BUDOWNICTWO
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
CIVIL ENGINEERING
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
1-B/2009
ZESZYT 5
ROK 106
ISSUE 5
YEAR 106

ŁUKASZ NOWAK, HENRYK NOWAK*

WPŁYW ZESTAWÓW SZYB O STAŁYCH I ZMIENNYCH CHARAKTERYSTYKACH RADIACYJNYCH NA BILANS CIEPLNY POMIESZCZENIA

CHANGEABLE AND FIXED RADIATIVE GLAZING PROPERTIES INFLUENCE OF WINDOWS ON ROOM HEAT BALANCE

Streszczenie

Sprzeczne wymagania stawiane części przeszklonej fasady budynku, czyli wysokie zyski słoneczne zimą do wspomagania systemu grzewczego oraz niskie ich wartości w lecie, aby pomieszczenia nie ulegały przegrzewaniu, wymagają odpowiedniego doboru zestawów szyb, a głównie określenia ich charakterystyk radiacyjnych. Szyby o stałych wartościach charakterystyk radiacyjnych mogą jedynie częściowo spełniać oba te wymagania. Znacznie lepszą interakcję z otoczeniem wykazują szyby elektrochromowe. W artykule przedstawiono porównanie wpływu zestawów szyb o stałych i zmiennych charakterystykach radiacyjnych na bilans cieplny pomieszczenia biurowego.

Słowa kluczowe: *bilans cieplny pomieszczenia, wykorzystanie energii słonecznej, charakterystyki radiacyjne szyb, szyby elektrochromowe, szyby spektralnie selektywne*

Abstract

Conflicting requirements of glazed part of building facade which are high solar gains in the winter, to support heating system, and their low values, to avoid room overheating in the summer, need a proper choice of glazing, mainly their radiative properties. Glazing with constant radiative properties could only partly match to these two requirements. Switchable electrochromic glazing show a far better interaction with environment. In the paper a comparison of glazing with constant and switchable radiative characteristics and their influence on office room energy balance is presented.

Keywords: *room energy balance, solar energy use, radiative glazing properties, electrochromic glazing, spectral selective glazing*

* Mgr inż. Łukasz Nowak, dr hab. inż. Henryk Nowak, Instytut Budownictwa, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

Wysokie wymagania w zakresie oszczędności energii w budynkach wielkokubaturowych wymuszają poszukiwanie coraz nowszych rozwiązań pozwalających ograniczać ich zużycie energii na cele grzewcze oraz klimatyzacyjne. Jednocześnie kładzie się nacisk na zwiększanie możliwości wykorzystywania energii ze źródeł odnawialnych jako wsparcia dla tradycyjnych systemów dostarczających energię do budynku. Takie postulaty wymagają podejścia indywidualnego do każdego przypadku i przeanalizowania wielu rozwiązań, aby znaleźć to właściwe, najbardziej odpowiednie. Dobór kształtu obudowy, w tym odpowiedniego rodzaju oszklenia, instalacji wewnętrznych jest wypadkową kosztów inwestycji i późniejszej eksploatacji budynku, jego funkcji, formy architektonicznej, sposobu użytkowania, uwarunkowań prawnych i lokalizacyjnych oraz wielu innych parametrów.

Fasada budynku ma istotny wpływ na kształtowanie parametrów mikroklimatu pomieszczeń, przez co wpływa na komfort cieplny i wizualny użytkowników budynku. Obecnie stosowane zestawy szyb pozwalają na odpowiednie dobranie charakterystyk radiacyjnych szyb w fasadzie przeszklonej do potrzeb przyszłych użytkowników budynku. Jednak zasadniczym ograniczeniem będzie brak możliwości dopasowania się tych szyb w fasadach do zmiennych warunków nasłonecznienia, które istotnie wpływają na ilość dostarczanej energii słonecznej, która może wspomagać system grzewczy zimą albo prowadzić do przegrzewania się pomieszczeń w lecie. W tym wypadku zastosowanie szyb o zmiennych charakterystykach radiacyjnych, z możliwością sterowania nimi w zależności od potrzeb, może przynieść pożądany efekt w postaci fasady inteligentnej, która przez interakcję z otoczeniem dopasowuje się do naszych oczekiwań.

Fasady inteligentne mogą być jednym z elementów składowych budynków inteligentnych, które mogą adaptować się do zmiennych warunków pogodowych, umożliwiając optymalne wykorzystanie dostępnej energii słonecznej przy jednoczesnym zachowaniu racjonalnego zużycia energii oraz odpowiednich warunków komfortu cieplnego i wizualnego. W ramach fasady inteligentnej mogą współpracować zewnętrzne stałe lub regulowane systemy zacieniające w postaci żaluzji albo nadwieszeń, jak i zestawy szyb elektrochromowych, szerzej opisane w pozycjach [1–3]. W artykule przedstawiono porównanie wpływu zestawów szyb o stałych charakterystykach radiacyjnych różnych typów (szyb barwionych w masie, z powłokami niskoemisyjnymi lub refleksyjnymi, wypełnionych gazami szlachetnymi) z szybami o zmiennych charakterystykach radiacyjnych – szybami elektrochromowymi na bilans cieplny pomieszczenia biurowego.

2. Założenia do symulacji bilansu cieplnego pomieszczenia

2.1. Schemat pomieszczenia i założenia symulacyjne

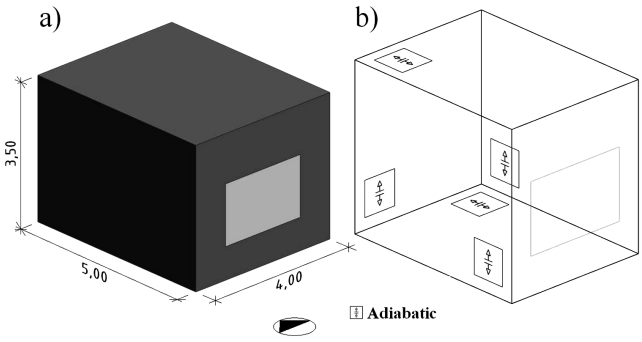
Przeprowadzono symulacje bilansu cieplnego, w aktualnej wersji środowiska Design-Builder, pomieszczenia pokazanego na rys. 1, o wymiarach 5,0 × 4,0 × 3,5 m, zorientowanego przeszkloną elewacją na południe. Dane aktynometryczne, dostępne w formacie IWEC, przyjęto dla lokalizacji Poznania.

Elewację południową przyjęto jako ścianę konstrukcyjną wykonaną z żelbetu 20 cm i ocieploną 20 cm wełny mineralnej o współczynniku U = 0,186 W/m^{2}K. Założono, że pozostałe przegrody otaczające pomieszczenie, z wyjątkiem przeszklonej elewacji, nie wy-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

mieniały ciepła z otoczeniem (przyjęte jako przegrody adiabatyczne), co pozwoliło na wyeliminowanie wpływu wymiany ciepła przez przegrody niebędące przedmiotem badań symulacyjnych. W ramach symulacji przyjęto cztery stopnie przeszklenia: 30, 50, 70 i 90% oraz 10 zestawów szyb o stałych charakterystykach radiacyjnych (zwanych dalej zwykłymi) oraz 5 zestawów szyb elektrochromowych (zwanych dalej EC). Charakterystyki radiacyjne zestawów szyb wykorzystanych w symulacjach zestawiono w tab. 1. Charakterystyki radiacyjne opisano za pomocą czterech współczynników:

– SHGC [–] (*Solar Heat Gain Coefficient*) – współczynnik zysków słonecznych,
– DST [–] (*Direct Solar Transmission*) – współczynnik przepuszczalności bezpośredniego promieniowania słonecznego,
– LT [–] (*Light Transmission*) – współczynnik przepuszczalności światła dziennego,
– *U-Value* [W/m^{2}K] – współczynnik przenikania ciepła dla zestawu szyb.



Rys. 1. Schemat pomieszczenia: a) wymiary zewnętrzne, b) rozmieszczenie przegród adiabatycznych
Fig. 1. Room scheme: a) exterior dimensions, b) location of adiabatic surfaces

Tabela 1

Charakterystyki radiacyjne zestawów szyb użytych w symulacjach

Zestaw szyb	SHGC		DST		LT		*U-Value*
	rozjaśniony	przyciemniony	rozjaśniony	przyciemniony	rozjaśniony	przyciemniony	
	[–]		[–]		[–]		[W/m^{2}K]
1	0,702		0,604		0,781		2,557
2	0,490		0,373		0,505		2,557
3	0,423		0,343		0,308		2,537
4	0,640		0,531		0,720		2,030
5	0,621		0,500		0,696		1,683
6	0,415		0,304		0,421		1,681
7	0,317		0,218		0,480		1,413
8	0,384		0,268		0,528		0,942
9	0,610		0,484		0,745		1,792
10	0,294		0,192		0,496		1,140
e1(1)	0,633	0,187	0,545	0,078	0,727	0,137	2,557
e2(4)	0,577	0,159	0,480	0,069	0,671	0,127	2,030
e3(5)	0,554	0,141	0,445	0,064	0,649	0,122	1,681
e4(8)	0,493	0,118	0,376	0,054	0,600	0,113	1,412
e5(9)	0,521	0,150	0,430	0,062	0,692	0,131	2,017

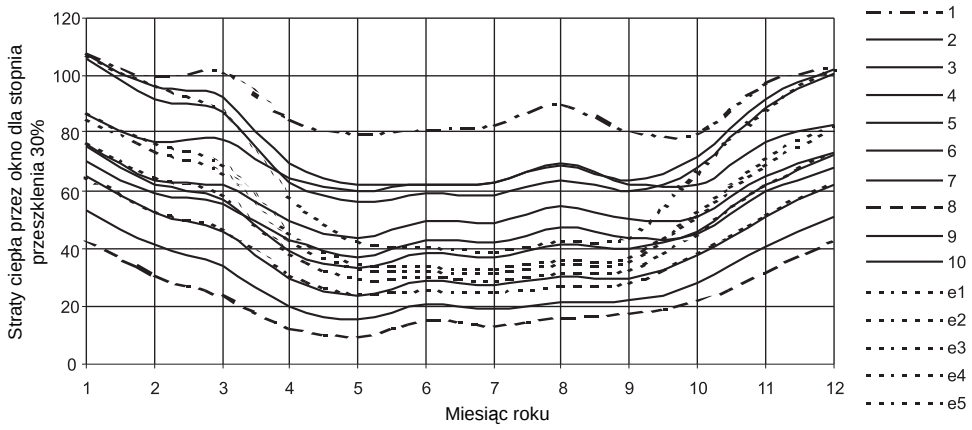
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Dla zestawów szyb elektrochromowych przedstawiono dwie wartości charakterystyk radiacyjnych: dla stanu rozjaśnionego (*bleached*) i przyciemnionego (*coloured*). Cyfry w nawiasach oznaczają, z jakich zestawów szyb zwykłych uzyskano zestawy szyb EC przez wymianę najbardziej zewnętrznej szyby. Dodatkowo szyby EC muszą mieć odpowiedni system sterujący włączaniem się i wyłączaniem efektu elektrochromowego. Bazując na doświadczeniu autorów [3], zdecydowano się na sterowanie przez kontrolę średniej temperatury powietrza wewnątrz pomieszczenia. Dla temperatur powyżej 22°C szyby przechodzą w stan przyciemniony, znacznie zmniejszając ilość przepuszczonej energii słonecznej do wnętrza pomieszczenia.

3. Wyniki symulacji

3.1. Straty i zyski ciepła z pomieszczenia przez okno

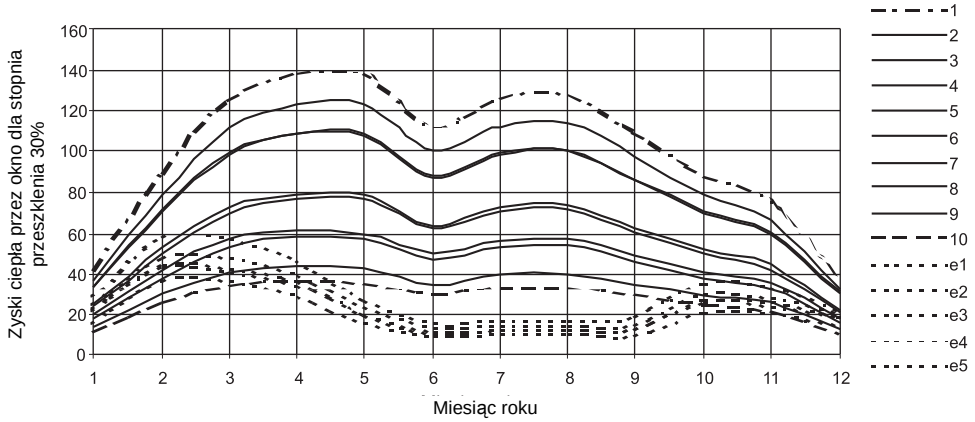
Analizując straty ciepła przedstawione na rys. 2, można zauważyć, że zestawy szyb zwykłych i elektrochromowych mają inny rozkład strat ciepła w skali roku. W zimie użycie szyb EC powoduje większe straty ciepła niż zestawy szyb zwykłych o porównywalnej izolacyjności cieplnej (wartości *U* dla zestawu szyb), natomiast w lecie straty ciepła są na znacznie niższym poziomie. W zimie system grzewczy jest mniej wspomagany przy szybach EC, gdyż w słoneczne dni system sterowania, zapobiegając przegrzewaniu pomieszczeń, przyciemnia szyby, w związku z tym zmniejsza zyski słoneczne.



Rys. 2. Miesięczne straty ciepła przez okno dla stopnia przeszklenia 30%
Fig. 2. Monthly room heat losses through glazing for 30% glazing ratio

W wypadku zysków słonecznych przepuszczonych do wnętrza pomieszczenia przedstawionych na rys. 3, można również zauważyć inny rozkład zysków w skali roku dla szyb zwykłych i EC. O ile wykresy zysków słonecznych dla szyb zwykłych zależą praktycznie od ilości dostępnego promieniowania słonecznego, to w wypadku szyb elektrochromowych wykresy w okresie letnim osiągają niskie wartości, gdyż właśnie wtedy szyby EC są przyciemniane, aby zapobiec przegrzewaniu pomieszczenia, co skutkuje również znacznie niższą temperaturą powietrza w pomieszczeniu.

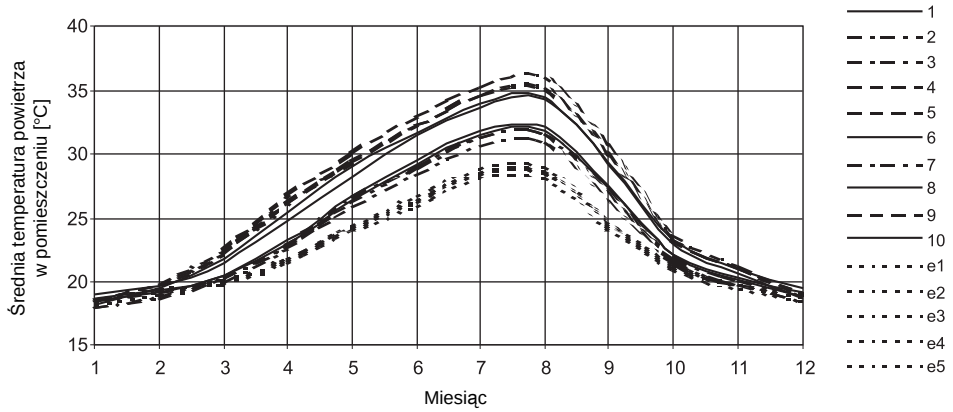
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 3. Miesięczne zyski ciepła przez okno dla stopnia przeszklenia 30%
Fig. 3. Monthly room soalr gains through glazing for 30% glazing ratio

3.2. Temperatura powietrza w pomieszczeniu

O ile w okresie grzewczym temperatura powietrza w pomieszczeniu jest głównie wypadkową ciepła dostarczanego przez system grzewczy oraz przez zyski słoneczne, o tyle w lecie zależy tylko od zysków z przepuszczonej części promieniowania słonecznego. Rozkład roczny średniej miesięcznej temperatury powietrza dla stopnia przeszklenia 30% zaprezentowany na rys. 4 przedstawia, jak duża może być rozbieżność temperatur w lecie w zależności od użytych zestawów szyb. Najwyższe średnie miesięczne temperatury w okresie lipiec–sierpień zanotowano dla zestawu szyb nr 9, które sięgały 36°C, a najniższe dla zestawu szyb zwykłych nr 3 – ok. 31°C.

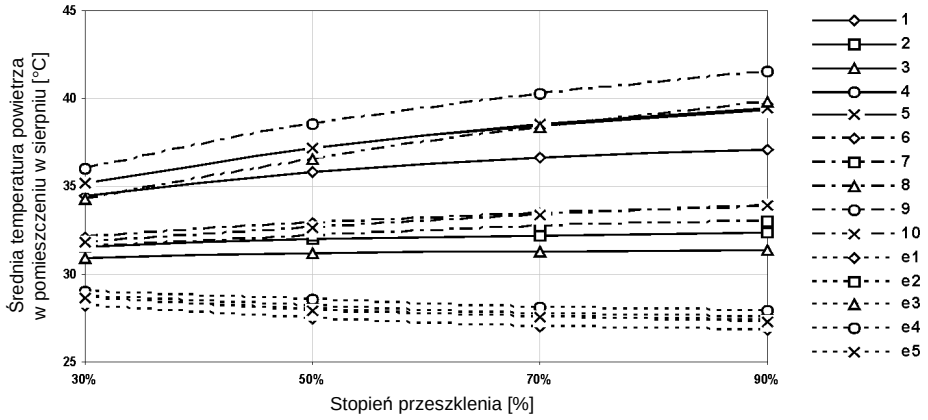


Rys. 4. Średnia miesięczna temperatura powietrza w pomieszczeniu dla stopnia przeszklenia 30% dla wszystkich analizowanych zestawów szyb
Fig. 4. Mean monthly room air temperature for 30% glazing ratio for all analised glazing sets

Pozostałe zestawy szyb plasowały się pomiędzy przedstawionymi wartościami. Najniższe wartości średnich miesięcznych temperatur uzyskiwały zestawy szyb z niskimi war-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

tościami SHGC (małe zyski słoneczne w ciągu dnia) oraz z niskimi wartościami współczynnika przenikania ciepła *U* (dobre oddawanie ciepła w nocy – ochładzanie pomieszczenia). Odrębną grupą przedstawioną na rys. 4 są zestawy szyb EC: maksymalne średnie miesięczne temperatury uzyskiwane w okresie lipiec–sierpień były o kilka stopni niższe od najlepszych wartości dla szyb zwykłych i oscylowały w zakresie 28–29°C. Można to uznać za bardzo dobry wynik, zważywszy, że w rozpatrywanym pomieszczeniu nie było urządzeń klimatyzacyjnych. Wykres zamieszczony na rys. 5 przedstawia zależność między średnią miesięczną temperaturą powietrza w pomieszczeniu dla sierpnia a stopniem przeszklenia. Dla wszystkich zestawów szyb zwykłych (1–10) wzrost stopnia przeszklenia wiąże się ze wzrostem średniej temperatury powietrza wewnętrznego, i tak – dla najmniej korzystnego zestawu szyb nr 9 dla stopnia przeszklenia 90% temperatura osiąga ok. 41,5°C.



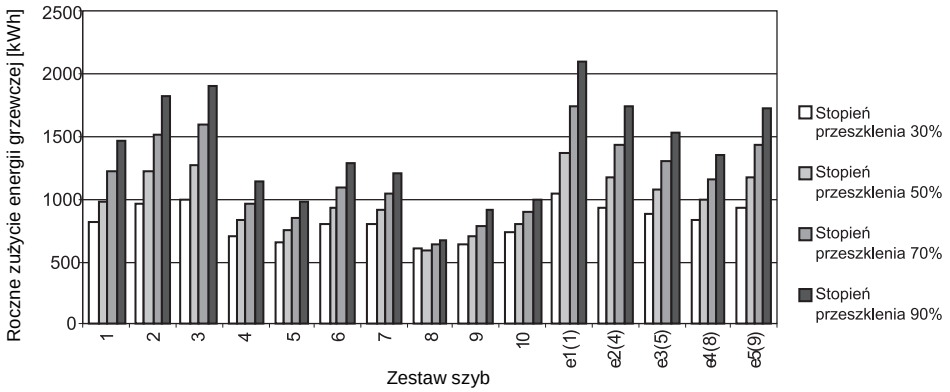
Rys. 5. Średnia miesięczna temperatura powietrza w pomieszczeniu w sierpniu
Fig. 5. Mean room air temperature for August

Ponownie grupa szyb EC uzyskuje najniższe wartości temperatur, które wraz ze stopniem przeszklenia maleją i dla stopnia przeszklenia 90% oscylują w zakresie 26,5–27,5°C – jest to związane ze wzrostem strat ciepła i ochładzaniem pomieszczenia w nocy, przez co średnia się obniża. Również zmienia się rozkład średniej temperatury godzinnej powietrza w ciągu dnia – jest znacznie mniejsza różnica między maksymalną a minimalną temperaturą powietrza, lecz z racji ograniczonej objętości artykułu nie zaprezentowano tutaj odpowiednich wyników.

3.3. Zużycie energii grzewczej w skali roku

Porównując ilość energii potrzebnej do celów grzewczych w pomieszczeniu przedstawioną na rys. 6, zauważa się od razu, że zestawy szyb elektrochromowych zużywają jej zawsze więcej niż odpowiadające im zestawy szyb zwykłych, co również autorzy zaobserwowali [3]. Najmniejszym zużyciem energii dla każdego stopnia przeszklenia wykazały się schematy pomieszczeń wyposażone w zestaw szyb nr 8, który zużywały do 74% energii mniej dla stopnia przeszklenia 30% i ponad 3 razy mniej dla stopnia przeszklenia 90% niż schematy o największym zużyciu energii. Wraz ze wzrostem stopnia przeszklenia

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 6. Roczne zużycie energii grzewczej w zależności od rodzaju szyb i stopnia przeszklenia
Fig. 6. Annual heating loads correlation to glazing set and glazing ratio

elewacji pomieszczenia wyposażone w szyby elektrochromowe zużywały więcej energii grzewczej niż schematy o najmniejszym zużyciu energii. Można to uzasadnić włączaniem (przyciemnianiem) szyb elektrochromowych w słoneczne dni, przy niskiej temperaturze powietrza zewnętrznego, gdy istnieje ryzyko chwilowego przegrzania pomieszczenia, co powoduje istotne obniżenie ilości dostarczanej energii słonecznej do wnętrza.

4. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza symulacyjna pozwala na wyciągnięcie kilku istotnych wniosków wynikających z zastosowania zestawów szyb o stałych lub zmiennych charakterystykach radiacyjnych. Wykorzystanie szyb elektrochromowych w znacznym stopniu moduluje rozkład i wartości uzyskiwanych strat i zysków ciepła przez okna w ciągu roku. Skutkuje to istotnym zmniejszeniem średniej temperatury powietrza w lecie, przez co znacznie lepiej zabezpiecza pomieszczenia przed przegrzaniem, nawet przy dużych stopniach przeszklenia, co pozwoli na dłuższe korzystanie ze światła dziennego w ciągu dnia. Ze względu na możliwość sterowania efektem elektrochromowym i znaczne zmniejszenie ilości przepuszczonego światła dziennego (współczynnik LT) można również zabezpieczyć użytkowników, w razie potrzeby, przed oślepieniem. Odpowiednio dobrane szyby o stałych charakterystykach radiacyjnych również mogą być dobrym rozwiązaniem, głównie ze względu na znacznie mniejszy koszt oraz brak konieczności montowania oraz zintegrowania systemu sterującego charakterystyką okna, która jest konieczna w wypadku szyb EC. Zmiana rozkładu strat i zysków ciepła przez okna powoduje jednak niepożądane zwiększenie zużycia energii na cele grzewcze, co prowadzi do większych kosztów eksploatacyjnych. Efekt ten można wyeliminować przez bardziej zaawansowane systemy sterujące włączaniem i wyłączaniem szyb elektrochromowych. W budynkach wyposażonych w systemy grzewcze i klimatyzacyjne również można zaobserwować wzrost zużycia energii grzewczej, ale jednocześnie zużycie energii klimatyzacyjnej może się zmniejszyć nawet o połowę [3]. W związku z tym wykorzystanie takich szyb jest najbardziej efektywne w budynku wyposażonym w oba systemy: grzewczy oraz klimatyzacyjny, które będą

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

zsynchronizowane z systemem sterującym efektem elektrochromowym w zestawach szyb znajdujących się na elewacji budynku. Najpoważniejszym zarzutem, jaki można postawić szybom elektrochromowym, jest ich wysoki koszt, dlatego trwają poszukiwania prostszych rozwiązań, które pozwolą obniżyć koszty i zwiększą zainteresowanie takimi szybami. Obecnie, gdy koszty rozwiązań elektrochromowych są bardzo wysokie, najbardziej opłacalne jest stosowanie szyb o stałych charakterystykach radiacyjnych, jednak o charakterystykach radiacyjnych odpowiednio dopasowanych do wymagań przyszłych użytkowników budynku.

Literatura

[1] Lampert C.M., *Chromogenic smart materials*, Materialstoday, March 2004, Elsevier, 2004, 28-35.

[2] Macrelli G., *Electrochromic windows*, Renewable Energy 15, Elsevier, 1998, 306-311.

[3] Nowak Ł., Nowak H., *The usage possibilities of electrochromic glazing in residental buildings*, VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna nt. „Problemy projektowania, realizacji i eksploatacji budynków o niskim zapotrzebowaniu na energię" – ENERGODOM 2006, 18–20 października 2006, Kraków, 451-458.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ