

SŁAWOMIR GRABARCZYK*

ZUŻYCIE ENERGII CIEPLNEJ W SZKLARNI Z RUCHOMYM EKRANEM TERMOIZOLACYJNYM

THERMAL ENERGY CONSUMPTION IN GREENHOUSE WITH MOVABLE THERMAL SCREEN

Streszczenie

W artykule zaprezentowano wyniki badań w wolnostojącej szklarni z ruchomym ekranem termoizolacyjnym zainstalowanym wewnątrz obiektu. Przedstawiono zużycie energii cieplnej w nowoczesnych obiektach szklarniowych w warunkach rzeczywistych. Celem tych badań było określenie wielkości zużycia energii cieplnej na cele grzewcze w zależności od stanu funkcjonowania szklarni.

Słowa kluczowe: szklarnia, ekran termoizolacyjny, zużycie energii cieplnej

Abstract

This paper presents results of researches in free-standing greenhouse with movable thermal screen inside objects. In the article are characterized consumption of thermal energy of modern greenhouse object on the ground of real investigations. Aim of these investigations was qualification level of heat consumption for heating in dependences from a flag of the operation of the facility greenhouse.

Keywords: greenhouse, thermal screen, thermal energy consumption

* Dr inż. Sławomir Grabarczyk, Instytut Budownictwa, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii, Politechnika Warszawska.

Oznaczenia

- U' – ogólny współczynnik przenikania ciepła dla przegrody szklarni [$W/(m^2K)$]
 I_c – suma miesięczna całkowitego promieniowania słonecznego na płaszczyznę poziomą [kWh/m^2]
 v_w – prędkość wiatru [m/s]
 Q_{sr} – średnie zużycie energii cieplnej w szklarni (dla jednostkowego pomiaru w danym miesiącu) [GJ]
 Q_{sum} – suma miesięczna zużycia energii cieplnej w szklarni [GJ]
 θ_e – temperatura powietrza zewnętrznego [$^{\circ}C$]
 θ_i – temperatura powietrza w szklarni [$^{\circ}C$]
 $\Delta\theta$ – różnica temperatur powietrza wewnątrz i na zewnątrz szklarni [$^{\circ}C$]
 φ_i – wilgotność względna powietrza w szklarni [%]

1. Wstęp

Współczesne obiekty szklarniowe eksploatowane całorocznie wymagają zarówno stosowania rozwiązań kształtujących mikroklimat wnętrza, jak i ograniczających straty ciepła przez przegrody zewnętrzne, zależnie od zewnętrznych warunków klimatycznych. Ekran termoizolacyjny stosowane w szklarni zmieniają właściwości termoizolacyjne przegrody zewnętrznej. Skutkuje to zmianą zapotrzebowania na energię cieplną nie tylko zależnie od pory roku i pory dnia, ale także stanu wyposażenia technicznego szklarni, decydującego o właściwościach przegrody, czyli ekranu termoizolacyjnego oraz wietrzników. W artykule przedstawiono wyniki badań rzeczywistych, które mają na celu ustalenie wielkości zużycia energii cieplnej zależnie od stanu funkcjonowania szklarni w warunkach eksploatacyjnych.

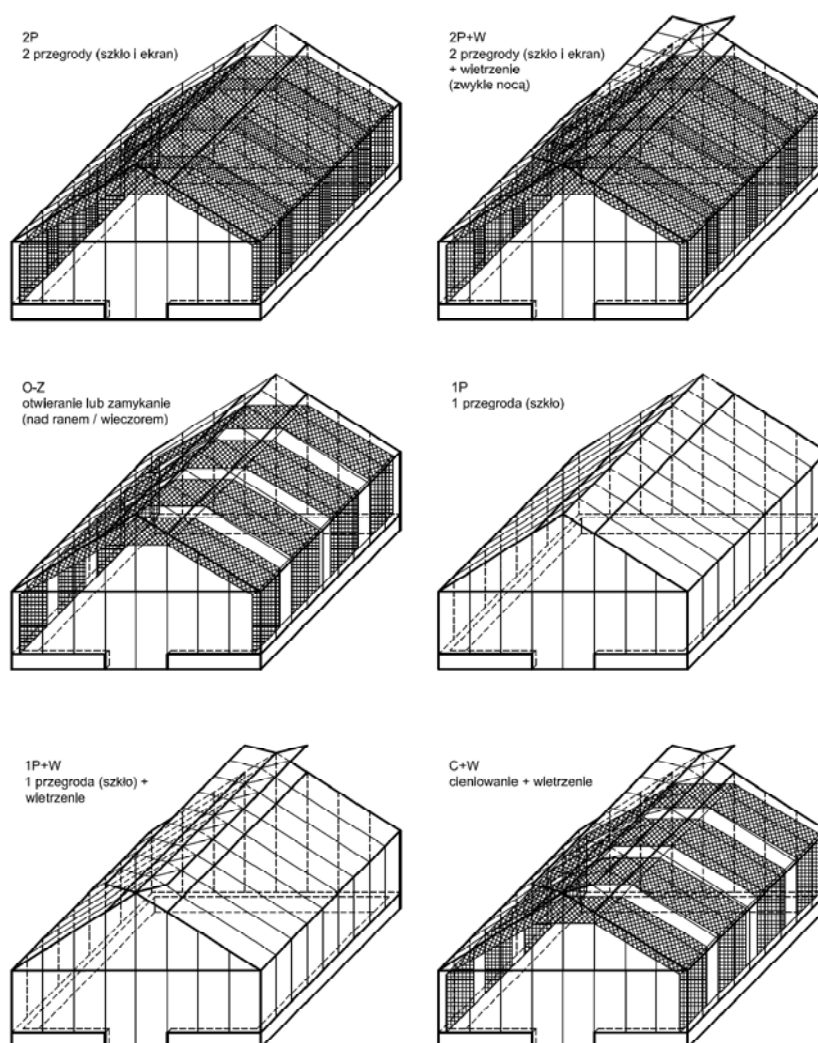
2. Założenia do badań

Badania wykonano w szklarni pojedynczej, stanowiącej obiekt dużego kompleksu. W badanej szklarni zainstalowano równolegle wzdłuż połaci dachowej i ścian bocznych ekran termoizolacyjny ULS 16. Ekran ten to tkanina pasków poliestru i aluminium. Otwieranie i zamykanie ekranu termoizolacyjnego w szklarni jest sterowane automatyką pogodową. Ekran jest zamykany nocą podczas niskich temperatur i stanowi wtedy drugą wewnętrzną osłonę szklarni. W ciągu dnia ekran jest otwierany tak, aby nie ograniczał dostępu światła do wnętrza szklarni, przy czym nadmierna intensywność promieniowania słonecznego jest ograniczana przez częściowe przemykanie ekranu. Na przegrodach pionowych szklarni po stronie zewnętrznej przytwierdzono dodatkową osłonę z folii pęcherzykowej. Ogólny współczynnik przenikania ciepła dla badanej szklarni wynosi $U' = 4,2 [W/(m^2K)]$ [1, 2].

Kubatura szklarni z ekranem, ograniczona przez jego powierzchnię oraz powierzchnię pozostałych przegród, stanowi 88,4% kubatury szklarni bez dodatkowych osłon (rys. 1).

Analiza działania wyposażenia technicznego w badanej szklarni pozwoliła na określenie występowania stanów funkcjonowania obiektu szklarniowego w warunkach eksploatacyj-

nych (rys. 1). Badania przeprowadzono w 2007 i 2008 r. Zgromadzony materiał badawczy obejmuje wyniki pomiarów z miesięcy okresu zimowego i okresów przejściowych, wykonanych z interwałem 10-minutowym. Taki czas między kolejnymi pomiarami pozwala na dość dokładne odzwierciedlenie funkcjonowania wyposażenia technicznego w szklarni, obiekcie o istotnym wpływie zewnętrznych warunków klimatycznych na mikroklimat i zużycie energii cieplnej. Łączna ilość danych zgromadzonych w okresie badań wynosi 30 384 rekordy. Stany funkcjonowania szklarni w warunkach eksploatacyjnych opisano symbolami pozwalającymi na ich łatwą identyfikację, a graficznie przedstawiono je na rys. 1.



Rys. 1. Stany funkcjonowania obiektu szklarniowego

Fig. 1. Flag of the operation of the facility greenhouse

Poszczególne stany funkcjonowania szklarni można scharakteryzować następująco:

- **stan 2P** (dwie przegrody: szkło + ekran) – stan występujący w zasadzie w przekroju całego roku w okresie nocnym; mający istotne znaczenie, gdy temperatury zewnętrzne są niższe niż temperatura w szklarni (okres zimowy i przejściowy);
- **stan 2P+W** (dwie przegrody i wietrzenie) – stan występujący w porze nocnej, gdy zaistnieje potrzeba przewietrzenia szklarni (otwarcie wietrzników);
- **stan O-Z** (otwieranie-zamykanie) – stan opisujący zmianę położenia ekranu, można wyróżnić tu dwie typowe sytuacje: otwieranie ekranu w godzinach porannych (zmiana stanu z 2P na 1P) oraz zamykanie wieczorem (zmiana z 1P na 2P);
- **stan 1P** (jedna przegroda: szkło) – przegrodę szklarni stanowi pokrycie ze szkła, ekran po otwarciu nie ogranicza wnikania promieniowania słonecznego do szklarni, współczynnik U' dla szklarni z pokryciem ze szkła wynosi $U' = 7,56$ [W/(m²K)] [3];
- **stan 1P+W** (jedna przegroda (szkło) i wietrzenie) – promieniowanie słoneczne powoduje we wnętrzu szklarni przyrost temperatury, którego efektem może być przekroczenie granicznej wartości temperatury wewnętrznej; skutecznym zabiegiem jest wtedy wietrzenie szklarni przez otwarcie wietrzników;
- **stan C+W** (cieniowanie i wietrzenie) – intensywne promieniowanie słoneczne powoduje znaczący przyrost temperatury w szklarni, oprócz wietrzenia konieczne jest również cieniowanie powierzchni szklarni.

3. Wyniki badań i analiz

Ogólną charakterystykę klimatu zewnętrznego i mikroklimatu szklarni w okresie badawczym przedstawiono w tabeli 1. W tym celu zaprezentowano średnie miesięczne wartości temperatury zewnętrznej θ_e i prędkości wiatru v_w oraz miesięczne sumy całkowitego promieniowania słonecznego na płaszczyznę poziomą I_c . Mikroklimat w szklarni w miesiącach przeprowadzania badań opisano średnimi wartościami temperatury wewnętrznej θ_i i wilgotności względnej powietrza ϕ_i .

Tabela 1

Średnie wartości parametrów klimatu zewnętrznego i mikroklimatu szklarni w miesiącach przeprowadzania badań

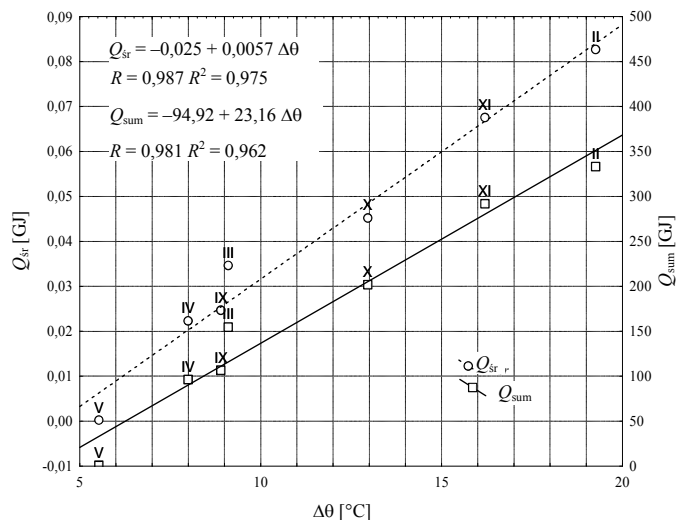
Zmienne	Miesiąc						
	II	III	IV	V	IX	X	XI
θ_e	-0,4	7,2	10,5	16,4	13,8	8,6	1,8
I_c	18,0	63,6	128,2	152,0	61,2	27,7	8,9
v_w	2,3	2,2	1,9	1,4	1,5	1,2	2,1
θ_i	18,8	16,3	18,5	21,9	22,7	21,5	18,0
ϕ_i	61,4	78,8	64,5	62,1	64,6	70,5	68,2

Utrzymanie właściwej temperatury w szklarni θ_i wymagało dostarczenia z systemu grzewczego energii cieplnej na pokrycie strat ciepła. W tabeli 2 przedstawiono średnie wartości zużycia energii cieplnej (dla jednostkowego pomiaru w danym miesiącu) oraz sumę zużycia energii cieplnej w poszczególnych miesiącach badań.

Zużycie energii cieplnej w poszczególnych miesiącach badań

Zmienne	Miesiąc						
	II	III	IV	V	IX	X	XI
Q_{sr}	0,083	0,035	0,022	0,000	0,025	0,045	0,068
Q_{sum}	333,3	154,9	96,4	1,3	106,8	202,0	292,0

Badania przeprowadzono w miesiącach zimowych i okresach przejściowych, stąd miesięczne sumy oraz średnie zużycie energii cieplnej są silnie skorelowane z różnicą temperatur $\Delta\theta$. Na rysunku 2 przedstawiono wzajemne zależności między miesięczną sumą energii cieplnej na cele grzewcze Q_{sum} oraz chwilową wartością jednostkowego zużycia energii cieplnej Q_{sr} a różnicą temperatur $\Delta\theta$.



Rys. 2. Miesięczne zużycie energii cieplnej w szklarni z ekranem termoizolacyjnym w zależności od średniej różnicy temperatur

Fig. 2. Monthly consumption of thermal energy in greenhouse with thermal screen in dependences from average difference of temperatures

Analiza działania wyposażenia technicznego szklarni skłoniła do uwzględnienia stanu funkcjonowania obiektu szklarniowego i określenia jego wpływu na wielkość zużycia energii cieplnej. Na przykładzie analizowanego okresu badawczego zakwalifikowano poszczególne rekordy danych pomiarowych do stanów opisujących funkcjonowanie szklarni, zgodnie z przyjętą klasyfikacją (rys. 1). Pełne zestawienie charakterystyki zużycia energii cieplnej oraz czasu trwania poszczególnych stanów funkcjonowania szklarni w wybranych miesiącach okresu badawczego przedstawiono w tabeli 3.

**Zużycie energii cieplnej i czas trwania stanów funkcjonowania szklarni
w poszczególnych miesiącach okresu badawczego**

Miesiąc	Stan	Q_{sr} [GJ]	Q_{sum} [GJ]	Czas trwania stanu w	
				godzinach	[%]
II	2P	0,087	206,39	393:20	58,5%
	O-Z	0,142	15,22	17:50	2,7%
	1P	0,076	111,74	246:10	36,6%
	1P+W	0,000	0,00	14:40	2,2%
	C+W	0,000	0,00	0:00	0,0%
	2P+W	0,000	0,00	0:00	0,0%
III	2P	0,049	107,64	369:20	49,6%
	O-Z	0,054	6,15	18:50	2,5%
	1P	0,039	37,25	159:40	21,5%
	1P+W	0,003	3,05	173:20	23,3%
	C+W	0,000	0,03	20:30	2,8%
	2P+W	0,055	0,78	2:20	0,3%
IV	2P	0,050	58,74	194:10	27,0%
	O-Z	0,001	0,19	21:10	2,9%
	1P	0,012	9,69	134:20	18,7%
	1P+W	0,008	9,36	194:50	27,1%
	C+W	0,000	0,28	117:10	16,3%
	2P+W	0,052	18,10	58:20	8,1%
V	2P	0,006	1,26	35:50	4,9%
	O-Z	0,000	0,00	15:00	2,0%
	1P	0,000	0,00	275:30	37,4%
	1P+W	0,000	0,00	210:30	28,6%
	C+W	0,000	0,00	207:10	28,1%
	2P+W	0,000	0,00	0:00	0,0%
IX	2P	0,045	90,50	334:50	46,5%
	O-Z	0,005	0,53	18:20	2,5%
	1P	0,015	13,90	152:30	21,2%
	1P+W	0,002	1,83	182:30	25,3%
	C+W	0,000	0,00	31:30	4,4%
	2P+W	0,000	0,00	0:20	0,0%
X	2P	0,062	150,98	407:50	54,8%
	O-Z	0,037	4,25	19:00	2,6%
	1P	0,034	45,35	220:20	29,6%
	1P+W	0,002	1,39	96:00	12,9%
	C+W	0,000	0,00	0:20	0,0%
	2P+W	0,001	0,00	0:30	0,1%
XI	2P	0,067	178,47	443:30	61,6%
	O-Z	0,141	14,39	17:00	2,4%
	1P	0,072	99,12	231:00	32,1%
	1P+W	0,000	0,01	19:40	2,7%
	C+W	0,000	0,00	0:50	0,1%
	2P+W	0,000	0,00	8:00	1,1%

Analiza wyników pomiarów zużycia energii cieplnej w poszczególnych stanach funkcjonowania szklarni pozwoliła stwierdzić, że w miesiącach o najmniejszych miesięcznych sumach promieniowania słonecznego I_c , dominującym stanem jest 2P stanowiący 55% (lub więcej) czasu eksploatacji szklarni. W marcu, kwietniu i wrześniu czas trwania tego stanu jest poniżej 50%, natomiast w maju stan ten trwa krócej niż 5% czasu eksploatacji szklarni. Wynika to z utrzymywania okresowo niższej temperatury z powodu braku uprawy w szklarni oraz najwyższej temperatury zewnętrznej w tym miesiącu. Stan O-Z występuje w każdym miesiącu nie więcej niż 24 godziny, co stanowi nie więcej niż 3% obserwacji. Stan opisany jako 1P występuje od kilkunastu do ponad 35% obserwacji w okresie eksploatacji szklarni i zależy od promieniowania słonecznego – im większe tym krótszy czas występowania tego stanu. Wyjątkiem jest tu miesiąc maj, kiedy przez część miesiąca nie prowadzono w szklarni uprawy i nie było konieczności zamykania ekranu w porze nocnej (długi czas trwania stanu 1P, krótki 2P). Stan szklarni 1P+W występuje stosunkowo niewiele razy w miesiącach najchłodniejszych (luty i listopad) i jest to łącznie kilkanaście godzin w miesiącu. W pozostałych miesiącach czas ten znacząco się wydłuża, a w niektórych miesiącach obserwuje się nawet zużycie energii dla tego stanu funkcjonowania szklarni. Stan C+W występuje często w miesiącach o dużym nasłonecznieniu (kwiecień i maj), natomiast obserwacje z zużyciem energii cieplnej w praktyce nie występują. Stan 2P+W w miesiącach zimowych nie występuje, głównie ze względu na niewielką zawartość wilgoci w powietrzu, a tym samym niedużą wilgotność powietrza wewnętrznego w szklarni. Stan ten występuje w okresie badawczym głównie w miesiącach przejściowych gdy konieczne jest obniżenie wilgotności względnej powietrza w szklarni, ale jedynie w kwietniu obserwuje się zużycie energii cieplnej.

Zbilansowane dla miesięcy okresu badawczego zużycie energii cieplnej w poszczególnych stanach funkcjonowania szklarni przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4

**Zużycie energii cieplnej i czas trwania stanów funkcjonowania szklarni
w analizowanym okresie badawczym**

Miesiące	Stan	Q_{sr} [GJ]	Q_{sum}		Czas trwania stanu w	
			[GJ]	%	godzinach	%
II-V i IX-XI	2P	0,366	793,98	66,9%	2178:50	43,0%
	O-Z	0,381	40,73	3,4%	127:10	2,5%
	1P	0,248	317,05	26,7%	1419:30	28,0%
	1P+W	0,015	15,66	1,3%	891:30	17,6%
	C+W	0,001	0,31	0,0%	377:30	7,5%
	2P+W	0,108	18,88	1,6%	69:30	1,4%

Wyniki analiz wskazują, że główne znaczenie mają stany 2P oraz 1P jako łącznie obejmujące ponad 93% zużycia energii cieplnej w ciągu 71% czasu analizowanego okresu badawczego. Dla oceny poszczególnych stanów funkcjonowania szklarni ma znaczenie także średnia wartość chwilowego zużycia energii cieplnej Q_{sr} . Suma zużycia energii cieplnej Q_{sum} jest zależna od właściwości termoizolacyjnych przegrody, długości czasu trwania danego stanu oraz zewnętrznych warunków klimatycznych (głównie różnicy temperatur $\Delta\theta$). Największą wartość średnią chwilowego zużycia energii cieplnej Q_{sr} obserwuje się dla

stanu O-Z, co wskazuje, że następuje tu pogorszenie właściwości termoizolacyjnych przegrody. Analiza danych pomiarowych w zbiorach sugeruje jednak uwzględnienie podziału na otwieranie i zamykanie ekranu. Powodem tego jest odmienność warunków, w jakich zachodzi zmiana położenia ekranu w szklarni. Otwieranie to pogorszenie właściwości termoizolacyjnych przegrody występujące w godzinach rannych, przy niższej temperaturze zewnętrznej oraz napływie chłodnego powietrza z przestrzeni między szkłem i ekranem do przestrzeni ogrzewanej szklarni. Zamykanie – w godzinach wieczornych, zwykle przy wyższej temperaturze zewnętrznej.

4. Podsumowanie

Analiza wyników badań zużycia energii cieplnej w poszczególnych stanach funkcjonowania szklarni dowiodła jego znaczącej dysproporcji. Trzy stany funkcjonowania szklarni: 2P, 1P i O-Z mają największe znaczenie z punktu widzenia zużycia energii cieplnej w szklarni.

W dalszych analizach będzie konieczne uwzględnienie stanu O-Z z podziałem na otwieranie i zamykanie, głównie z powodu różnego czasu trwania oraz odmienności warunków ich występowania.

Analiza danych dla pełnego roku kalendarzowego pozwoli na ustalenie współczynników strat ciepła dla poszczególnych stanów funkcjonowania szklarni oraz wielkości jednostkowego zużycia energii cieplnej w przeliczeniu na 1 stopień różnicy temperatur $\Delta\theta$, co analizowano już we wcześniejszych publikacjach autora, m.in. w [4].

Pozostałe stany są istotne, zwłaszcza w analizie bilansu strumieni ciepłych w szklarni z ruchomym ekranem termoizolacyjnym. Jest to możliwe, ale dopiero po uwzględnieniu współczynnika efektywności wykorzystania zysków ciepła od słońca, a to wymaga przeprowadzenia dodatkowych pomiarów temperatury i wilgotności względnej powietrza w podwójnej przegrodzie szklarni. Wyniki badań w tym zakresie były już przedmiotem wstępnych analiz [5] i będą kontynuowane.

Literatura

- [1] Grabarczyk S., *Wpływ zastosowania ekranów termoizolacyjnych w obiektach szklarniowych na zużycie energii*, praca doktorska, Politechnika Warszawska, Płock 1999.
- [2] Grabarczyk S., Wołski L., *Ogólny współczynnik przenikania ciepła w wymiarowaniu termicznym nowoczesnych obiektów szklarniowych*, Materiały XLVI Konferencji Naukowej „Problemy Naukowo-Badawcze Budownictwa”, Wrocław–Krynica 2000, 147-154.
- [3] Zabeltitz Ch., *Szklarnie – projektowanie i budowa*, PWRiL, Warszawa 1991.
- [4] Grabarczyk S., Wołski L., *Real effect of saving of energy and formation of microclimate in greenhouse with thermal screens*, Conference “Building and Energy”, Koszyce–Podbanske 2001, 285-288.
- [5] Grabarczyk S., *Badania zmienności parametrów powietrza w podwójnej przegrodzie szklarni*, Czasopismo Naukowe „Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce”, Tom IV, Sekcja Fizyki Budowli KILiW PAN, Politechnika Łódzka – Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych, Łódź 2009, 45-590.