bawełniana z długimi rękawami i nogawkami, koszula, garnitur, wełniane skarpety i buty	0,16 odzież zimowa: bielizna, koszula z długimi rękawkami, spodnie, marynarka lub sweter z długimi rękawkami, grube skarpety i półbuty
Temperatura powietrza	°C	18,5	22,6
Średnia temperatura promieniowania	°C	15,5	20,3
Prędkość przepływu powietrza	m/s	0,08	0,035
Ciśnienie pary wodnej	Pa	810,2	1728,7

Korzystając z rysunku 4 stwierdzono, że zmiana temperatury powietrza istotnie wpływa na wskaźnik *PMV*. Wahania wskaźnika *PMV* najbardziej widać przy wartościach t_i od 10°C do 14°C, potem zależność ta słabnie. Zmierzone temperatury w analizowanym budynku wskazywały, że przy temperaturze przed termomodernizacją (18,5°C) występowały warunki poniżej dolnej granicy komfortu. Natomiast przy temperaturze po termomodernizacji (22,6°C) został zapewniony komfort cieplny w pomieszczeniu, graniczne wartości, którego mieszczą się w zakresie temperatur t_i od 19,5°C do 26°C.



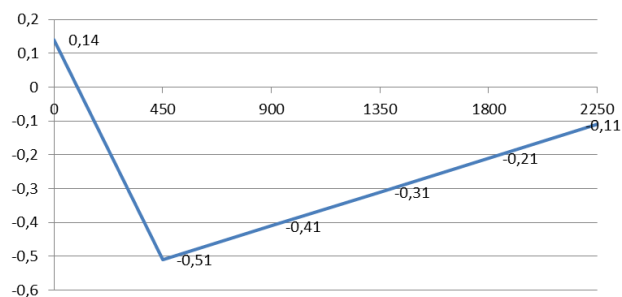
Rys. 4. Zależność *PMV* od temperatury powietrza wewnętrznego t_i , °C

Następnie przeanalizowano wpływ temperatury na powierzchni wewnętrznej ścian zewnętrznych t_r [°C] na *PMV*. Na opracowanym wykresie (rys. 5) zależności $PMV = f(t_r)$ wykazano, że zmiana temperatury promieniowania również istotnie wpływa na wskaźnik *PMV*. Komfort cieplny osiągnięty jest w temperaturach t_r od 18,5°C do 27°C. Oznacza to, że przy temperaturze t_r przed termomodernizacją (15,5°C) występowały warunki poniżej granicy komfortu. Natomiast przy podwyższeniu temperatury t_r po termomodernizacji (20,3°C) został zapewniony komfort cieplny.



Rys. 5. Zależność *PMV* od średniej temperatury promieniowania t_r , °C

Dalej przeanalizowano wpływ ciśnienia pary wodnej p [Pa] na wskaźnik *PMV*. W tym celu, wykorzystując dane z tabeli 1, wyliczono wartości ciśnienia pary wodnej p w pomieszczeniu przed i po termomodernizacji, które wynosiły odpowiednio $p_0 = 808,86$ Pa oraz $p_t = 1726,58$ Pa. Z rysunku 6 można odczytać, że obie wartości wskaźnika *PMV* zapewniają komfort cieplny.



Rys. 6. Zależność *PMV* od ciśnienia pary wodnej p , Pa

Jak wynika z przeprowadzonej analizy wpływu poszczególnych czynników, warunki komfortowe w pomieszczeniach budynku wyraźnie się poprawiły. Narzekanie mieszkańców na duszność oraz życzenie właściciela zdeterminowały kontynuację badań poprzez wykonanie kompleksowej oceny komfortu przy jednoczesnym uwzględnieniu całego zespołu czynników. Przy czym została podjęta decyzja o wykonaniu obliczeń wskaźnika *PMV* dla budynku przed i po termomodernizacji.

Do obliczeń zostały sprecyzowane wartości wszystkich parametrów w analizowanym budynku, od których zależy wskaźnik *PMV*. Dokonano obliczeń wskaźnika *PMV* przy podanych niżej parametrach:

- metabolizm 70 W/m² (wypoczynek w pozycji stojącej, aktywność niewielka w pozycji siedzącej),
- praca zewnętrzna 10 W/m² (wykonywane niewielkie czynności),
- oporność cieplna odzieży 0,16 m²·°C/W (odzież zimowa: bielizna, koszula z długimi rękawkami, spodnie, marynarka lub sweter z długimi rękawkami, grube skarpety i półbuty),
- prędkość przepływu powietrza 0,035 m/s,
- ciśnienie pary wodnej 1728,7 Pa.

W tabeli 2 podano wartości tych parametrów przed i po termomodernizacji.

Wyniki obliczeń, przedstawione w tabeli 3, pozwoliły ustalić, że przed termomodernizacją w pomieszczeniach mieszkalnych analizowanego budynku panowały niekomfortowe warunki. O tym świadczy wartość wskaźnika *PMV* wynosząca -0,97, co przekracza dolną granicę komfortu -0,5. Wrażenia cieplne mieszkańców w siedmiostopniowej skali ocen kształtowały się na poziomie „dość chłodno”, a przewidywany odsetek osób niezadowolonych sięga prawie 25%, co przekracza wartość graniczną określoną dla warunków komfortu cieplnego.

Po przeprowadzeniu termomodernizacji budynku wskaźnik *PMV* okazał się równy +0,23 i mieścił się w granicach komfortu (-0,5 ÷ +0,5). Odczucia cieplne określone przy pomocy siedmiostopniowej skali opisuje się na poziomie „obojętnie-dość ciepło”. Przewidywany odsetek niezadowolonych, równy 6,1%, mieści się w granicach zakresu warunków komfortu cieplnego i nie przekracza 10%.

Tab. 3. Wyniki obliczeń wygenerowane za pomocą programu MIKROKLIMAT

Wyniki		Przed termomodernizacją	Po termomodernizacji
Stosunek pola powierzchni ciała okrytego odzieżą do pola powierzchni ciała odkrytego	f_{cl}	1,198	1,153
Temperatura powierzchni odzieży, °C	t_{cl}	22,65	26,60
Przewidywana średnia ocena	PMV	-0,97	+0,23
Przewidywany odsetek niezadowolonych, %	PPD	24,9	6,1

Badanie potwierdziło poprawę warunków komfortu w pomieszczeniach rozpatrywanego budynku. Jednak nie pozwoliło wyjaśnić przyczyny narzekań mieszkańców. Zauważono, że w pomieszczeniach budynku po termomodernizacji istotnie spadła prędkość przepływu powietrza. Po przeanalizowaniu systemu wentylacji w budynku oraz właściwości zastosowanej stolarki okiennej wykryto, że w budynku brakuje świeżego powietrza, a zanieczyszczone powietrze jest nieefektywnie usuwane na zewnątrz. Przebieg strumieni powietrza utrudniła nowa szczelna stolarka. To odbiło się na prawie dwukrotnym obniżeniu prędkości przepływu powietrza i doprowadziło do podwyższenia wilgotności względnej oraz stężenia zanieczyszczeń w powietrzu. Mieszkańcy zareagowali narzekaniem na odczucie duszności. Właścicielowi zaproponowano usprawnienie dopływu świeżego powietrza, na przykład poprzez zastosowanie nawiewników okiennych, w celu zapewnienia efektywnej wentylacji w pomieszczeniach budynku.

5. Wnioski

- Po analizie warunków komfortu w budynku poddanym termomodernizacji stwierdzono istotną poprawę wskaźników komfortu. Wskaźnik PMV wzrósł z $-0,97$ do $+0,23$, a wskaźnik PPD obniżył się z $24,9\%$ do $6,1\%$. Nowe wartości wskaźników mieściły się w zalecanym zakresie $-0,5 < PMV < +0,5$ oraz $PPD < 10\%$.
- Zastosowanie nowej szczelnej stolarki okiennej obniżyło efektywność wentylacji, co odbiło się na prawie dwukrotnym obniżeniu prędkości przepływu powietrza w pomieszczeniach. Doprowadziło to do podwyższenia wilgotności względnej i stężenia zanieczyszczeń w powietrzu oraz odczucia duszności u mieszkańców.
- W celu poprawy sytuacji zalecano usprawnienie dopływu świeżego powietrza do zapewnienia efektywnej wentylacji w budynku poprzez zastosowanie nawiewników okiennych.

Literatura

- Dylla A. (2015). Fizyka cieplna budowli w praktyce. Wydawnictwo PWN, Warszawa.
- Fanger P.O. (1974). Komfort cieplny. Wydawnictwo Arkady, Warszawa.
- Klemm P. (2005). Budownictwo ogólne. Wydawnictwo Arkady, Warszawa.
- Śliwowski L. (1999). Mikroklimat wnętrz i komfort cieplny ludzi w pomieszczeniach. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.

ASSESSMENT OF THERMAL COMFORT IN THE SINGLE-FAMILY RESIDENTIAL BUILDING AFTER ITS THERMAL-MODERNISATION

Abstract: The paper contains an assessment of the indoor thermal comfort in a single-family residential building after its thermal-modernisation. The building established in 1970 is located in Białystok at Cyprysowa street. Thermo-modernisation of the building was made according to the current requirements of thermal protection in year 2012. The thermo-modernization projects included additional insulation of external walls, ceiling over unheated basement and replacement of windows, without change of heat source. Thermo-modernisation significantly changed the indoor comfort conditions in the building. Based on the data on the microclimate parameters in the building, the conditions of thermal comfort were analysed. The Fanger comfort assessment method using PMV and PPD indicators were used in the analysis. Significant improvements in comfort conditions were identified, which affected ambiguously the health of the inhabitants.