

Skuteczność wentylacji naturalnej w szklarni



dr inż.
SŁAWOMIR GRABARCZYK
Politechnika Warszawska
Wydział Budownictwa, Mechaniki I Petrochemii
ORCID: 0000-0003-0741-6570

Badania przeprowadzono w szklarni jednonawowej w celu określenia skuteczności wentylacji naturalnej. Przedmiotem analiz jest szklarnia z zainstalowanym wewnątrz ekranem termoizolacyjnym. Badania przeprowadzono podczas dni letnich.

Wentylacja szklarni w okresie letnim jest jednym z czynników mających wpływ na kształtowanie mikroklimatu, głównie na ograniczenie temperatury wewnętrznej. W warunkach zmiennego klimatu zewnętrznego w Polsce w szklarniach, głównie z uwagi na koszty, stosuje się ekrany termoizolacyjne ograniczające straty ciepła w okresie zimowym, ale jednocześnie umożliwiające cieniowanie powierzchni uprawnej szklarni w czasie występowania dużych wartości natężenia promieniowania słonecznego.

Wpływ ekranów cieniujących na wentylację szklarni był przedmiotem badań [1]. Efektem użycia ekranów termoizolacyjnych może być zmniejszenie promieniowania słonecznego i temperatury w szklarni, ale również zmniejszenie intensywności wentylacji oraz wzrost temperatury w szklarni. Ekran termoizolacyjny nie ma wpływu na skuteczność wentylacji, jeśli wielkość przerw między sekcjami ekranu jest większa niż wielkość otworów wentylacyjnych. Z badań skuteczności wentylacji wykonanych przez Kittasa [2] wynika, że wietrzniki dachowe są bardziej efektywne niż wietrzniki boczne. Rozwój Computational Fluid Dynamics (CFD) umożliwił symulację kształtowania mikroklimatu szklarni wraz z wizualizacją przepływu powietrza. Przegląd badań eksperymentalnych w zakresie wymiany powietrza w szklarni, jak również doświadczeń w zakresie symulacji CFD przedstawili Bournet i Boulard [3]. W badaniach eksperymentalnych brak analiz dotyczących szklarni wolnostojącej z wietrznikami dachowymi. Korzystając z doświadczeń innych autorów, wykonano stosowne obliczenia, aby określić skuteczność naturalnej wentylacji szklarni w czasie występowania dużych wartości promieniowania słonecznego.

Ocenę ogólną skuteczności wentylacji szklarni postanowiono określić według wymagań sformułowanych przez Amerykańskie Stowarzyszenie Inżynierów Rolnictwa [4], które zaleca intensywność wymiany powietrza w okresie letnim na poziomie $0,04 \text{ m}^3/(\text{sxm}^2)$.

Celem analiz było ustalenie, na podstawie przeprowadzonych badań w szklarni z ekranem termoizolacyjnym, skuteczności wen-

tylacji naturalnej wietrznikami dachowymi w okresie występowania dużych wartości promieniowania słonecznego.

Podstawy teoretyczne

Strumień powietrza wentylacyjnego przepływający między szklarnią a otoczeniem zewnętrznym przez wietrzniki zależy od różnicy ciśnień powietrza wewnętrznego i na zewnątrz szklarni. Różnica ciśnień między tymi ośrodkami jest wywołana różnicą gęstości powietrza na skutek różnicy temperatur, ale może być też skutkiem działania wiatru.

Model wymiany powietrza w szklarni został opracowany teoretycznie przez Bota [5] i rozwinięty w oparciu o badania eksperymentalne Jonga [6]. Badania terenowe w tym zakresie prowadzili m.in. Bailey [7], Boulard [8], Papadakis [9] i Teitel [10–11]. Modele wymiany powietrza z uwagi na nowe możliwości stosowania technik CFD zostały częściowo zweryfikowane, stąd możliwe było wykorzystanie określonych zależności w celu ustalenia skuteczności wentylacji w innych szklarniach. Boulard i Bailey [12] analizowali przepływ powietrza przez wietrzniki oraz określili zależność (1):

$$Q = \left(\frac{A}{2}\right) C_d \sqrt{\frac{2g\left(\frac{h}{4}\right)(T_i - T_e)}{\bar{T}} + C_w w^2} \quad (1)$$

gdzie:

Q – strumień powietrza wentylacyjnego, m^3/s ;

A – suma powierzchni otworów wentylacyjnych, m^2 ;

C_d – współczynnik wypływu otworu wietrznika – ustalany eksperymentalnie, jego wartość zależy od rodzaju otworu i jego usytuowania;

g – przyspieszenie ziemskie, m/s^2 ;

T_i – temperatura powietrza w szklarni, $^{\circ}\text{C}$;

T_e – temperatura zewnętrzna, $^{\circ}\text{C}$;

\bar{T} – absolutna wartość średniej temperatury w szklarni i powietrza zewnętrznego, K ;

C_w – całkowity współczynnik parcia wiatru – ustalany eksperymentalnie, jego wartość zależy od rodzaju otworu i jego usytuowania;

w – prędkość wiatru, m/s ;

h – wysokość szczeliny otworu wietrznika (rys. 1.), określana z zależności (2), m ;

$$h = H_o [\sin(\psi) - \sin(\psi - \alpha)] \quad (2)$$

gdzie:

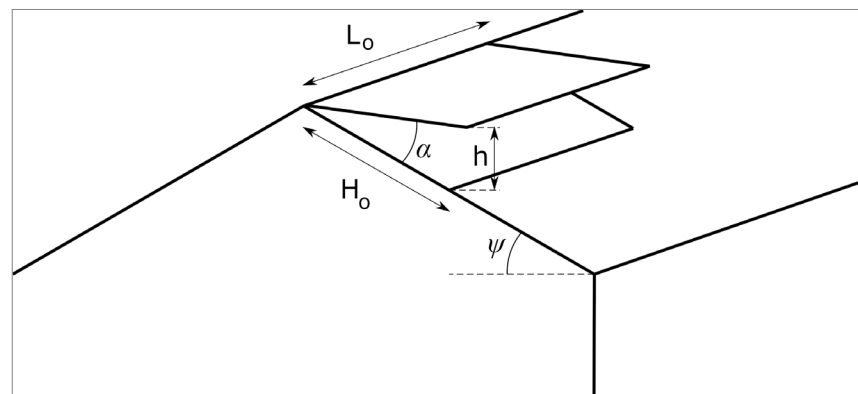
H_o – wysokość otworu wietrznika, m ;

ψ – kąt nachylenia dachu szklarni, $^{\circ}$;

α – kąt otwarcia wietrznika, $^{\circ}$.

Materiał i metody

Przedmiotem badań była szklarnia wolnostojąca zlokalizowana w Skierniewicach. Obok szklarni znajduje się stacja meteorologiczna funkcjonująca na potrzeby systemu sterowania mikroklimatem szklarni. Czujniki na maszcie stacji meteorologicznej, znajdującej się w odległości 22 m od osi podłużnej szklarni, zlokalizowane są na 7 metrach nad poziomem terenu, czyli tej samej wysokości,



Rys. 1. Wysokość szczeliny h otworu wietrznika szklarni

na której są wietrzniki dachowe szklarni. Zestaw czujników umożliwił pomiar temperatury powietrza zewnętrznego, kierunku i prędkości wiatru oraz promieniowania słonecznego.

Badania przeprowadzono w szklarni z pokryciem zewnętrznym ze szkła o grubości 4 mm. Na ścianach bocznych, a także szczytowych przytwierdzono od strony zewnętrznej grubą folię pęcherzykową. W szklarni równoległe do ścian bocznych i połaci dachowej zainstalowano ekran ULS 16 o właściwościach cieniująco-energooszczędnych. Kubatura szklarni z ekranem, ograniczona przez jego powierzchnię, stanowi 88,4% kubatury szklarni bez dodatkowych osłon (fot. 1).

Wentylację naturalną realizuje się przez otwieranie wietrzników dachowych o wymiarach 1,47 m x 30,78 m, przy czym dwa wietrzniki zlokalizowane są po stronie zawietrznej i dwa po stronie nawietrznej szklarni. Podłoże szklarni jest przystosowane do prowadzenia upraw doniczkowych. Podstawowe informacje o szklarni przedstawiono w tabeli 1.

Pomiary parametrów niezbędnych do wykonania analiz w zakresie skuteczności wentylacji wykonano w dniach 11–17 lipca 2007 r., rejestrując dane co 10 minut. Charakterystykę ogólną podstawowych parametrów klimatu zewnętrznego i mikroklimatu szklarni w czasie występowania dużych wartości promieniowania słonecznego, tu reprezentowanych przez bezpośrednie promieniowanie słoneczne I_d , przedstawiono w tabeli 2.

Wyniki i dyskusja

Na podstawie zależności (1) i pomiarów w szklarni określono strumień powietrza wentylacyjnego przepływający przez wietrzniki dachowe. Ustalono równania regresji opisujące zależność strumienia powietrza wentylacyjnego od prędkości wiatru. Współczynniki korelacji oraz determinacji wskazują na główną siłą sprawczą, jaką jest prędkość wiatru. Zależność wymiany powietrza od prędkości wiatru w okresie występowania dużych wartości natężenia promieniowania słonecznego przedstawiono na rys. 2.

Przy pogodzie bezwietrznej strumienie powietrzne przepływające przez wietrzniki po obu stronach szklarni są sobie równe. Wzrost prędkości wiatru to większy udział strony nawietrznej w całkowitym strumieniu powietrza wymianianego w szklarni. Przy prędkości wiatru 4 m/s udział wietrzników od strony nawietrznej wynosi 60% w ogólnym strumieniu powietrza wymianianego w szklarni.

Wartości współczynników C_d i C_w przyjęto wg [13], które dla wietrzników dachowych wynoszą odpowiednio: $C_d = 0,649$ oraz $C_w = 0,1$ dla wietrznika nawietrzego i $C_d = 0,37$ dla zawietrznego. Podstawą do klasyfikacji danej obserwacji opisującej rolę wietrznika funkcjonującego po stronie zawietrznej i nawietrznej były wskazania kierunku wiatru. W analizach nie uwzględniono zależności

Tabela 1. Charakterystyka szklarni

Szklarnia wolnostojąca	długość	62,5 m
	szerokość	20 m
	wysokość kalenicy	7,3 m
	wysokość ściany bocznej	2,2 m
	kąt nachylenia dachu szklarni	27°
wietrzniki	dachowe z osią obrotu w kalenicy	4 x 1,47 m x 30,78 m
ekran ULS 16	energooszczędność zacielenie	60% 65%

Tabela 2. Temperatura w szklarni i parametry klimatu zewnętrznego w okresie badań

Parametr		11.07	12.07	13.07	14.07	15.07	16.07
T_i [°C]	średnia	24,2	23,3	23,4	30,9	39,9	41,8
	odch. std.	2,1	2,1	1,8	4,0	5,3	4,6
T_e [°C]	średnia	18,8	17,9	18,8	25,3	32,7	35,4
	odch. std.	1,9	1,2	1,3	2,6	1,9	2,0
w [m/s]	średnia	0,7	1,9	2,1	1,6	1,6	1,9
	odch. std.	0,5	1,1	1,2	1,0	1,2	1,2
I_d [W/m ²]	średnia	179,1	151,2	143,2	236,8	322,9	343,2
	odch. std.	131,9	96,7	98,6	185,7	209,4	206

współczynnika C_d od kąta otwarcia wietrznika. W dni słoneczne przy niedużych prędkościach wiatru nie uzyskuje się wystarczającej ilości danych pomiarowych umożliwiających analizę w tym zakresie. Wietrzniki otwierają się do maksymalnego położenia i ilość obserwacji dla kątów między wartościami 0 i 60 stopni jest bardzo mała.

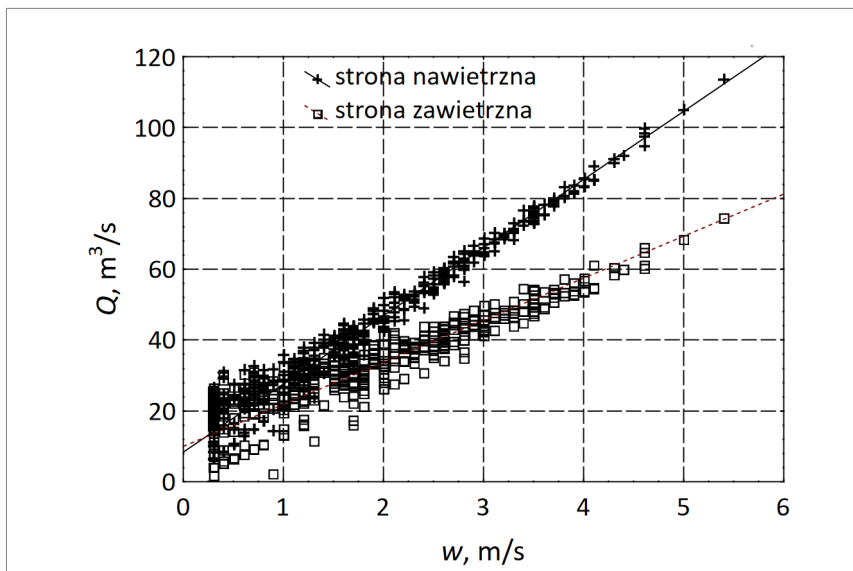
Równania regresji liniowej zależności strumienia powietrznego od prędkości wiatru w szklarni przedstawiono w tabeli 3. Wzrost prędkości wiatru o 1 m/s powoduje przyrost strumienia powietrza wymianianego w szklarni o około 31 m³/s (5).

Zależność wielkości strumienia powietrza wentylacyjnego od drugiego czynnika sprawczego, jakim jest różnica temperatur (6), przedstawiono na rys. 3. W tym przypadku współczynniki korelacji i determinacji są niższe niż w przypadku analogicznych równań określonych dla prędkości wiatru.

Wiatr jest główną siłą sprawczą wentylacji naturalnej w szklarni przy prędkościach powyżej 1,8 m/s [9], natomiast przy mniejszych prędkościach wiatru siłą wymuszającą proces wentylacji jest siła wyporu termicznego. W szklarni z wietrznikami dachowymi o wymiarach 1,47 x 30,78 m, umiejscowio-



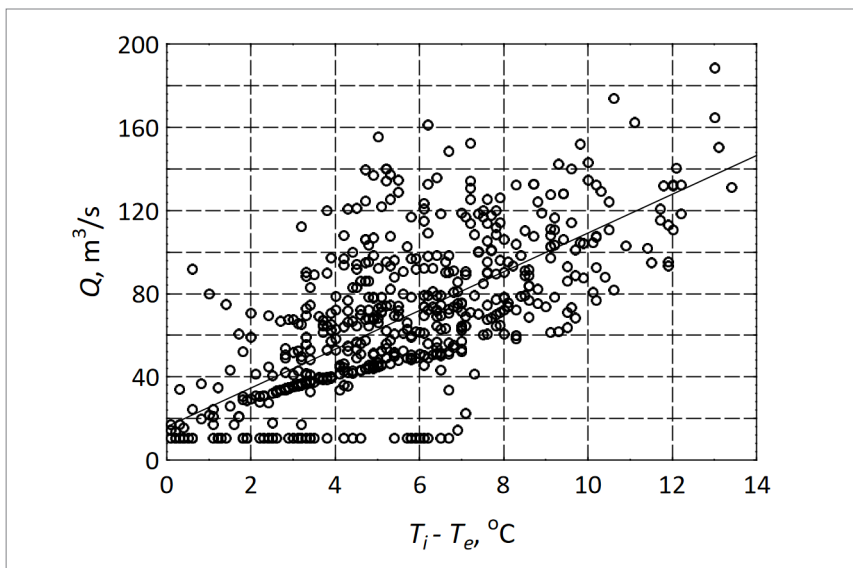
Fot. 1. Ekran termoisolacyjny w badanej szklarni



Rys. 2. Zależność strumieni powietrza wentylacyjnego przepływających przez wietrzniki dachowe od prędkości wiatru

Tabela 3. Równania regresji określające zależności strumienia powietrznego w szklarni od prędkości wiatru i różnicy temperatur

Wietrznik	Liczba obs.	Równanie regresji	R	R ²	błąd std.	Nr równ.
dachowy – strona nawietrzna	628	$Q = 8,351 + 19,225 \cdot w$	0,976	0,952	0,319	(3)
	497	$Q = 12,933 + 5,003 \cdot \Delta T$	0,626	0,392	1,793	(3a)
dachowy – strona zawietrzna	628	$Q = 9,934 + 11,870 \cdot w$	0,915	0,837	0,386	(4)
	497	$Q = 12,339 + 3,380 \cdot \Delta T$	0,729	0,531	0,913	(4a)
dachowy (strona nawietrzna i zawietrzna razem)	628	$Q = 18,284 + 31,126 \cdot w$	0,956	0,914	0,701	(5)
	584	$Q = 16,098 + 9,327 \cdot \Delta T$	0,693	0,480	2,435	(6)
	502	$q_A = 0,0227 + 0,022 \cdot w$	0,975	0,951	0,0005	(7)



Rys. 3. Zależność strumienia powietrza wentylacyjnego od różnicy temperatur

nymi – dwa po stronie zawietrznej i dwa po stronie nawietrznej, wpływ wyporu termicznego może być jeszcze mniejszy. Wymagane w tym celu jest wykonanie badań w szerszym zakresie występowania promieniowa-

nia słonecznego i przy różnych kątach otwarcia wietrzników.

Określony na podstawie badań strumień powietrza wentylacyjnego przeliczono na powierzchnię szklarni, a uzyskany w ten sposób

współczynnik wymiany powietrza q_A przedstawiono w zależności od prędkości wiatru (7) na rys. 4.

Porównanie współczynnika wymiany powietrza dla dni słonecznych z wartością określoną wg ASAE na poziomie $0,04 \text{ m}^3/(\text{sxm}^2)$ pozwala stwierdzić, że na podstawie zależności (7) przy prędkości wiatru $0,8 \text{ m/s}$ uzyskuje się spełnienie warunku. Przy pogodzie słonecznej i bezwietrznej istnieje ryzyko zbyt małej intensywności wymiany powietrza w strefie uprawy roślin w szklarni. Rozkład występowania chwilowych wartości współczynnika wymiany powietrza przedstawia histogram (rys. 5.).

W okresie badań dla 27% obserwacji kryterium skutecznej wentylacji na poziomie $0,04 \text{ m}^3/(\text{sxm}^2)$ nie zostało spełnione. Istotnie statystycznie wartości współczynnika wymiany powietrza są większe od $0,025 \text{ m}^3/(\text{sxm}^2)$, co przy zmiennych prędkościach wiatru pozwala sądzić, że nie istnieje znaczące ryzyko zaburzeń wentylacji i właściwego kształtowania mikroklimatu szklarni.

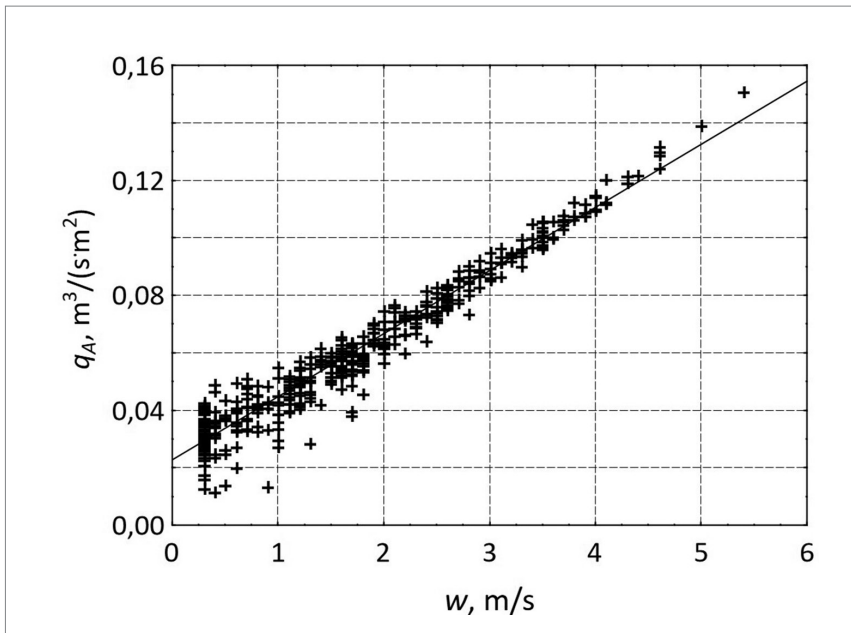
Podsumowanie

W wyniku analiz określono skuteczność wentylacji w szklarni pojedynczej z wietrznikami dachowymi i zainstalowanym wewnątrz ekranem. Pomiary wykonane w szklarni jednonawowej dla dni słonecznych pozwoliły na ustalenie strumienia powietrza wentylacyjnego przepływającego przez wietrzniki strony nawietrznej i zawietrznej. Zależności strumienia powietrza wentylacyjnego od prędkości wiatru oraz różnicy temperatur powietrza wskazują, że główną siłą sprawczą wentylacji naturalnej w badanej szklarni jest prędkość wiatru. Ustalono, że przy prędkościach wiatru powyżej $0,8 \text{ m/s}$ warunek dotyczący skutecznej wentylacji powierzchni uprawnej szklarni określony w [4] jest spełniony.

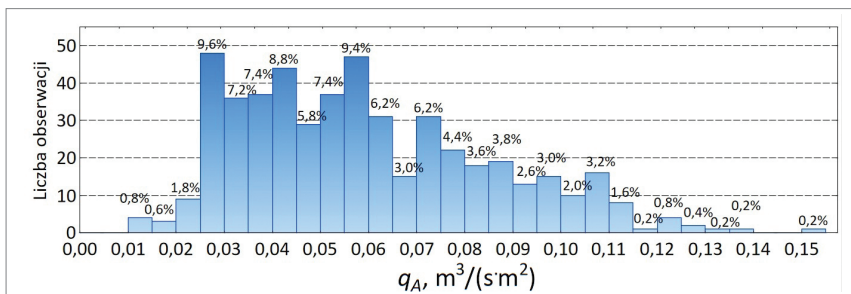
Wietrzniki dachowe stanowią ok. 8% powierzchni dachu szklarni, natomiast ekran jest w 70% zamknięty podczas cieniowania powierzchni uprawnej. Duże odstępstwa między sekcjami zainstalowanego w szklarni ekranu cieniującego nie ograniczają efektu wyporu termicznego zgodnie z [1]. Wskazane jest sprawdzenie skuteczności wentylacji szklarni np. z 80% zamknięciem ekranu cieniującego. Możliwe, że przyrost temperatury w strefie uprawy roślin byłby mniejszy przy jednoczesnym spełnieniu warunku dotyczącego ograniczenia przepływu powietrza w szklarni przez zainstalowany wewnątrz ekran.

Bibliografia:

- [1] Lee I.B., Short T.H., Predicted effects of internal horizontal screens on natural ventilation of a multi-span greenhouse, 91 st Annual International Meeting of ASAE, 987014, 1998, s. 12–16.
- [2] Kittas C., Draoui B., Boulard T., Quantification of the ventilation of a greenhouse with a roof opening, „Agricultural Forest Meteorology”, Vol. 77, 1995. DOI: 10.1016/0168-1923(95)02232-M.
- [3] Bournet P.E., Boulard T., Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies, „Computers and Electronics in Agriculture”, Vol. 74, 2010. DOI: 10.1016/j.compag.2010.08.007



Rys. 4. Zależność współczynnika wymiany powietrza od prędkości wiatru



Rys. 5 Histogram występowania współczynnika wymiany powietrza w szklarni

[4] ASAE Standards, EP406.4: Heating, Ventilating and Cooling Greenhouses, 2003.
 [5] Bot G.P.A., Greenhouse climate: From physical processes to a dynamic model, Agricultural University, Wageningen, 1983.
 [6] De Jong T., Natural ventilation of large multi-span greenhouses, Agricultural University, Wageningen, 1990.
 [7] Bailey B.J., Robertson A.P., Lockwood A.G., The influence of wind direction on greenhouse ventilation, Acta Horticulturae, 633, 2004. DOI: 10.17660/ActaHortic.2004.633.23.
 [8] Boulard T., Meneses J.F., Merimer M., Papadakis G., The mechanisms involved in the natural ventilation of greenhouses, „Agricultural Forest Meteorology”, Vol. 79, 1996. DOI: 10.1016/0168-1923(95)02266-X.
 [9] Papadakis G., Merimer M., Meneses J.F., Boulard T., Measurement and Analysis of Air Exchange Rates in a Greenhouse with Continuous Roof and Side Openings, „Journal of Agricultural Engineering Research”, Vol. 63, 1996. DOI: 10.1006/jaer.1996.0023.
 [10] Teitel M., Liran O., Tanny J., Barak M., Wind driven ventilation of a mono-span greenhouse with a rose crop and continuous screened side vents and its effect on flow patterns and microclimate, „Biosystems Engineering”, Vol. 101, 2008. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2008.05.012.
 [11] Teitel M., Ziskind G., Liran O., Dubovsky V., Letan R., Effect of wind direction on greenhouse ventilation rate, airflow patterns and temperature distributions, „Biosystems Engineering”, Vol. 101, 2008. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2008.09.004.
 [12] Boulard T., Baille A., Modelling of Air Exchange Rate in

a Greenhouse Equipped with Continuous Roof Vents, „Journal of Agricultural Engineering Research”, Vol. 61, 1995. DOI: 10.1006/jaer.1995.1028.
 [13] Pérez Parra J., Baeza E., Montero J.I., Bailey B.J., Natural Ventilation of Perral Greenhouses, Biosystems Engineering, Vol. 87, 2004. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2003.12.004.

DOI: 10.5604/01.3001.0014.8387

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA
 Grabarczyk Sławomir, 2021, Skuteczność wentylacji naturalnej w szklarni, „Builder” 05 (286). DOI: 10.5604/01.3001.0014.8387

Streszczenie: W szklarniach w celu utrzymania właściwej temperatury wewnętrznej, w okresie występowania dużych wartości natężenia promieniowania słonecznego, stosuje się zabiegi cieniowania z użyciem ekranów termoizolacyjnych oraz wietrzenia. Badania przeprowadzono w szklarni jednonawowej w celu określenia skuteczności wentylacji

naturalnej. Przedmiotem analiz jest szklarnia z zainstalowanym wewnątrz ekranem termoizolacyjnym. Badania przeprowadzono podczas dni letnich. Efektem analiz było określenie na podstawie pomiarów i analiz obliczeniowych strumienia powietrza wentylacyjnego przepływającego przez wietrzniki dachowe szklarni. Ustalono zależności strumienia powietrznego po stronie nawietrznej oraz zawietrznej od prędkości wiatru, a także różnicy temperatur wewnątrz i na zewnątrz szklarni. Na podstawie obliczeń wykonanych dla obserwacji podczas cieniowania powierzchni uprawnej oraz przy otwartych wietrznikach określono współczynniki wymiany powietrza na powierzchnię jednostkową szklarni. Ustalono, że przy prędkości wiatru przekraczającej 0,8 m/s współczynnik wymiany powietrza w badanej szklarni przekracza wartość zalecaną przez ASAE wynoszącą 0,04 m³/(sxm²).
Słowa kluczowe: szklarnia, wentylacja naturalna, ekran

Abstract: EFFECTIVENESS OF NATURAL VENTILATION IN A GREENHOUSE. In greenhouses, in order to maintain proper indoor air temperature, during the period of high values of solar radiation intensity, shading treatments using thermal screens and ventilation are applied. The research was carried out in a mono-span greenhouse in order to determine the effectiveness of natural ventilation. The object of analysis is a greenhouse with a thermal screen installed inside. The tests were carried out during the summer days. The effect of the research was to determine the ventilation air flow through the vents of the greenhouse on the basis of measurements and calculation analyzes. The dependence of the air flow on the windward and leeward side was determined from the wind speed and the temperature difference between the indoor and outdoor air. On the basis of calculations made from observation during shading of the cultivated area and with open ventilators, the coefficients of air exchange per unit floor area of the greenhouse were determined. It was established that at a wind speed exceeding 0.8 m/s, the air exchange rate in the tested greenhouse exceeds the value recommended by the American Society of Agricultural Engineers of 0,04 m³/(sxm²).

Keywords: greenhouse, natural ventilation, screen