

WYTYCZNE KONSTRUKCYJNO-EKSPLOATACYJNE DLA SYSTEMÓW WYKORZYSTUJĄCYCH POMPE CIEPŁA DO OGRZEWANIA OBIEKTÓW OGRODNICZYCH

Sławomir Kurpaska

Katedra Inżynierii Rolniczej i Informatyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. W pracy na podstawie wykonanych serii doświadczeń, opracowano nomogramy do określania parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych systemów mono i biwalentnych wykorzystujących pompę ciepła do ogrzewania obiektów ogrodnich. W nomogramie dla systemu biwalentnego, w zależności od sumy promieniowania słonecznego przedstawiono graficznie ilość ciepła zmagazynowanego w zbiorniku akumulacyjnym, zmniejszenie temperatury wody podczas pracy pompy ciepła oraz ilość dostarczonego ciepła do wnętrza obiektu ogrodnich. Z kolei, dla systemu monowalentnego zobrazowano graficznie zapotrzebowanie mocy grzewczej kotła dla rozpatrywanego obiektu, moc ciepła wytwarzaną przez pompę grzewczą wraz wymaganą długością wymienników poziomych oraz liczbę odwiertów dla wymienników pionowych.

Słowa kluczowe: układ mono i biwalentny, parametry konstrukcyjno- eksploatacyjne, tunel foliowy, pompa ciepła

Wstęp

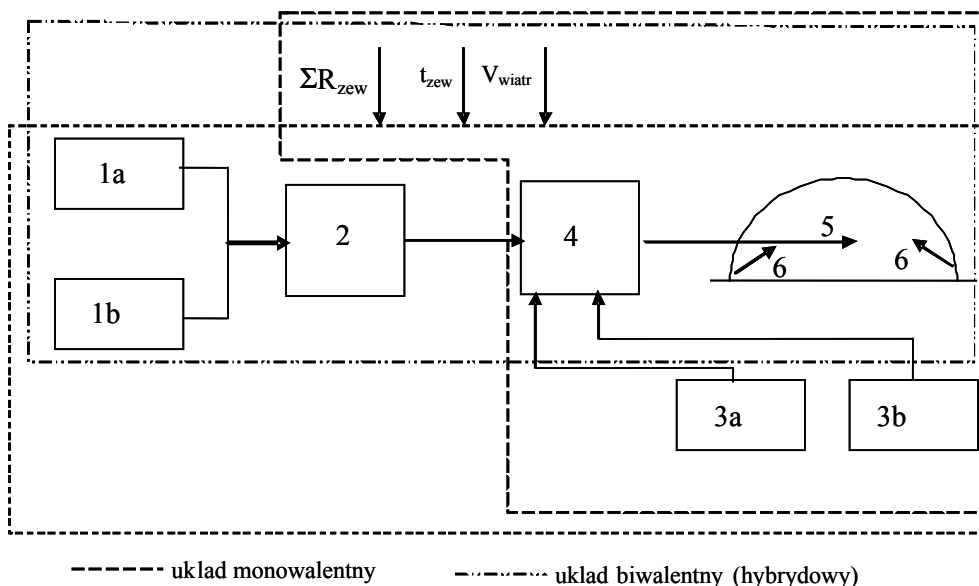
Przy stosowaniu dodatkowych urządzeń współpracujących z elementami systemu stanowiących standardowe wyposażenie obiektów, zachodzi konieczność opracowania założeń projektowych związanych z głównymi wielkościami charakteryzującymi te urządzenia. Problem ten występuje również przy wykorzystaniu energii odnawialnej do ogrzewania obiektów ogrodnich. Ogrzewanie obiektów może następować m.in. w wyniku dostarczania ciepła powstałego w wyniku konwersji promieniowania słonecznego w kolektorach oraz stosowania w instalacji pompy ciepła. W systemie ogrzewania w którym wykorzystywane jest ciepło powstałe w wyniku konwersji promieniowania elementami systemu biwalentnego (hybrydowego) są: kolektory słoneczne (najczęściej płaskie, próżniowe), zbiornik akumulacyjny oraz wymiennik ciepła stanowiący dolne źródło ciepła pompy grzewczej, zaś w układzie monowalentnym występuje jedynie pompa ciepła współpracująca z wymiennikami gruntowymi. Energia przeniesiona przez pompę ciepła (z dolnego źródła) przy dostarczaniu energii elektrycznej służącej do napędu elementów systemu, przekazywana jest do wnętrza obiektu w wyniku czego następuje wzrost temperatury powietrza. Z punktu widzenia użytkownika takiego systemu, nieodzownymi problemami do rozwiązania są dobór: systemu odbioru ciepła ze zbiornika buforowego pompy grzewczej, powierzchnia wymiany ciepła w dolnym źródle ciepła (wymienniki gruntowe, wymiennik typu ciec-

ciecz w układzie biwalentym) a także spodziewane efekty w postaci zmniejszenia energii pochodzącej ze spalania tradycyjnych nośników ciepła. Zagadnienie współpracy tradycyjnego systemu grzewczego z elementami systemu w których wykorzystywana była energia odnawialna było problemem badawczym, w którym autorzy analizowali m.in.: możliwość wykorzystania energii odnawialnej do ogrzewania obiektów ogrodnich zlokalizowanych w różnych warunkach klimatycznych [Garcia i in. 1998]; efekty ekologiczno-ekonomiczne zastępowania tradycyjnych nośników ciepła [Ossebaard i in. 1997; Hamdan i in. 1992.; Groscurth i in. 1993]; efekty energetyczne podczas współpracy układu solarnego z instalacją wykorzystującą pompą ciepła w układzie hybrydowym [Badescu 2002; Xu i in. 2006; Kaygusuz i Ayhan 1999], wydajność cieplną elementów pompy grzewczej [Kaygusuz 2000; Ozgener i Hepbasli 2005]. Analizując przedstawione w tych pracach wyniki można stwierdzić, że autorzy wykonywali badania w różnych konfiguracjach systemów współpracujących z tradycyjnym układem grzewczym, przy arbitralnie przyjętych wielkościach charakteryzujących te obiekty oraz zróżnicowanych warunkach klimatycznych w których były one zlokalizowane. Celowe jest więc przeprowadzenie analizy i określenie wytycznych konstrukcyjno-eksploatacyjnych dla standardowych obiektów zlokalizowanych w warunkach polskiego klimatu.

Material i metoda

Przy opracowywaniu parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych dla instalacji podobnych w których wykonywane były badania laboratoryjne, należy brać pod uwagę wiarygodność uzyskanych wyników tak, aby można je było aplikować do podobnych ogrzewanych obiektów ogrodnich. W naukach stosowanych (inżynieria chemiczna) przy przenoszeniu wyników tak uzyskanych na inne obiekty stosuje się tzw. procedurę powiększania skali [Kasprzycki i Mikołajczyk 1988]. Parametrem charakteryzującym zapotrzebowanie energetyczne obiektu jest współczynnik przenikania ciepła z wnętrza obiektu do otoczenia. W pracy [Kurpaska i in. 2004] w oparciu o tzw. teorię podobieństwa zjawisk fizycznych stwierdzono w konkluzji, że najmniejszy błąd przy przenoszeniu wyników (uzyskanych na odmiennym do obiektów produkcyjnych stanowisku laboratoryjnym) popełniany jest wtedy, gdy prowadzone badania wykonywane są w obiektach charakteryzujących się porównywalnymi: wymiarami konstrukcji (podobieństwo geometryczne), temperaturami wywołującymi zmiany w zużyciu ciepła (podobieństwo cieplne) oraz występującymi porównywalne siły wymuszające wymianę ciepła (podobieństwo hydrodynamiczne i podobieństwo rodzaju płynu). Jak wykazały wcześniejsze badania przeprowadzone w obiekcie laboratoryjnym oraz w trzech obiektach produkcyjnych (omówione szczegółowo w cytowanej literaturze) uzyskane wyniki cechowały się wysoką zbieżnością.

Przedmiotem rozważań był system biwalentny (hybrydowy) oraz monowalentny wykorzystywany do wspomaganego ogrzewania obiektu ogrodnich (rys. 1). System biwalentny składa się z: kolektorów płaskich (1a) oraz próżniowych (1b), zbiornika akumulacyjnego (2), pompy ciepła (4) układu doprowadzenia ciepła do ogrzewanego obiektu (5). Z kolei w systemie monowalentnym integralnymi częściami oprócz pompy grzewczej, układu doprowadzenia ciepła są poziome (3a) oraz pionowe (3b) gruntowe wymienniki ciepła. Na system oddziałują parametry otaczającego klimatu: suma promieniowania słonecznego (ΣR_{zew}), temperatura (t_{zew}) oraz prędkość wiatru (V_{wiatr}).



Rys. 1. Schemat analizowanego systemu wspomaganego ogrzewania obiektu ogrodniczego energią ze źródeł odnawialnych wraz z jego otoczeniem w układzie mono i biwalentnym: 1a - kolektory ciekowe; 1b - kolektory próżniowe; 2 - zbiornik akumulacyjny; 3a - wymiennik pionowy; 3b - wymiennik poziomy; 4 - pompa ciepła; 5 - ciepło ze źródeł energii odnawialnej; 6 - ciepło z systemu tradycyjnego

Fig. 1. Diagram of the analyzed system to aid the heating of a horticultural object by using energy from renewable sources, together with the monovalent and bivalent system surroundings: 1a - liquid collectors; 1b - vacuum collectors; 2 - storage tank; 3a - vertical exchanger; 3b - horizontal exchanger; 4 - heat pump; 5 - heat from renewable energy sources; 6 - heat from conventional system

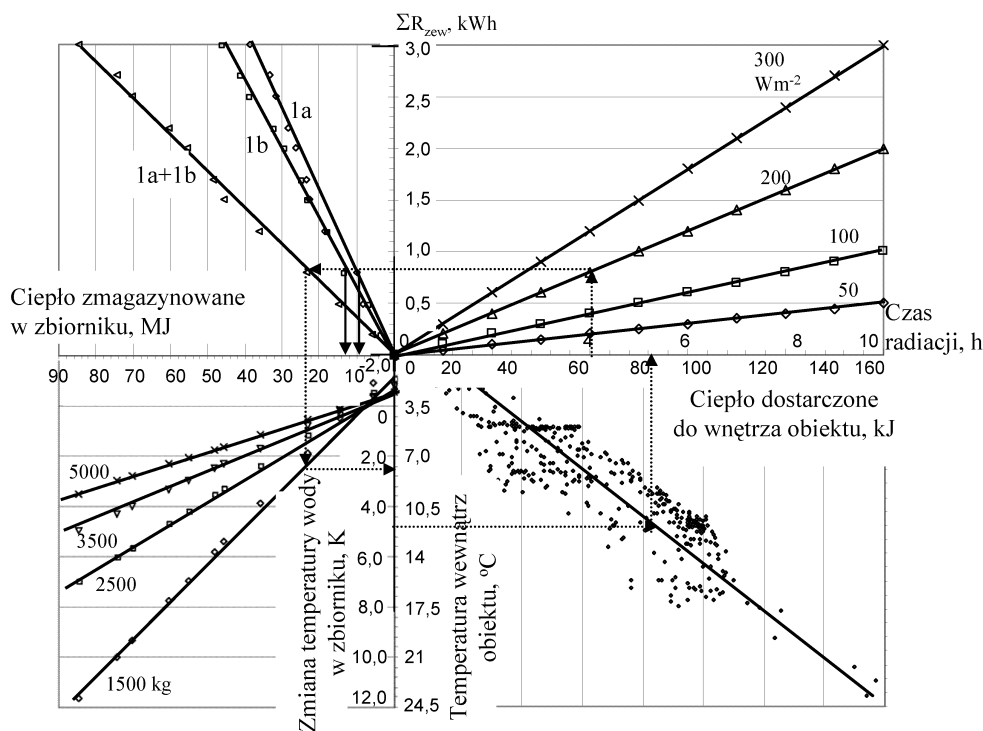
Istotnym, aplikacyjnym zagadnieniem jest podanie wytycznych w postaci: ilości ciepła zmagazynowanego w zbiorniku akumulacyjnym (uzależnionej od warunków otoczenia oraz rodzaju zastosowanych kolektorów słonecznych), wymaganej długości poziomych wymienników gruntowych (uzależnionej od ich rodzaju oraz konfiguracji przestrzennej), głębokości i liczby odwiertów (wymienniki pionowe) oraz stopień pokrycia zapotrzebowania ciepła przez elementy wykorzystujące źródła energii odnawialnej. Wszystkie wyliczenia wykonano dla sprężarkowej pompy ciepła o znamionowej mocy grzewczej równej 9,5 kW.

Wyniki i dyskusja

Wyliczenia, uzyskane na podstawie przeprowadzonych badań na stanowisku laboratoryjnym zlokalizowanym w obiektach Wydziału Agrotechnologii, wykonano dla następujących parametrów istniejących instalacji: powierzchnia kolektorów słonecznych 8 m² (kolektory ciekowe) oraz 4,3 m² (kolektory próżniowe), całkowita powierzchnia tunelu

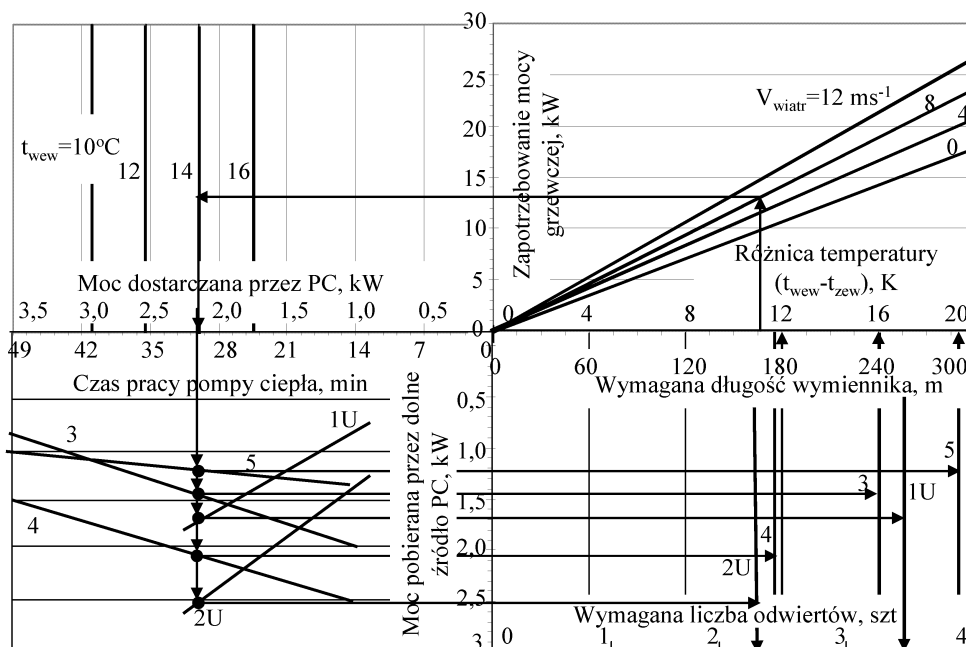
54m², powierzchnia osłony tunelu 113 m², całościowa długość poziomych wymienników była równa 300 m lub trzy odwierty na głębokość ok. 20 m (w jednym znajduje się podwójny wymiennik ciepła typu 2U, zaś w dwóch pojedynczy typu 1U), sumaryczna powierzchnia czynna wymienników ciecz- powietrze 12 m², powierzchnia węzownicy stanowiącej dolne źródło ciepła pompy grzewczej równa 5,4 m² oraz powierzchnia węzownic kolektorów płaskich i próżniowych odpowiednio 1,38 oraz 1,14 m². W analizie uwzględniono rzeczywiste cykle pracy pompy ciepła w postaci: średni czas pracy pompy współpracującej ze zbiornikiem akumulacyjnym od 14,5 do 16,1 min (odpowiednio dla masy wody zmagazynowanej w zbiorniku 1500 oraz 5000 kg), w przypadku układu monowalentnego 22 min (wymienniki pionowe) oraz 26 min (wymienniki poziome); średni czas rozładowywania zbiornika buforowego 60 min (układ monowalentny) oraz 65 min (układ biwalentny). Ciepło uzyskane z konwersji promieniowania słonecznego oraz zmagazynowane w zbiorniku wyliczono dla rzeczywistych warunków istniejących podczas badań. Na rys. 2 przedstawiono opracowany nomogram dla systemu biwalentnego. W pierwszej ćwiartce nomogramu zaznaczono sumę energii promieniowania słonecznego w zależności od czasu i średniej radiacji. W drugiej ćwiartce zamieszczono ilość ciepła zmagazynowanego w zbiorniku akumulacyjnych dla istniejących kolektorów dla pojedynczych kolektorów (próżniowe- 1a, cieczowe- 1b) oraz sumarycznych (oznaczenia 1a +1b). Jak widać w zależności czasu i natężenia promieniowania słonecznego w zbiorniku istnieje możliwość zmagazynowania blisko 90 MJ ciepła. Z kolei, w trzeciej ćwiartce przedstawiono obniżenie temperatury cieczy zmagazynowanej w zbiorniku w zależności od masy wody magazynowanej dla średniego czasu cyklu pracy pompy grzewczej. Analizując te zależności można zauważyć, że w dla istniejących powierzchni kolektorów słonecznych, przy sumie promieniowania słonecznego powyżej ok. 500 Wh energii promieniowania słonecznego, ciepło powstałe z konwersji promieniowania słonecznego równoważy zapotrzebowanie przez pompę grzewczą, tym samym powyżej tej wartości energii słonecznej możliwy jest przyrost temperatury wody magazynowanej w zbiorniku. W czwartej ćwiartce przedstawionych zależności graficznych zobrazowano ilość ciepła dostarczonego do wnętrza obiektu (w przeliczeniu na pojedynczy cykl rozładowywania zbiornika akumulacyjnego) w zależności od temperatury wewnątrz obiektu ogrodniczego. Jak widać, wraz ze wzrostem temperatury powietrza, drastycznie maleje ilość ciepła dostarczana do wnętrza obiektu przy zastosowaniu wymienników typu ciecz- powietrze.

Na opracowanym nomogramie, zaznaczano również sposób posługiwania się przedstawionymi zależnościami graficznymi. I tak, jeśli przez okres 4 godzin, średnie natężenie promieniowania słonecznego jest równe 200 W·m⁻², wtedy suma energii promieniowania słonecznego wynosi 0,8 kW·h, w tym czasie w wyniku pracy kolektorów zmagazynowano blisko 22 MJ ciepła w zbiorniku (z cieczowych uzyskano 10 zaś z próżniowych około 12 MJ ciepła). Jeśli w zbiorniku zmagazynowane było 1500 kg wody wtedy, pomimo poboru ciepła przez pompę grzewczą, średnia temperatura wody w zbiorniku wzrosła blisko o 2 K. Jeśli założona temperatura wewnątrz wynosiła 12 °C, wtedy podczas jednego cyklu trwającego 30 sekund, do wnętrza obiektu zainstalowane wymienniki dostarczyły blisko 80 kJ ciepła.



Rys. 2. Nomogram do określania parametrów eksploatacyjnych systemu w układzie biwalentnym
 Fig. 2. A nomogram to determine operational parameters of the bivalent system

Na rys. 3 przedstawiono nomogram opracowany dla systemu monowalentnego. W pierwszej ćwiartce układu współrzędnych zaznaczono zapotrzebowanie mocy grzewczej dla analizowanego tunelu foliowego w funkcji różnicy temperatury między powietrzem wewnątrz i na zewnątrz obiektu dla różnych prędkości wiatru. Dane te zaczerpnięto z poprzednio wykonanych badań [Kurpaska i in. 2004]. W drugiej ćwiartce opracowanego nomogramu zaznaczono moc przekazywaną do wnętrza obiektu dla zróżnicowanych (przyjętych arbitralnie) wartości temperatury powietrza. W trzeciej ćwiartce zaznaczono strumień ciepła pobierany przez dolne źródło pompy grzewczej w zależności od rodzaju wymienników wykorzystanych w badaniach: pojedynczy wymiennik pionowy typu 1U; odwiert w którym zainstalowano podwójny wymiennik typu 2U, pojedynczy poziomy wymiennik gruntowy głębokości 1,75 m - 3; podwójny równoległy wymiennik poziomy o głębokości posadowienia 1,5 i 2,3 m - oznaczenie 4 oraz 5 wymiennik spiralny.



Rys. 3. Nomogram do określania parametrów eksploatacyjnych systemu w układzie monowalentnym: 1U- pojedynczy wymiennik pionowy; 2U - podwójny wymiennik pionowy; 3 - wymiennik pojedynczy; 4 - podwójny równoległy wymiennik poziomy; 5 - wymiennik spiralny

Fig. 3. A nomogram to determine operational parameters of the monovalent system 1U - single vertical exchanger; 2U - double vertical exchanger; 3 - single exchanger; 4 - double parallel horizontal exchanger; 5 - spiral-tube heat exchanger

Z kolei, w czwartej ćwiartce zamieszczono wymagane długości (wymyenniki poziome) oraz liczby odwiertów (dla wymyenników pionowych).

Sposób posługiwania się opracowanymi zależnościami graficznymi jest następujący. Znając różnicę temperatury między wnętrzem i otoczeniem obiektu oraz średnią prędkość wiatru można odczytać zapotrzebowanie mocy grzewczej dla istniejącego obiektu (tunel foliowy o powierzchni użytkowej 54 m^2). Dysponując znajomością wartości mocy grzewczej z drugiej ćwiartki odczytujemy moc cieplną wytwarzaną przez pompę grzewczą (dwa wymyenniki typu ciecz- powietrze). Jak można zauważyć, jeśli różnica temperatury wynosi 11 K oraz prędkość wiatru $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ wtedy wymagana moc grzewcza kotła jest równa ponad 13 kW, jeśli w obiekcie należy utrzymać temperaturę wewnątrz równą 14°C , wtedy moc kotła może być pomniejszona o blisko 2,2 kW.

Dla uzyskania tej mocy cieplnej, w zależności od zastosowanego rodzaju wymyennika dolnego źródła ciepła (ćwiartka trzecia), można odczytać w czwartej ćwiartce wymaganą długość wymyenników (wymyenniki poziome) lub liczbę odwiertów o głębokości 20 m. W zaznaczonym na nomogramie przykładzie, długość wymyenników poziomych w zależności od ich konfiguracji geometrycznej mieści się w granicach od 174 m (podwójny wy-

miennik równoległy) do 291 m (wymiennik spiralny). Z kolei, jeśli w instalacji zastosowane są odwierty pionowe wtedy dla tej mocy grzewczej wymagane jest wykonanie dwóch odwiertów o głębokości 24 m w których zainstalowany zostanie podwójny wymiennik z układem zasilania typu 2U lub też trzy odwierty na głębokość ok. 23 m z pojedynczym wymiennikiem z układem zasilania 1U. W analizie założono liniowy spadek temperatury czynnika obiegowego wraz z jego długością.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej analizy opracowano zależności graficzne dla systemów wykorzystujących pompę ciepła do ogrzewania obiektów ogrodnich w układzie mono i biwalentnym. Z faktu, iż przeprowadzone badania wykonane zostały na obiektach charakteryzujących się podobieństwem geometrycznym oraz zachowano podobieństwo sił napędowych wymuszających wymianę ciepła pozwalają na stwierdzenie, że uzyskane wyniki można przenosić na inne obiekty w których planowane byłoby instalowanie analogicznych systemów wspomagających ogrzewanie przy wykorzystaniu źródeł energii odnawialnej (energia słoneczna, energia wnętrza ziemi). Stąd, dysponując określonymi zależnościami parametry konstrukcyjno- eksploatacyjne obiektów podobnych wynikają tylko z proporcji wymiarów geometrycznych oraz mocy grzewczej pompy ciepła.

Bibliografia

- Badescu V.** 2002. Model of a space heating system integrating a heat pump, photothermal collectors and solar cells. *Renewable Energy* 27. s. 489-505.
- Garcia J.L., De la Plaza S., Navas L.M., Benavente R.M., Luna L.** 1998. Evaluation of the Feasibility of Alternative Energy Sources for Greenhouse Heating. *Journal of Agricultural Engineering Research* 69(2). s. 107-114.
- Groscurth H.M., Bruckner T., Kummel R.** 1993. Energy, cost, and carbon dioxide optimization of disaggregated, regional energy-supply systems. *Energy* 18(12). s. 1187- 1205.
- Hamdan M. A., Al-Sayeh A. I., Jubran B. A.** 1992. Solar hybrid heating systems for greenhouses. *Applied Energy* 41(4). s. 251- 264.
- Kasprzycki J., Mikołajczyk Z.** 1988. Wykorzystanie metody powiększania skali do projektowania wyparki błonkowej grawitacyjnej. *Inżynieria Chemiczna i Procesowa* 1. s. 47-56.
- Kaygusuz K., Ayhan T.** 1999. Experimental and theoretical investigation of combined solar heat pump system for residential heating. *Energy Conversion and Management* 40(13) . s. 1377-1396.
- Kaygusuz K.** 2000. Experimental and theoretical investigation of a solar heating system with heat pump. *Renewable Energy* 21(1) . s. 79-102.
- Kurpaska S., Latała H., Michałek R., Rutkowski K.** 2004. Funkcjonalność zintegrowanego systemu grzewczego w ogrzewanych tunelach foliowych. *PTIR Kraków*. s. 118.
- Ossebaard M.E., Van Wijk A.J.M., Van Wees M.T.** 1997. Heat supply in The Netherlands: A system analysis of costs, exergy efficiency, CO₂, and NO_x emissions. *Energy* 22(11) . s. 1087- 1098.
- Ozgener O., Hepbasli A.** 2005. Experimental performance analysis of solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system. *Energy and Buildings* 37(1). s. 101-110.
- Xu G., Zhang A., Deng S.** 2006. simulation study on the operating performance of a solar-air source heat pump water heater. *Applied Thermal Engineering*. 26 (11-12). s. 1257-1265.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2005-2008 jako projekt badawczy.

CONSTRUCTIONAL AND OPERATIONAL GUIDELINES FOR SYSTEMS USING A HEAT PUMP TO HEAT HORTICULTURAL OBJECTS

Abstract. On the basis of a series of experiments performed, nomograms for determining constructional and operational parameters of monovalent and bivalent systems, using a heat pump to heat horticultural objects, have been developed. In the nomogram for the bivalent system, depending on the sum of the solar radiation, the amount of heat stored in an accumulation tank, the decrease in the temperature of water during pump operation and the amount of heat supplied to the interior of the horticultural object, have been graphically presented. For the monovalent system the heating power required by the boiler in the discussed horticultural object, thermal power produced by the heat pump, together with the required length of horizontal exchangers, and the number of boreholes for vertical exchangers have been graphically presented.

Key words: monovalent and bivalent systems, constructional and operational parameters, foil tunnel, heat pump

Adres do korespondencji:

Sławomir Kurpaska; e-mail: rtkurpas@cyf-kr.edu.pl
Katedra Inżynierii Rolniczej i Informatyki
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
ul. Balicka 116B
30-149 Kraków