


Wpływ systemów szklarniowych na zapotrzebowanie na ciepło pomieszczeń mieszkalnych – porównanie metod obliczeń wg ISO 13790

Magdalena Grudzińska

*Katedra Budownictwa Ogólnego; Wydział Budownictwa i Architektury; Politechnika Lubelska;
ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, Polska;
m.grudzinska@pollub.pl  0000-0001-9271-8797*

Streszczenie: Metoda obliczeń zapotrzebowania na energię zawarta w normie ISO 13790 powstała w trakcie realizacji projektu badawczego PASSYS. Jego celem było opracowanie sposobu wyznaczania zapotrzebowania na ciepło, dającego możliwość uwzględnienia w bilansie energetycznym pasywnych systemów słonecznych, m.in. systemów szklarniowych. Dla tych systemów norma prezentuje dwie metody obliczeniowe – pełną i uproszczoną, różniące się podstawowymi założeniami i sposobem uwzględniania zysków słonecznych w przestrzeni słonecznej i przyległych pomieszczeniach ogrzewanych. Równania zawarte w normie są sformułowane w sposób bardzo ogólnikowy, a interpretacja metod obliczeń budzi pewne wątpliwości, szczególnie w zakresie modelowania rozkładu promieniowania słonecznego wewnątrz szklarni. W pracy przedstawiono dyskusję założeń przyjmowanych w metodzie pełnej i uproszczonej, a także własne propozycje modyfikacji algorytmów obliczeniowych. Zaproponowana metoda obliczeń pozwoliła w zadowalający sposób odwzorować funkcjonowanie przykładowej szklarni o stosunkowo małej powierzchni oszklenia i wysokiej absorpcyjności obudowy, zbliżonej pod względem użycia promieniowania słonecznego do tradycyjnych pomieszczeń. Zjawiska typowe dla przestrzeni o dużej powierzchni oszklenia, takie jak retransmisja promieniowania odbitego, nie zostały uwzględnione w wystarczającym stopniu w metodzie zawartej w opisywanej normie.

Słowa kluczowe: systemy szklarniowe, zapotrzebowanie na ciepło, ISO 13790, symulacje dynamiczne

1. Wstęp

Aktualna wersja normy ISO 13790 została przyjęta przez Europejski Komitet Normalizacyjny (CEN) w 2008 roku, a jej polska wersja została zatwierdzona rok później jako norma PN-EN ISO 13790 „Energetyczne właściwości użytkowe budynków. Obliczanie zużycia energii na potrzeby ogrzewania i chłodzenia” [1]. Co prawda polska wersja normy nie jest

przywołana w rozporządzeniu w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [2], jednak oparta jest na niej obowiązująca metodologia sporządzania świadectw charakterystyki energetycznej budynków [3]. Przedstawiana w normie metoda obliczeń, wykorzystująca bezwymiarowy czynnik wykorzystania zysków ciepła, powstała w trakcie realizacji projektu badawczego PASSYS [4]. Jego celem było opracowanie sposobu wyznaczania zapotrzebowania na energię uwzględniającej wpływ pasywnych systemów słonecznych. Norma 13790 została w 2017 roku zastąpiona przez ISO 52016-1 [5], również przedstawiającą metodę obliczeń uwzględniającą wpływ szklarni na zapotrzebowanie na energię. Metoda ta wymaga znajomości składowych kierunkowych i rozproszonych promieniowania słonecznego. Może to ograniczać jej wykorzystanie w Polsce, ponieważ dane zawarte w Typowych Latach Meteorologicznych dla płaszczyzn nachylonych podają jedynie całkowite natężenie promieniowania.

Zawarte w normie metody quasi-stacjonarne oparte są na założeniu ustalonego przepływu ciepła w przegrodach budowlanych. Obliczenia przeprowadza się uśredniając parametry klimatyczne dla dość długich okresów czasu (np. jeden miesiąc lub cały sezon grzewczy). Zjawiska związane z dynamicznym zachowaniem budynku, takie jak akumulacja i uwalnianie ciepła, są uwzględniane pośrednio dzięki wprowadzeniu bezwymiarowego współczynnika wykorzystania zysków energetycznych.

Załącznik E normy [1] zawiera dwie metody obliczeniowe dla przestrzeni słonecznych nieklimatyzowanych – pełną i uproszczoną, różniące się podstawowymi założeniami oraz sposobem uwzględniania zysków słonecznych w przestrzeni szklarni i przyległych pomieszczeniach ogrzewanych. Równania zawarte w normie są sformułowane w sposób dość ogólnikowy, a interpretacja metod obliczeń budzi pewne wątpliwości, szczególnie w zakresie modelowania rozkładu promieniowania słonecznego wewnątrz przestrzeni słonecznej. Problemy te były kilkakrotnie opisywane w literaturze przedmiotu [6, 7], jednak nie doczekały się jeszcze kompleksowego rozwiązania.

Artykuł przedstawia własne propozycje modyfikacji obu metod, korygujące nieścisłości algorytmów obliczeniowych. Wyniki uzyskane przy pomocy zmodyfikowanej metody pełnej i uproszczonej stanu quasi-ustalonego porównane są z wynikami bardziej dokładnych symulacji dynamicznych z krokiem godzinowym, co pozwoliło na ustalenie zalecanego zakresu stosowania każdej z metod.

2. Metody PN-EN ISO 13790

Zapotrzebowanie na ciepło w miesięcznej metodzie quasi-stacjonarnej wyznacza się jako:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} Q_{H,gn} \quad (1)$$

gdzie: $Q_{H,nd}$ – zapotrzebowanie na energię do ogrzewania w ciągu kroku czasowego [MJ], $Q_{H,ht}$ – całkowite przenoszenie ciepła, uwzględniające straty ciepła przez obudowę budynku lub pomieszczeń i straty ciepła na ogrzanie powietrza wentylacyjnego [MJ], $Q_{H,gn}$ – całkowite zyski ciepła, uwzględniające zyski bytowe i pochodzące od promieniowania słonecznego [MJ]

$\eta_{H,gn}$ – czynnik wykorzystania zysków ciepła:

$$\eta_{H,gn} = \frac{1 - \gamma_H^{a_H}}{1 - \gamma_H^{a_H+1}} \quad \text{dla } \gamma_H > 0 \text{ oraz } \gamma_H \neq 1 \quad (2)$$

$$\eta_{H,gn} = \frac{a_H}{a_H + 1} \quad \text{dla } \gamma_H = 1 \quad (3)$$

γ_H – stosunek zysków ciepła do strat:

$$\gamma_H = \frac{Q_{H,gn}}{Q_{H,ht}} \quad (4)$$

a_H – bezwymiarowy parametr liczbowy

$$a_H = a_{H,0} + \frac{\tau}{\tau_{H,0}} \quad (5)$$

$a_{H,0}$ – referencyjny parametr liczbowy ustalany na poziomie krajowym, dla metody miesięcznej $a_{H,0} = 1$ [–], $\tau_{H,0}$ – stała czasowa odniesienia ustalana na poziomie krajowym, dla metody miesięcznej $\tau_{H,0} = 15$ godzin, τ – stała czasowa strefy budynku, charakteryzująca wewnętrzną bezwładność cieplną [godziny]

$$\tau = \frac{C_m / 3600}{H_{tr} + H_{ve}} \quad (6)$$

C_m – wewnętrzna pojemność cieplna strefy [J/K], H_{tr} – całkowity współczynnik strat ciepła przez przenikanie [W/K], H_{ve} – całkowity współczynnik strat ciepła przez wentylację [W/K].

2.1. Zyski ciepła od przestrzeni słonecznej – metoda pełna

Metoda prezentowana w normie może być wykorzystywana tylko przy ocenie przestrzeni słonecznych nieklimatyzowanych, czyli nie ogrzewanych ani nie chłodzonych. W ścianie działowej między pomieszczeniem mieszkalnym a szklarnią wyklucza się obecność stałych otworów umożliwiających przepływ powietrza – jeżeli takie istnieją, przestrzeń słoneczną należy traktować w obliczeniach jako część przestrzeni klimatyzowanej.

Straty ciepła przez przegrodę działową między pomieszczeniem klimatyzowanym a przestrzenią słoneczną wyznaczane są z uwzględnieniem współczynnika korekty temperatury $b_{tr} < 1$, co oznacza przekazywanie ciepła do środowiska o temperaturze wyższej niż temperatura zewnętrzna. Podczas jego obliczania (równanie (7)) nie uwzględnia się wpływu zysków słonecznych na temperaturę w szklarni θ_s , a jedynie przenoszenie ciepła przez ścianę działową i obudowę szklarni. Jest to kompensowane uwzględnieniem w bilansie energetycznym pomieszczenia mieszkalnego słonecznych zysków pośrednich z przestrzeni słonecznej Q_{si} .

Czynnik korekty temperatury wyznacza się jako:

$$b_{tr} = \frac{\theta_{int,H} - \theta_s}{\theta_{int,H} - \theta_e} = \frac{H_{se}}{H_{is} + H_{se}} \quad (7)$$

$$\theta_s = \frac{\theta_{int,H} H_{is} + \theta_e H_{se}}{H_{is} + H_{se}} \quad (8)$$

gdzie: $\theta_{int,H}$ – nastawa temperatury w pomieszczeniu mieszkalnym dla okresu ogrzewania [°C], θ_e – średnia temperatura zewnętrzna w danym kroku obliczeniowym [°C], θ_s – średnia temperatura wewnętrzna w przestrzeni słonecznej w danym kroku obliczeniowym [°C], H_{is} – współczynnik przenoszenia ciepła przez przegrodę działową między pomieszczeniem mieszkalnym a balkonem [W/K], H_{se} – współczynnik przenoszenia ciepła przez obudowę balkonu na zewnątrz [W/K].

Zyski ciepła w strefie ogrzewanej budynku uzyskiwane za pośrednictwem szklarni Q_{ss} [MJ] traktuje się jako sumę zysków bezpośrednich Q_{sd} i pośrednich Q_{si} :

$$Q_{ss} = Q_{sd} + Q_{si} \quad (9)$$

Zyski bezpośrednie docierają do strefy klimatyzowanej poprzez ścianę działową między szklarnią a pomieszczeniem mieszkalnym. Są to zyski pochodzące od wielokrotnej transmisji (najpierw przez oszklenie przestrzeni słonecznej, a następnie przez elementy oszkłone, np. okna lub drzwi, w ścianie działowej), lub absorpcji promieniowania na powierzchni przegrody działowej. Zyski bezpośrednie wyznaczone są wg PN-EN ISO 13790 jako:

$$Q_{sd} = F_{sh,e} (1 - F_{F,e}) g_e \left((1 - F_{F,w}) g_w A_w + \alpha_p A_p \frac{H_{p,tot}}{H_{p,e}} \right) I_p t \quad (10)$$

gdzie: $F_{sh,e}$ – czynnik redukcji ze względu na zacienienie szklarni od przeszkód zewnętrznych (budynków, drzew, wzgórz, elementów tego samego budynku) [–]

$$F_{sh,e} = F_{hor} F_{ov} F_{fin} \quad (11)$$

F_{hor} – czynnik redukcji od horyzontu [–], F_{ov} – czynnik redukcji od zadaszeń [–], F_{fin} – czynnik redukcji od pilastrów [–], $F_{F,e}$ – udział powierzchni ramy w powierzchni zewnętrznego oszklenia szklarni [–], $F_{F,w}$ – udział powierzchni ramy w całkowitej powierzchni okna w ścianie działowej [–], g_e – współczynnik przepuszczania energii słonecznej oszklenia szklarni [–], g_w – współczynnik przepuszczania energii słonecznej oszklenia okna w ścianie działowej [–], A_w – powierzchnia okna w ścianie działowej [m²], A_p – powierzchnia części nieprzezroczystej ściany działowej [m²], α_p – współczynnik absorpcji promieniowania na powierzchni ściany działowej [–], $H_{p,tot}$ – całkowity współczynnik przenoszenia ciepła od środowiska wewnętrznego, przez nieprzezroczystą część ściany działowej i przestrzeń słoneczną do środowiska zewnętrznego [W/K], $H_{p,e}$ – całkowity współczynnik przenoszenia ciepła od powierzchni pochłaniającej (zewnętrznej) ściany działowej przez przestrzeń słoneczną do środowiska zewnętrznego [W/K], I_p – suma natężenia promieniowania słonecznego na jednostkę powierzchni ściany działowej w danym kroku obliczeniowym [W/m²], t – długość kroku obliczeniowego [Ms].

Zyski pośrednie są to zyski przekazane do powietrza w objętości szklarni za pośrednictwem pochłaniającej promieniowanie i nagrzewającej się obudowy. Traktowane są one jako zyski pochodzące z przestrzeni nieklimatyzowanej, z czynnikiem dostosowania $(1 - b_{tr})$. Obliczane są poprzez zsumowanie zysków pochodzących od każdej nieprzezroczystej pochłaniającej powierzchni w objętości szklarni, i odjęcie zysków przekazanych bezpośrednio przez przegrodę działową na drodze przewodzenia i uwzględnionych w Q_{sd} :

$$Q_{si} = (1 - b_{tr}) F_{sh,e} (1 - F_{F,e}) g_e \sum_j (I_j \alpha_j A_j) - F_{sh,e} (1 - F_{F,e}) g_e \alpha_p A_p \frac{H_{p,tot}}{H_{p,e}} I_p t \quad (12)$$

gdzie (pozostałe oznaczenia j.w.): b_{tr} – czynnik dostosowania (korekty temperatury) w ciągu miesiąca [–], I_j – suma natężenia promieniowania słonecznego na jednostkę „j-tej” nieprzezroczystej powierzchni wewnętrznej szklarni w danym kroku obliczeniowym [W/m²], α_j – współczynnik absorpcji promieniowania „j-tej” nieprzezroczystej powierzchni wewnętrznej szklarni [–], A_j – powierzchnia „j-tej” części nieprzezroczystej powierzchni wewnętrznej szklarni [m²].

2.2. Zyski ciepła od przestrzeni słonecznej – metoda uproszczona

Na poziomie krajowym dopuszczalne jest stosowanie metody uproszczonej, zawierającej następujące modyfikacje:

- w strefie mieszkalnej ignorowane są zyski słoneczne pochodzące ze szklani – do bilansu cieplnego nie wlicza się ani zysków bezpośrednich „dostarczanych” przez część pełną i oszkloną ściany działowej, ani zysków pośrednich z absorpcji przez obudowę szklarni
- zyski te są uwzględniane w sposób zastępczy, poprzez wykorzystanie skorygowanego współczynnika dostosowania temperatury b_{tr}^* podczas obliczania przenoszenia ciepła z przestrzeni ogrzewanej do przestrzeni słonecznej; przyjmuje się wówczas, że temperatura wewnątrz szklarni θ_s^* jest wynikiem nie tylko napływu i odpływu ciepła przez obudowę (jak w metodzie pełnej), ale także zysków słonecznych w jej objętości:

$$b_{tr}^* = \frac{\theta_{int,H} - \theta_s^*}{\theta_{int,H} - \theta_e} \neq b_{tr} = \frac{H_{se}}{H_{is} + H_{se}} \quad (13)$$

$$\theta_s^* = \frac{\Phi_u + \theta_{int,H} H_{is} + \theta_e H_{se}}{H_{is} + H_{se}} \quad (14)$$

gdzie: Φ_u – średnie zyski słoneczne w objętości szklarni w kroku obliczeniowym [W].

2.3. Propozycje modyfikacji obu metod

Opisane wyżej metody wymagają pewnego komentarza, gdyż podane w normie wzory nie są do końca spójne. Po pierwsze, we wzorach (10) i (12) mnożnik $F_{sh,e} \cdot (1 - F_{F,e}) \cdot g_e$ dotyczy obudowy zewnętrznej szklarni, tzn. zacieniania, powierzchni ram i przepuszczalności oszklelenia. Powinien więc być połączony z natężeniem promieniowania padającego na obudowę zewnętrzną, a nie natężeniem promieniowania docierającego do ściany działowej I_p czy wewnętrznej części obudowy I_j . Po drugie, odjęcie we wzorze (12) składnika dotyczącego zysków bezpośrednich przez obudowę oznacza, że zyski te nie są uwzględniane w ogóle w obliczeniach (skraca się on z analogicznym składnikiem we wzorze (10)). Należałoby składnik odejmowany pomnożyć również przez $(1 - b_{tr})$, co fizycznie można zinterpretować jako pomniejszenie zysków pośrednich pochodzących od ściany działowej o część bezpośrednio przewodzoną do wnętrza przestrzeni mieszkalnej. Taki zapis znajdował się w szkicu normy, udostępnionym przez CEN w 2007 w celu zgłaszania komentarzy przed opublikowaniem wersji końcowej [7]. Po trzecie, mnożnik „t” oznaczający długość kroku obliczeniowego występuje we wzorach (10) i (12) przy składowej I_p , a jest pominięty przy składowej I_j .

Norma nie precyzuje również, w jaki sposób określać rozkład natężenia promieniowania wewnątrz przestrzeni słonecznej, oraz czy przy jego obliczaniu należy uwzględnić zyski słoneczne tracone na zewnątrz szklarni poprzez odbicie lub zyski transmitowane do wnętrza strefy mieszkalnej.

Biorąc pod uwagę powyższe zastrzeżenia, zaproponowano obliczanie zysków Q_{sd} i Q_{si} w następujący sposób:

$$Q_{sd} = \left((1 - F_{F,w}) g_w A_w + \alpha_p A_p \frac{H_{p,tot}}{H_{p,e}} \right) I_p t \quad (15)$$

gdzie (pozostałe oznaczenia j.w.):

$$I_p = f_p \frac{1}{A_w + A_p} \sum_k F_{sh,ek} A_{sol,k} I_{sol,k} \quad (16)$$

f_p – część promieniowania słonecznego przepuszczonego do wnętrza szklarni, padająca na powierzchnię ściany działowej [-], k – liczba powierzchni zbierających (oszkłonych) zewnętrznej obudowy szklarni skierowanych na poszczególne strony świata, $F_{sh,ek}$ – czynnik redukcji ze względu na zacinienie od przeszkód zewnętrznych powierzchni zbierającej „ k ” szklarni [-], $A_{sol,k}$ – efektywne pole powierzchni zbierającej „ k ” szklarni [m²], $I_{sol,k}$ – natężenie promieniowania słonecznego na płaszczyznę „ k ” zewnętrznej obudowy szklarni [W/m²],

$$A_{sol,k} = (1 - F_{F,ek}) g_{ek} A_{ek} \quad (17)$$

$F_{F,ek}$ – udział powierzchni ramy w powierzchni zewnętrznego oszklenia szklarni na płaszczyźnie „ k ” [-], g_{ek} – współczynnik przepuszczania energii słonecznej oszklenia szklarni na płaszczyźnie „ k ” [-], A_{ek} – powierzchnia zewnętrznego oszklenia szklarni na płaszczyźnie „ k ” [m²].

$$Q_{si} = (1 - b_{ir}) \left(\sum_j (I_j \alpha_j A_j) - \alpha_p A_p \frac{H_{p,tot}}{H_{p,e}} I_p \right) t \quad (18)$$

gdzie (pozostałe oznaczenia j.w.):

$$I_j = f_j \frac{1}{A_j} \sum_k F_{sh,ek} A_{sol,k} I_{sol,k} \quad (19)$$

f_j – część promieniowania słonecznego przepuszczonego do wnętrza szklarni, padająca na powierzchnię „ j ” wewnętrznej obudowy [-].

Propozycje wyznaczania współczynników f_p oraz f_j przedstawiono w punkcie 4.

3. Symulacje dynamiczne

Metody symulacyjne, o większym stopniu złożoności, przeznaczone są do wykonywania obliczeń komputerowych. Krok obliczeniowy przyjmowany tutaj jest znacznie krótszy niż w metodach quasi-stacjonarnych – może to być np. jedna godzina lub kilkanaście minut. Pozwala to uwzględnić procesy wymiany ciepła uzależnione od zmian temperatury i działania promieniowania słonecznego jako dynamiczne procesy dyskretne [9, 10]. Symulacje dynamiczne mogą też służyć do swego rodzaju „walidacji” metod mniej dokładnych (takich jak metody quasi-stacjonarne) [11,12].

Postulaty związane z możliwością wykorzystania ogólnodostępnych narzędzi symulacyjnych do modelowania systemów szklarniowych, sformułowane na podstawie różnych prac badawczych (m. in. [13, 14, 15]) zawarto w sposób syntetyczny w pracy [16]. Główne wymagania, jakie powinny spełniać programy komputerowe aby we właściwy sposób wyznaczyć yzyski słoneczne w pomieszczeniach o dużym stopniu oszklenia, są następujące:

- możliwość definicji rzeczywistej geometrii pomieszczenia i elementów oszkłonych, uwzględniającej ich wymiary, umiejscowienie w przegrodach i orientację względem stron świata; konieczne jest również uwzględnianie kierunkowych właściwości optycznych oszklenia
- dokładna analiza promieniowania słonecznego docierającego do obudowy pomieszczeń, uwzględniająca podział na składową kierunkową i rozproszoną, a także odpowiednio dokładne modelowanie promieniowania padającego na płaszczyzny nachylone (np. z wykorzystaniem modeli uwzględniających anizotropowość promieniowania rozproszonego)

- opis promieniowania transmitowanego do wnętrza pomieszczeń biorący pod uwagę rzeczywistą drogę wiązki przechodzącej przez oszklenie; niewystarczający jest rozdział promieniowania kierunkowego padającego na poszczególne przegrody wewnętrzne przy pomocy ważonych współczynników proporcjonalności (uwzględniających powierzchnię i cechy optyczne przegrody, tj. zdolność absorpcji i odbicia promieniowania) lub współczynników konfiguracji stosowanych do modelowania radiacyjnej wymiany ciepła
- możliwość uwzględnienia radiacyjnej wymiany ciepła z nieboskłonem.

W niniejszej pracy obliczenia przeprowadzone zostaną przy pomocy programu BSim, spełniającego powyższe zalecenia [17]. Algorytmy programu bazują na metodzie objętości kontrolnych, w której elementy konstrukcji budynku i zamknięte strefy powietrza reprezentowane są przez punkty węzłowe o określonych właściwościach fizycznych, takich jak gęstość, przewodność czy pojemność cieplna. Procesy ciągłe w czasie modelowane są poprzez podział na kroki czasowe o skończonej długości, wynoszącej najczęściej od kilku do kilkunastu minut.

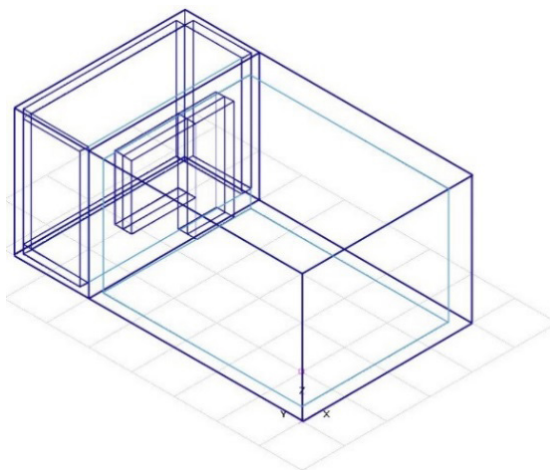
Dla każdej ze stref powietrza formułowany jest bilans uwzględniający strumień ciepła przepływającego przez obudowę, transmisję promieniowania słonecznego przez elementy przezroczyste, strumienie ciepła wytwarzanego przez systemy instalacyjne oraz przenoszonego przez wentylację, infiltrację lub międzystrefowe mieszanie powietrza.

Jako dane klimatyczne do programu mogą być wprowadzane dane użytkownika (np. z własnych pomiarów), lub dane reprezentujące typowe lata klimatyczne przygotowane zgodnie z obowiązującymi w danym kraju procedurami. Zakres niezbędnych parametrów wejściowych obejmuje temperaturę powietrza, natężenie promieniowania słonecznego kierunkowego i rozproszonego oraz wilgotność względną powietrza. Pożądane mogą być także dane dotyczące kierunku i prędkości wiatru, szczególnie jeśli planowane jest bardziej dokładne modelowanie naturalnej wymiany powietrza. W prowadzonych badaniach wykorzystano Typowy Rok Meteorologiczny dla Warszawy, opracowany wg procedur opisanych w [18], dostępny na stronie internetowej <https://dane.gov.pl>.

4. Porównanie przedstawionych metod obliczeniowych

Poniżej przedstawiono sposób obliczeń i zapotrzebowanie na energię jakie uzyskano dla przykładowego pomieszczenia mieszkalnego sąsiadującego z przestrzenią słoneczną, wyznaczone przy pomocy zaproponowanej modyfikacji algorytmów metody dokładnej i uproszczonej. Wyniki porównano z symulacjami dynamicznymi takiego samego układu pomieszczeń, przeprowadzonymi przy założeniach jak najbardziej zbliżonych do założeń metod stanu ustalonego.

Pomieszczenie mieszkalne ma dwie ściany zewnętrzne – ściana skierowana na południe sąsiaduje z oszklonym balkonem, a ściana pełna skierowana na wschód styka się z powietrzem zewnętrznym. Izolacyjność cieplna przegród jest dość wysoka, co odpowiada budynkom powstającym po 2014 roku (tabela 1). Poza zyskami słonecznymi w pomieszczeniu mieszkalnym założono zyski bytowe na poziomie 3.0 W/m^2 (wg załącznika G PN-EN ISO 13790). Wymiana powietrza w pomieszczeniu wynosi 0.5 l/h , przy czym jest ono doprowadzane z zewnątrz, aby spełnić założenie normy [1] o braku przepływu powietrza między szklarnią a przestrzenią klimatyzowaną.



Rys. 1. Schemat pomieszczenia mieszkalnego i przestrzeni słonecznej w programie BSim

Tabela 1. Wybrane parametry przegród zewnętrznych

Lp.	Rodzaj pomieszczenia	Współczynnik przenikania ciepła U [W/m ² K]		Współczynnik całkowitej przepuszczalności energii słonecznej g [-]
		Część pełna	Stolarka okienna	Oszklenie
1.	Pomieszczenie mieszkalne	0.24	1.20 – 1.23	0.63
2.	Balkon	0.50	1.66 – 1.69	0.62

Wszystkie ściany balkonu są oszklone (Rys. 1). Analizie poddano dwa typy oszklenia:

- na całej wysokości balkonu – wariant 1
- powyżej wysokości 1.1 m, z obudową pełną poniżej – wariant 2.

Zdolność absorpcji promieniowania na wewnętrznych powierzchniach szklarni przyjęto równą 0,2, 0,5 lub 0,8. W symulacjach dynamicznych uwzględniono straty promieniowania na skutek retransmisji na zewnątrz, co zgodne jest z fizycznym charakterem zjawisk.

W metodzie pełnej PN-EN ISO 13790 zakłada się, że zyski słoneczne w przestrzeni klimatyzowanej pochodzą od promieniowania pochłoniętego na powierzchni przegród pełnych szklarni lub przepuszczonego przez oszklenie w ścianie działowej, uzależniając je od cech optycznych powierzchni. Oznacza to, że efektywnie wykorzystana jest jedynie dawka promieniowania docierającego do danej powierzchni przed pierwszym odbiciem, a pozostała część promieniowania jest tracona. Zjawiska związane z wielokrotnym odbiciem wewnątrz szklarni są pominięte, czego efektem jest niedoszacowanie temperatury powietrza w przestrzeni słonecznej.

W obliczeniach wg metody uproszczonej pominięto retransmisję promieniowania na zewnątrz szklarni. Takie założenie jest przyjmowane w literaturze przedmiotu [6] jako spójne z ogólną metodyką normy i „rekompensujące” fakt, że metoda uproszczona z założenia zaniża efekty oddziaływania promieniowania słonecznego w wyniku pominięcia zysków słonecznych transmitowanych przez oszklenie w ścianie działowej do pomieszczenia mieszkalnego.

Opromieniowanie poszczególnych powierzchni wewnątrz szklarni w rzeczywistości nie jest jednakowe. Ze względu na ruch Słońca na nieboskłonie, można oczekiwać że natę-

żenie promieniowania kierunkowego na ścianie działowej i podłodze będzie największe. Dokładne metody analityczne wyznaczają te wielkości śledząc drogę promieni słonecznych („ray tracing”), jak np. w [14, 19].

Rozkład rozproszonego promieniowania słonecznego padającego na dane powierzchnie może zostać określony w różny sposób:

- zakładając, że rozdział promieniowania jest proporcjonalny do absorpcyjności powierzchni i ich wielkości; jest to najprostszy sposób podawany w literaturze [6, 14, 15]
- wykorzystując współczynniki konfiguracji („view factors”), określające jaka część promieniowania pochodzącego z jednej powierzchni dociera do powierzchni drugiej w zależności od ich wzajemnego położenia i geometrii; współczynniki te dostępne są np. w [20].

W danym przykładzie posłużono się metodą pierwszą, wyznaczając współczynniki f_p i f_j z ogólnego wzoru:

$$f = \frac{\alpha \cdot A}{\sum_n (1 - \rho_n) \cdot A_n} \quad (21)$$

gdzie: n – liczba powierzchni pełnych wewnątrz szklarni, α – absorpcyjność powierzchni [–], ρ – odbijalność powierzchni [–], A – pole powierzchni [m²].

Współczynniki te wykorzystano do rozdziału promieniowania całkowitego, czyli sumy promieniowania kierunkowego i rozproszonego. Nie jest to do końca właściwe w sensie fizycznym, jednak takie uproszczenie przyjęto ponieważ metodyka PN-EN ISO 13790 nie zakłada rozdziału promieniowania na poszczególne składowe. Założenie to zaniża bezpośrednie zyski solarne (przez ścianę działową) w pomieszczeniu mieszkalnym, czyli jest po stronie „bezpiecznej”.

Porównując wybrane metody obliczeniowe poniżej przedstawiono podstawowe parametry charakteryzujące funkcjonowanie systemu: temperaturę powietrza w szklarni oraz zapotrzebowanie na energię w pomieszczeniu mieszkalnym.

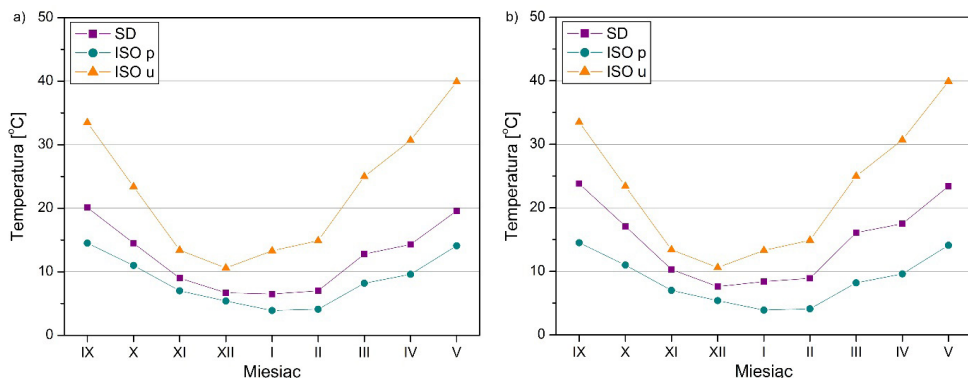
Tabela 2. Temperatura powietrza [°C] w szklarni podczas sezonu grzewczego. SD – symulacje dynamiczne, ISO p – metoda pełna, ISO u – metoda uproszczona

Lp.	Temperatura powietrza w szklarni [°C]											MAPE [%]
	Miesiąc	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V		
1.		SD	17.9	12.5	7.2	5.1	4.2	4.8	10.2	12.2	18.0	
2.	α = 0.2	ISO p	14.1	10.4	6.1	4.4	2.7	3.0	7.3	8.8	13.6	24.6
3.		ISO u	37.1	24.6	13.3	10.2	12.6	15.0	26.8	34.8	46.7	145.5
4.	Wariant 1	SD	20.8	14.3	8.1	5.7	5.3	6.0	12.5	14.8	21.5	
5.		α = 0.5	ISO p	14.1	10.4	6.1	4.4	2.7	3.0	7.3	8.8	13.6
6.		ISO u	37.1	24.6	13.3	10.2	12.6	15.0	26.8	34.8	46.7	105.2
7.	α = 0.8	SD	22.2	15.2	8.5	6.0	6.0	6.7	13.7	16.2	23.4	
8.		ISO p	14.1	10.4	6.1	4.4	2.7	3.0	7.3	8.8	13.6	40.8
9.		ISO u	37.1	24.6	13.3	10.2	12.6	15.0	26.8	34.8	46.7	89.0
10.	α = 0.2	SD	19.2	13.6	8.4	6.3	5.6	6.2	11.6	13.7	19.3	
11.		ISO p	14.2	10.4	6.2	4.5	2.8	3.1	7.4	8.9	13.7	34.0
12.		ISO u	27.3	18.6	10.3	7.8	8.5	10.0	18.5	23.7	32.6	48.8
13.	Wariant 2	SD	21.1	14.8	9.0	6.7	6.3	7.0	13.2	15.4	21.6	
14.		α = 0.5	ISO p	14.2	10.4	6.2	4.5	2.8	3.1	7.4	8.9	13.7
15.		ISO u	27.3	18.6	10.3	7.8	8.5	10.0	18.5	23.7	32.6	34.2
16.	α = 0.8	SD	22.0	15.3	9.2	6.8	6.6	7.4	13.8	16.1	22.6	
17.		ISO p	14.2	10.4	6.2	4.5	2.8	3.1	7.4	8.9	13.7	42.0
18.		ISO u	27.3	18.6	10.3	7.8	8.5	10.0	18.5	23.7	32.6	29.0

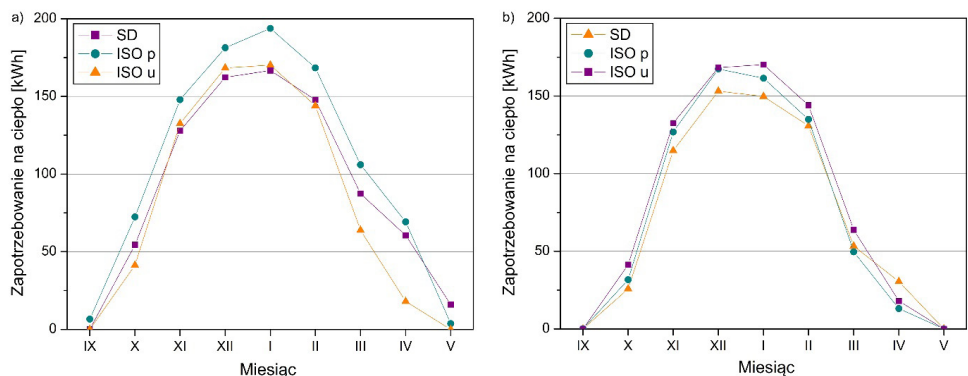
Tabela 3. Zapotrzebowanie na ciepło w pomieszczeniu mieszkalnym [kWh] podczas sezonu grzewczego. SD – symulacje dynamiczne, ISO p – metoda pełna, ISO u – metoda uproszczona

Lp.	Zapotrzebowanie na ciepło w pomieszczeniu mieszkalnym [kWh]											Zmiana względem SD* [%]	MAPE [%]	
	Miesiąc	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	Suma [kWh]			
1.		SD	1.3	62.8	135.4	169.5	177.1	155.5	96.2	66.3	18.2	882.3		
2.	α = 0.2	ISO p	0.4	49.3	139.8	176.3	183.5	154.1	73.4	26.6	0.1	803.4	-8.9	32.2
3.		ISO u	0.0	35.1	133.0	170.6	173.9	143.4	54.0	1.6	0.0	711.6	-19.4	44.2
4.	Wariant 1	SD	0.0	36.0	124.5	161.4	163.7	140.7	66.8	36.0	0.4	729.4		
5.		α = 0.5	ISO p	0.0	23.3	125.0	163.9	162.5	130.9	35.9	4.5	0.0	646.1	-11.4
6.		ISO u	0.0	35.1	133.0	170.6	173.9	143.4	54.0	1.6	0.0	711.6	-2.4	26.4
7.	α = 0.8	SD	0.0	22.7	117.7	156.4	155.5	131.6	49.1	24.0	0.0	657.1		
8.		ISO p	0.0	7.9	110.2	151.6	141.5	107.9	12.3	0.6	0.0	531.9	-19.0	30.4
9.		ISO u	0.0	35.1	133.0	170.6	173.9	143.4	54.0	1.6	0.0	711.6	8.3	22.3
10.	α = 0.2	SD	0.4	59.5	130.8	164.6	171.4	150.4	92.3	63.9	17.1	850.4		
11.		ISO p	8.2	78.0	153.7	187.8	203.4	176.0	113.0	73.1	3.7	996.8	17.2	34.8
12.		ISO u	0.0	66.8	148.2	183.2	195.6	167.4	97.6	53.2	0.0	912.0	7.2	31.6
13.	Wariant 2	SD	0.0	42.1	124.2	159.8	163.3	141.5	74.2	43.6	6.1	754.7		
14.		α = 0.5	ISO p	1.2	60.2	145.0	180.5	190.9	162.4	88.5	42.8	0.3	871.8	15.5
15.		ISO u	0.0	66.8	148.2	183.2	195.6	167.4	97.6	53.2	0.0	912.0	20.8	31.6
16.	α = 0.8	SD	0.0	35.0	121.1	157.5	159.4	137.3	65.7	36.0	1.1	713.0		
17.		ISO p	0.2	43.0	136.2	173.2	178.5	148.7	64.5	19.1	0.0	763.4	7.1	23.6
18.		ISO u	0.0	66.8	148.2	183.2	195.6	167.4	97.6	53.2	0.0	912.0	27.9	41.2

* zmiana zapotrzebowania na ciepło w całym sezonie grzewczym wg metody ISO w stosunku do wyników symulacji dynamicznych



Rys. 2. Temperatura powietrza w szklarni w sezonie grzewczym: a) wariant 1, $\alpha = 0.5$ b) wariant 2, $\alpha = 0.5$



Rys. 3. Zapotrzebowanie na ciepło w pomieszczeniu mieszkalnym w sezonie grzewczym: a) wariant 1, $\alpha = 0.5$ b) wariant 2, $\alpha = 0.5$

W metodach PN-EN ISO 13790, zarówno pełnej jak i uproszczonej, zdolność pochłaniania promieniowania przez wewnętrzne powierzchnie obudowy szklarni nie wpływa na jej temperaturę wewnętrzną. Temperatura ta jest wyznaczana jako zależna jedynie od napływu i odpływu ciepła przez transmisję (metoda pełna), albo jako pochodna całkowitych zysków słonecznych przepuszczonych przez oszklenie i cech termicznych obudowy (metoda uproszczona). Jako skutek tych założeń, metoda pełna zaniża, a metoda uproszczona dość znacznie zawyża temperatury wewnętrzne, co jest szczególnie widoczne w miesiącach wiosenno-jesiennych (Rys. 2). Wyniki symulacji dynamicznych wykazują wzrost temperatury wewnętrznej wraz ze wzrostem absorpcyjności powierzchni. Temperatura przyjmuje wartości pośrednie pomiędzy wynikami uzyskanymi dla metody pełnej i uproszczonej, które można traktować jako swego rodzaju ograniczenie dolne i górne rzeczywistej temperatury wewnętrznej.

Przebieg średnich temperatur miesięcznych i zapotrzebowanie na ciepło w kolejnych miesiącach sezonu grzewczego porównano z wynikami symulacji dynamicznych, wyznaczając błąd bezwzględny procentowy MAPE (Mean Absolute Percentage Error):

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_i - S_i}{S_i} \right| \quad (22)$$

gdzie: n – liczba wielkości prognozowanych, P – wartość prognozowana (wg PN-EN ISO 13790), S – wartość dokładna (wg symulacji dynamicznych).

Jeżeli wartość $MAPE > 15\%$ (co miało miejsce we wszystkich przypadkach), prognozy są niedokładne i nie powinny być przyjęte w analizie zjawisk [21]. Nie dyskwalifikuje to metod normowych, ponieważ oczekuje się od nich jedynie bliskiego bardziej dokładnym obliczeniom wyniku sezonowego zapotrzebowania na ciepło.

Metody quasi-stacjonarne PN-EN ISO 13790 w założeniu powinny być metodami „zachowawczymi”, tzn. zawyżającymi sezonowe zapotrzebowanie na ciepło w stosunku do obliczeń z krokiem godzinowym, przy czym metoda pełna (jako bardziej dokładna) powinna dawać mniejsze zapotrzebowanie na ciepło. Taka prawidłowość widoczna jest jedynie w dwóch sytuacjach obliczeniowych – wariant 2, $\alpha = 0.5$ i 0.8 . W tych przypadkach różnice pomiędzy metodą pełną a symulacjami wynoszą 15.5% i 7.1% , a pomiędzy metodą uproszczoną a symulacjami – 20.8% i 27.9% . Przybliżenie tego rzędu można uznać za satysfakcjonujące w obliczeniach inżynierskich.

Wyniki uzyskane dla najmniejszej absorpcyjności powierzchni (w wariancie 2 obudowy) mogą budzić pewne wątpliwości co do prawidłowego odwzorowania procesów fizycznych przez obie metody normy [1], mimo że same różnice pomiędzy nimi a symulacjami dynamicznymi są w najgorszym przypadku bliskie 17% . Jeżeli absorpcyjność powierzchni obudowy szklarni jest mała, metoda pełna ISO daje najwyższe zapotrzebowanie na ciepło, co jest skutkiem połączenia mniejszych bezpośrednich zysków słonecznych z niepełnym uwzględnieniem efektu buforowego szklarni na skutek zaniżonej temperatury wewnętrznej i zysków pośrednich. W tym wariancie bliższa symulacjom dynamicznym okazała się metoda uproszczona ISO, zawyżająca efekt buforowy przestrzeni słonecznej.

Modelowanie przestrzeni słonecznych o wysokim stopniu oszklenia (wariant 1) wg normy PN-EN ISO 13790 należy uznać za niezadawalające. Przy dużych powierzchniach oszklenia metoda uproszczona istotnie zawyża zyski energetyczne, co jest wynikiem pominięcia retransmisji promieniowania, które jest największe właśnie przy dużych powierzchniach oszklonych i znacznych zyskach solarnych. Jedynie dla największej absorpcyjności powierzchni maleje znaczenie tego zjawiska. W metodzie pełnej z kolei pominięcie retransmisji powoduje zawyżenie zysków bezpośrednich i pośrednich, czego efektem jest spadek zapotrzebowania na ciepło – szczególnie widoczny kiedy absorpcyjność powierzchni rośnie.

5. Posumowanie

Podsumowując, metody PN-EN ISO 13790 (po uwzględnieniu zaproponowanych modyfikacji) pozwoliły zadowalająco odwzorować funkcjonowanie przykładowej przestrzeni słonecznej o mniejszym udziale przegród oszklonych i większej pochłaniwalności promieniowania wewnątrz obudowy, czyli przestrzeni zbliżonej pod względem użycia promieniowania słonecznego do tradycyjnych pomieszczeń. Zjawiska typowe dla pomieszczeń o wysokim stopniu oszklenia, takie jak retransmisja promieniowania odbitego, nie są wystarczająco dokładnie uwzględnione w metodzie obliczeń normy. Efektem tego są większe rozbieżności między wynikami uzyskanymi dla przestrzeni oszklonej na wszystkich powierzchniach i dla wysokich odbijalności wnętrza obudowy.

Należy pamiętać, że powyższe analizy zostały przeprowadzone dla określonego rozkładu promieniowania wewnątrz szklarni. Przyjęcie bardziej dokładnego odwzorowania napromieniowania powierzchni mogłoby mieć wpływ na dokładność obliczeń. Szczegółowa analiza

drogi promieniowania wykracza jednak poza obszar obliczeń inżynierskich, którym mają służyć metody zawarte w PN-EN ISO 13790.

Pośród przedstawionych metod obliczeniowych symulacje dynamiczne są narzędziem pozwalającym na uwzględnienie największej liczby czynników decydujących o funkcjonowaniu szklarni, czyli przede wszystkim:

- przestrzennego charakteru promieniowania słonecznego
- właściwości optycznych oszklenia w funkcji kąta padania promieniowania
- retransmisji promieniowania na skutek odbić w obszarze przestrzeni słonecznej
- zróżnicowanej absorpcyjności powierzchni
- wentylacji przestrzeni szklarni i przepływu powietrza między szklarnią a pomieszczeniem klimatyzowanym.

Jest to więc metoda o największym potencjale badawczym, pod warunkiem świadomego jej stosowania i, w miarę możliwości, walidacji otrzymanych wyników w warunkach rzeczywistego funkcjonowania badanych obiektów.

6. Bibliografia

- [1] PN-EN ISO 13790:2009 „Energetyczne właściwości użytkowe budynków. Obliczanie zużycia energii na potrzeby ogrzewania i chłodzenia”.
- [2] Obwieszczenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 17 lipca 2015 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz. U. 2015 nr 0 poz. 1422.
- [3] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej, Dz. U. 2015 poz. 376.
- [4] Bourdeau L., Buscarlet C., “PASSYS, Final Report of the Simplified Design Tool Subgroup”, Commission of the European Communities, Directorate General XII, Brussels 1989.
- [5] ISO 52016-1:2017 "Energetyczne właściwości użytkowe budynków. Zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i chłodzenia, wewnętrzne temperatury oraz jawne i utajone obciążenia cieplne. Część 1: Procedury obliczania".
- [6] Leenknecht S., Saelens D., “Comparison between simplified and dynamic calculation of highly glazed spaces”, w: *Proceedings of the 1st Central European Symposium on building Physics*, Cracow – Lodz, September 2010, ss. 335-342.
- [7] Passerini F., Albatici R., Frattari A., “Quasi-steady state calculation method for energy contribution of sunspaces: a proposal for the European standard improvement”, w: *Proceedings of Building Simulation Applications BSA 2013, 1st IBPSA Italy Conference*, Bozen-Bolzano, Italy, 141-150, Dostęp: <http://www.ibpsa.org/proceedings/BSA2013/15.pdf> [Data dostępu: 18 luty 17]
- [8] ISO/FDIS 13790:2006(E) “Energy performance of buildings. Calculation of energy use for space heating and cooling”, Draft for comments by CEN and ISO WG. Dostęp: www.cres.gr/greenbuilding/PDF/prend/set3/WI_14_TC-draft-ISO13790_2006-07-10.pdf [Data dostępu: 23 luty 17]
- [9] Gawin D., Kossecka E. (red.), „Typowy rok meteorologiczny do symulacji wymiany ciepła i masy w budynkach”. Politechnika Łódzka, Łódź 2002.
- [10] Clarke J.A.: “Energy Simulation in Building Design”, Butterworth-Heinemann, Oxford 2001.
- [11] Jokisalo J., Kurnitski J., “Performance of EN ISO 13790 utilisation factor heat demand calculation method in a cold climate”, *Energy and Buildings*, 39 (2007) 236-247, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.06.007>.

- [12] Kokogiannakis G., Strachan P., Clarke J., “Comparison of the simplified methods of the ISO 13790 Standard and detailed modelling programs in a regulatory context”, *Journal of Building Performance Simulation*, 1 (2008) 209-219, <https://doi.org/10.1080/19401490802509388>.
- [13] Wall M., “Climate and energy use in glazed spaces”. Report TABK-96/1009, Lund University, Department of Building Science, Lund 1996.
- [14] Roux J.J., Teodosiu C., Covallet D., Chareille R., “Validation of a glazed space simulation model using full-scale experimental data”, *Energy and Buildings*, 36 (2004) 557-565, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.030>.
- [15] Oliveti G., De Simone M., Ruffolo S., “Evaluation of the absorption coefficient for solar radiation in sunspaces and windowed rooms”, *Solar Energy*, 82 (2008) 212-219, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.07.009>.
- [16] Hilliaho K., Lahdensivu J., Vinha J., “Glazed space thermal simulation with IDA-ICE 4.61 software – suitability analysis with case study”, *Energy and Buildings*, 89 (2015) 132-141, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.041>.
- [17] Wittchen K.B., Johnsen K., Grau K., *BSim user's guide*. Danish Building Research Institute, Hørsholm 2004.
- [18] Narowski P., „Dane klimatyczne do obliczeń energetycznych w budownictwie”, *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, 11 (2006) 22-27.
- [19] Tiwari G.N., Gupta A., Gupta R., “Evaluation of solar fraction on north partition wall for various shapes of solarium by Auto-Cad”, *Energy and Buildings*, 35 (2003) 507-514, [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00158-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00158-5).
- [20] Wiśniewski S., Wiśniewski T.S., *Wymiana ciepła*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1994.
- [21] Rogalska M., *Wieloczynnikowe modele w prognozowaniu czasu procesów budowlanych*. Politechnika Lubelska, Lublin 2016.