P.3355/69

# INŻYNIERIA SANITARNA z. 14

STANISŁAW MIERZWIŃSKI

# ZAGADNIENIA DOBORU WŁASNOŚCI INSTALACJI OGRZEWCZEJ DLA LEKKIEGO OBIEKTU

25-LECIE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
ZESZYT NAUKOWY Nr 248 – GLIWICE 1969

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE . . . . . 3

2. BADANY OBIEKT . . . . . 7

2.1. Naturalny obiekt . . . . . 7
2.2. Modele obiektu . . . . . 11
2.3. Pożądane warunki cieplne . . . . . 14

3. ROZDZIAŁ CIEPŁA PRZEZ INSTALACJĘ OGRZEWCZĄ . . 15

3.1. Bilans cieplny szklarni . . . . . 15
3.2. Temperatura oszklenia i straty ciepła szklarni . . . . 22
3.3. Pola temperatur i prędkości powietrza w szklarni . . . 26

3.3.1. Stan quasi — ustalony . . . . . 26
3.3.2. Badania w naturalnym obiekcie . . . . . 27
3.3.3. Badania w modelu fizykalnym . . . . . 28

4. CHARAKTERYSTYKA DYNAMICZNA SZKLARNI . . . 32

4.1. Analiza matematyczna własności obiektu . . . . . 34

4.1.1. Transmitancje obiektu zogrzewaniem powietrznym . 41
4.1.2. Transmitancje obiektu z ogrzewaniem powietrznym . 41

4.2. Badania przy pomocy modelu analogowego . . . . 49
4.3. Omówienie wyników badań . . . . . 52

5. REGULACYJNOŚĆ INSTALACJI OGRZEWCZEJ SZKLARNI . 60

5.1. Dynamiczne parametry instalacji ogrzewczej . . . . 60
5.2. Przebieg i jakość regulacji temperatury . . . . . 63
5.3. Omówienie wyników badań . . . . . 68

6. WNIOSKI . . . . . 72

Oznaczenia wielkości i jednostek miar . . . . . 75

Literatura . . . . . 77

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 248

P.3355/69

STANISŁAW MIERZWIŃSKI

# ZAGADNIENIA DOBORU WŁASNOŚCI INSTALACJI OGRZEWCZEJ DLA LEKKIEGO OBIEKTU

PRACA HABILITACYJNA Nr 88

Data otwarcia przewodu habilitacyjnego 19. V. 1969 r.

GLIWICE 1969

REDAKTOR NACZELNY ZESZYTÓW NAUKOWYCH
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

*Fryderyk Staub*

REDAKTOR DZIAŁU

*Stanisław Mierzwiński*

SEKRETARZ REDAKCJI

*Witold Gużkowski*

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej
Gliwice. ul. M. Strzody 18

PJ 85(69

Nakł. 100+165 Ark. wyd. 4,46 Ark. druk. 5,25 Papier offsetowy kl. III, 70x100, 70 g
Oddano do druku 15. 3. 1969 Podpis. do druku 19. 5. 1969 Druk ukończ. w maju 1969
Zam 475 15. 3. 1969 O-22 Cena zł 6,—

Skład, fotokopie, druk i oprawę
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

# 1. WPROWADZENIE

Budynki o lekkiej konstrukcji przegród są w dużym stopniu podatne na wpływy cieplne otoczenia. Z tego powodu rozwiązanie i dobór własności instalacji ogrzewczej dla takich obiektów wymaga specjalnego potraktowania. Związane z tym zagadnienia analizowane są poniżej na przykładzie szklarni, która posiada bardzo lekki ustrój budowlany. Instalacja ogrzewcza szklarni pełni ponadto ważną technologiczną funkcję, co ułatwia przyjęcie kryteriów jakości ogrzewania.

Dotychczas w kraju i za granicą stosowane są w szklarniach różne systemy i warianty konstrukcyjne istalacji ogrzewczych. Instalacje te w różnym stopniu spełniają swoje zadanie. W ostatnich latach coraz częściej buduje się wielohektarowe kombinaty szklarniowe, których potrzeby ogrzewcze niekiedy przewyższają 100 MW. W Polsce jest już realizowany na Śląsku obiekt o powierzchni 10 ha pod szkłem w pierwszym etapie (ok. 50 MW), a na najbliższą przyszłość projektuje się budowę 20-hektarowego kombinatu w rejonie Warszawy. Za granicą realizowane są jeszcze większe obiekty.

Przejście do budowy tak dużych kombinatów dodatkowo pociąga za sobą konieczność rewizji dotychczasowych zasad projektowania i eksploatowania ich instalacji ogrzewczych.

Prace w zakresie ogrzewania szklarni prowadzone są przez szereg ośrodków naukowych za granicą i przez nieliczne ośrodki w kraju. Dotyczą one szerokiego wachlarza zagadnień, jak: bilans cieplny szklarni [1-8], ulepszenia określonych systemów ogrzewania [9-11], modernizowanie urządzeń ogrzewniczych [12-13] oraz wprowadzanie automatycznej regulacji, uwzględniającej ekologiczne zadania obiektu [14-16]. Niektóre z nich obejmują również systematyczne pomiary mikroklimatu badanych obiektów, umożliwiające konfrontację uzyskiwanych efektów ogrzewniczych i produkcyjnych.

Prace te nie wyjaśniają jednak sposobu doboru rozwiązania instalacji ogrzewczej do aktualnych energetycznych i ekologicznych potrzeb szklarni.

Dla obiektów tak lekkich i wrażliwych na jakość prowadzenia procesu ogrzewania, jak szklarnie, a zwłaszcza szklarnie w dużych zespołach, tradycyjne charakteryzowanie instalacji ogrzewczej nominalną wydajnością cieplną, powierzchnią ogrzewalną, średnią temperaturą czynnika grzejnego i jej spadkiem - nie wystarcza. Nie można również uważać, że instalacja ta pracuje w obiekcie o ustabilizowanych i przestrzennie wyrównanych wartościach parametrów cieplnych. Potrzebne jest wyjście poza takie statyczne zasady projektowania i należy zwrócić uwagę na zagadnienia, które wywierają istotny wpływ na proces ogrzewania. Zdaniem autora do zagadnień takich należą:

- przestrzenne oddziaływanie instalacji ogrzewczej na obiekt i wynikające stąd możliwości wpływania na warunki cieplne jego wnętrza;
- własności dynamiczne szklarni jako obiektu regulacji temperatury;
- czasowe oddziaływanie instalacji ogrzewczej na parametry obiektu w procesie regulacji ogrzewania.

Przestrzenny rozdział strumieni ciepła i związane z nim pola temperaturowe wnętrza decydują zarówno o możliwości uzyskania pożądanych warunków cieplnych, jak i o wysokości strat ciepła obiektu, a zatem także o kosztach ogrzewania. Rozdział ciepła może więc być ważną wskazówką dla przyjęcia systemu ogrzewania oraz rozwiązania i rozmieszczenia urządzeń. Z własności dynamicznych obiektu wynikają jego wymagania co do regulacyjnych własności instalacji ogrzewczej, a stąd co do jej układu i konstrukcji, umożliwiającej właściwy przebieg ogrzewania.

Można zatem uważać, że wyjaśnienie wymienionych zagadnień stworzy podstawy dla celowego doboru parametrów konstrukcyjnych i ruchowych instalacji ogrzewczej szklarni.

Literatura obca w tej dziedzinie jest bardzo skąpa. W odniesieniu do dynamicznych własności szklarni dopiero ostatnio ukazała się praca [46]. Poza tym są tylko pewne dane dotyczące fi-

totronów [17]. Brak natomiast publikacji na temat regulacyjności instalacji ogrzewczych szklarni i budynków innych typów. W tym zakresie autor korzystał z literatury dotyczącej dynamiki procesów cieplnych [29-40], przy czym dla rurowej instalacji ogrzewczej, traktowanej jako obiekt o parametrach rozłożonych, starano się wykorzystać prace z zakresu dynamiki wymienników ciepła i przegrzewaczy pary.

Wymienione poprzednio badania obce prowadzone były głównie w doświadczalnych szklarniach, jakie w kraju dopiero buduje się w Instytucie Ogrodnictwa w Skierniewicach. Natomiast autorowi udało się uzyskać tylko na pewien okres poligon doświadczalny w szklarniach PGO Pszczyna. Dlatego w badaniach, składających się na niniejszą pracę, starano się wykorzystać w dużym stopniu technikę modelowania. Przyjęto również, że nie byłoby celowe preferowanie dla szklarni jakiegokolwiek systemu ogrzewania. Warto natomiast zebrać tyle informacji o każdym z nich, aby można było tworzyć rozwiązania, zdolne zapewnić warunki cieplne, aktualnie potrzebne ekologom upraw szklarniowych.

Ze względu na szeroki zakres zagadnień ograniczono się do badań wybranego typu szklarni, zwracając uwagę na opracowanie metodyki badań własności instalacji ogrzewczych. Dla rozwiązania zadania okazało się potrzebne przeprowadzenie następujących prac badawczych:

1. W latach 1964/65 zaprojektowano i wykonano doświadczalne instalacje ogrzewcze w szklarni Państwowego Gospodarstwa Ogrodniczego w Pszczynie. Dzięki tym instalacjom przeprowadzono w produkcyjnej szklarni badania warunków cieplnych i bilansu cieplnego przy trzech różnych jego systemach. Zebrano w ten sposób dane dla badań modelowych.

2. Przy pomocy hydrodynamicznego modelu analogowego szklarni przeprowadzono analizę jej bilansu cieplnego dla ustalenia udziału poszczególnych strumieni cieplnych w wymianie ciepła w jej wnętrzu oraz w stratach do otoczenia.

3. Przy pomocy fizykalnego modelu szklarni badano pola temperaturowe i prędkości powietrza w szklarni przy ogrzewaniu

powietrznym celem określenia przydatności różnych sposobów rozdziału powietrza oraz dla ustalenia zasad konstruowania urządzeń ogrzewania powietrznego.

4. Przy pomocy modelu analogowego szklarni i elektronowych urządzeń analogowych badano własności dynamiczne szklarni jako obiektu regulacji temperatury oraz przebiegi regulacji temperatury przy wybranych systemach ogrzewania dla ustalenia metod doboru parametrów konstrukcyjnych i ruchowych instalacji.

5. Przy pomocy matematycznej maszyny cyfrowej Odra-1003 przeprowadzono teoretyczną analizę dynamicznych własności szklarni i instalacji ogrzewczych dla sprawdzenia i rozszerzenia zakresu badań wymienionych powyżej.

Badania wymienione w p. 1 i 2, wykonane w porozumieniu z Ministerstwem Rolnictwa, były kontynuacją pracy [3] w odniesieniu do trzech nowych systemów ogrzewania, podczas gdy praca [3] obejmowała badania warunków cieplnych w szklarni z tradycyjnym, rurowym ogrzewaniem.

W szklarniach praktycznie nie występuje stan równowagi cieplnej. Dlatego w badaniach poświęcono sporo miejsca zagadnieniom dynamicznych własności obiektu (rozdz. 4 i 5). Niemniej w rozważaniach analitycznych brano pod uwagę również stany równowagi cieplnej, które wskazują kierunki stabilizacji wartości parametrów cieplnych obiektu w określonych warunkach. Dzięki temu charakteryzują one wpływ systemu ogrzewania na warunki cieplne wnętrza (rozdz. 3).

W oparciu o przeprowadzone badania opracowano szczegółowe wytyczne i zalecenia dla projektowania rurowych ogrzewań kombinatów szklarniowych [45]. Obecnie w opracowaniu są dane wyjściowe dla projektowania ogrzewań powietrznych. Ze względu na praktyczny charakter tych opracowań nie załącza się ich do niniejszej pracy, pozostawiając samą część badawczą.

Opracowane wytyczne były już wykorzystane przy projektowaniu wspomnianego kombinatu ogrodniczego na Śląsku. W kombinacie tym, już odpowiednio instalacyjnie przystosowanym, będą prowadzone dalsze badania, niezbędne dla kontroli wyników do-

tychczasowych prac. Kontroli takiej nie można było przeprowadzić w PGO Pszczyna (p. 1), gdzie po dwóch latach instalacje doświadczalne musiały być zdemontowane.

## 2. BADANY OBIEKT

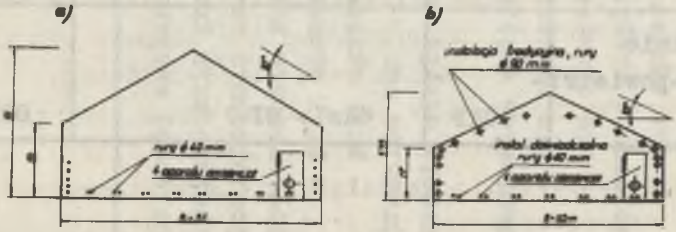
W układzie ogrzewniczym każdego kombinatu szklarniowego można wyodrębnić następujące części:

- instalacje ogrzewcze w poszczególnych pawilonach szklarniowych,
- rozdzielcze sieci cieplne,
- źródło ciepła (kotłownia lub stacja wymienników ciepła).

Instalacje ogrzewcze pawilonów szklarniowych są bezpośrednim obiektem zainteresowania niniejszej pracy, ponieważ ich potrzeby narzucają wymagania całemu układowi ogrzewniczemu kombinatu. Badaniami objęto instalacje ogrzewcze wymienione w tabeli 2-1, które, przy aktualnej u nas bazie paliwowo-energetycznej, będą stosowane jeszcze przez szereg lat.

### 2.1. Naturalny obiekt

Zgodnie z sugestiami Ministerstwa Rolnictwa za obiekt docelowych opracowań przyjęto typową szklarnię dla upraw gruntowych, o powierzchni gruntu 9 x 51 m, według projektu Centrali Spółdzielni Ogrodniczych w Warszawie (rys. 2.1a, tab. 2-2). Omówione w pracy badania analogowe i końcowe obliczenia dotyczą właśnie takiej szklarni.




Rys. 2.1. Szkic wymiarowy badanych szklarni: a - wg projektu CSO - Warszawa, b - "poznańskiej" produkcji WSO - Poznań

Tablica 2-1

Badane systemy ogrzewania szklarni

| System ogrzewania | | Wariant rozwiązania | | |
|---|---|---|---|---|
| Nazwa | oznacz. | Opis | oznacz. | rys. |
| Ogrzewanie rurowe | OR | - Rury ∅ 40–50 mm przy ziemi i ścianach bocznych | ORz | 2.1 |
| | | - Rury ∅ 40–50 mm pod dachem i przy ścianach bocznych | ORd | 2.1 |
| | | - Rury ∅ 80–100 mm pod dachem i przy ścianach bocznych (tradycyjny) | ORt | 2.1 |
| Ogrzewanie powietrzne | OP | - Indywidualne aparaty ogrzewcze w osi nawy, pierścieniowy rozdział powietrza | OP1 | 2.4<br>3.9 |
| | | - Nawiew i odciąg powietrza przy ścianach szczytowych skoncentrowanymi strumieniami | OP2 | 3.9 |
| Ogrzewanie rurowo-powietrzne | ORP | ORz + OP | ORP | 2.2 |

Tablica 2-2

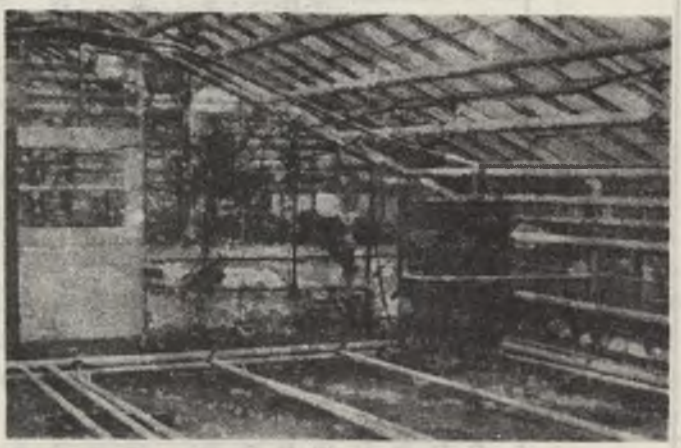
Dane ogólne badanych szklarni

| | wymiar | szlarnia typowa 9 x 51 | szklarnia poznańska | |
|---|---|---|---|---|
| | | | ORz i OP doświad. | ORt |
| Objętość szklarni | $m^3$ | 1 700 | 1 100 | 1 100 |
| Powierzchnia gruntu | $m^2$ | 460 | 400 | 400 |
| Powierzchnia oszklenia | $m^2$ | 770 | 670 | 670 |
| Powierzchnia rur ogrzewczych | | | | |
| - przy ogrzewaniu rurowym | $m^2$ | 230 | 110 x) | 325 |
| - przy ogrzewaniu rurowo-powietrznym | $m^2$ | 165 | 105 | - |
| Średnica rur ogrzewczych | mm | 40 | 40 | 90 |
| Straty ciepła przy $t_w$ = + 20°C, $t_z$ = - 20°C | kJ/s | 314 | 274 | 274 |
| Nominalna wydajność aparatów ogrzewczych | | | | |
| - dla ogrzewania powietrznego | kJ/s | 4 x 81,5 | 4 x 14,5 x) | - |
| - dla ogrzewania rurowo-powietrz. | kJ/s | 4 x 17,5 | 4 x 14,5 x) | - |
| Pojemność cieplna: | | | | |
| - rur ogrzewczych bez wody | kJ/deg | 2 500 | 1 150 | 3 800 |
| - rur ogrzewczych z wodą | kJ/deg | 11 600 | 5 400 | 33 700 |

x) Przeprowadzano badania przy $t_z$ = - 5 do + 5°C

Dla badań w naturalnych warunkach Resort Rolnictwa udostępnił konstrukcyjnie zbliżone do niej szklarnie typu poznańskiego, o powierzchni gruntu 8 x 50 m (rys. 2.1b). Jedną z takich szklarni w PGO Pszczyna wyposażono w doświadczalną instalację ogrzewczą wraz z osprzętem pomiarowym wg rys. 2.2 i 2.3. Instalacja składała się z części rurowej (ORz) i powietrznej (OP2).

Rys. 2.2. Instalacja doświadczalna rurowa w szklarni poznańskiej, rury ϕ 40 mm nad ziemią, widoczne stanowisko pomiarowe termoelementów



Rys. 2.3. Instalacja doświadczalna, aparat ogrzewczy, pompa obiegowa, aparatura do pomiaru strumieni wody grzejnej

Instalacja rurowa wykonana została ze stalowych rur ϕ 40 mm ułożonych na wysokości ok. 10 cm nad powierzchnią gruntu, co odpowiada nowym tendencjom w rozwiązaniach ogrzewania szklarni. Dla ogrzewania ciepłym powietrzem zainstalowano 4 aparaty ogrzewczo-wentylacyjne typu AW/II. Szklarnia posiadała również tradycyjną instalację rurową (ORt).

Zasadnicze dane konstrukcyjne doświadczalnego wyposażenia instalacyjnego omawianej szklarni podano w tabeli 2-2. Dalsze szczegóły oraz dane o aparaturze i metodyce pomiarów zawarte są w [18]. Wyposażenie to pozwalało również na przeprowadzenie badań ogrzewania rurowo-powietrznego.

Ogrzewanie ORt w takiej szklarni było badane w ramach pracy [3]. W czasie przeprowadzenia omawianych pomiarów instalacja ta była wyłączona i opróżniona z wody.

## 2.2. Modele obiektu

W f i z y k a l n y m m o d e l u szklarni przeprowadzono dalsze badania ogrzewania powietrznego, a mianowicie badania pól temperatury i prędkości powietrza wewnątrz szklarni oraz jej strat ciepła do otoczenia. Obserwowano więc w nim procesy, w których wymuszony nieizotermiczny ruch gazu nakłada się na ruch konwekcyjny i prędkości obu ruchów posiadają zbliżone wartości. Dla modelowania takich procesów [20, 21] kryteriami określającymi są liczby Re i Gr lub Ar i Gr. Nie udało się równocześnie zachować równości tych kryteriów w naturze i w modelu. Dlatego przyjęto metodę przybliżonego modelowania. W tym celu zapewniono równość liczby Ar oraz stabilność ruchu powietrza, przy utrzymaniu tego ruchu w granicach samomodelowania.

Stabilność ruchu powietrza w modelu została zapewniona przez utrzymanie go w strefie pełnej burzliwości i zachowaniu właściwej długości odcinka początkowego w kanałach prowadzących powietrze.

Samomodelowanie wyraża się niezależnością zjawiska od kryterium określającego proces i występuje w przypadku, gdy zarówno w naturze, jak i w modelu liczba kryterialna osiąga określoną wartość. Dzięki zachowaniu takich warunków w omawianym modelu rozkład prędkości wymuszonych strumieni odwzorowywał rzeczy-

wisty obiekt dla Re > ok. 2400, a konwekcyjne współczynniki wnikania ciepła nie zależały od wymiarów źródła ciepła, a więc i od skali modelu, gdy $(Gr \times Pr) > 2 \times 10^7$. Podane wartości liczb kryterialnych odpowiadają ruchowi wymuszonemu, względnie konwekcyjnemu o rozwiniętej burzliwości.

Zastosowano następujące skale, z których dwie pierwsze przyjęto, a dalsze wyliczono:

- długości $S_l = 1:8$
- różnicy temperatur $S_{\Delta t} = 1{,}5:1$
- prędkości $S_w = \sqrt{S_l \, S_T \, S_{\Delta t}} = 1:2{,}18$
- strumienia masy $S_{\dot m} = S_l^2 \cdot S_\varrho \cdot S_w = 1:149{,}2$
- strumienia ciepła $S_Q = S_{\dot m} \, S_{\Delta t} = 1:100$
- emisyjności powierzchni $S_\varepsilon = \sqrt{S_Q / S_l^2 \, S_\beta S_{\Delta t}} = 1:1{,}75$
- współczynnika wnikania ciepła $S_\alpha = S_w \cdot S_{\Delta t}^{1/3} = 1{,}05:1$
- przewodzenia ciepła $S_{\lambda/d} = S_Q / S_l^2 \cdot S_{\Delta t} = 1:2{,}35$

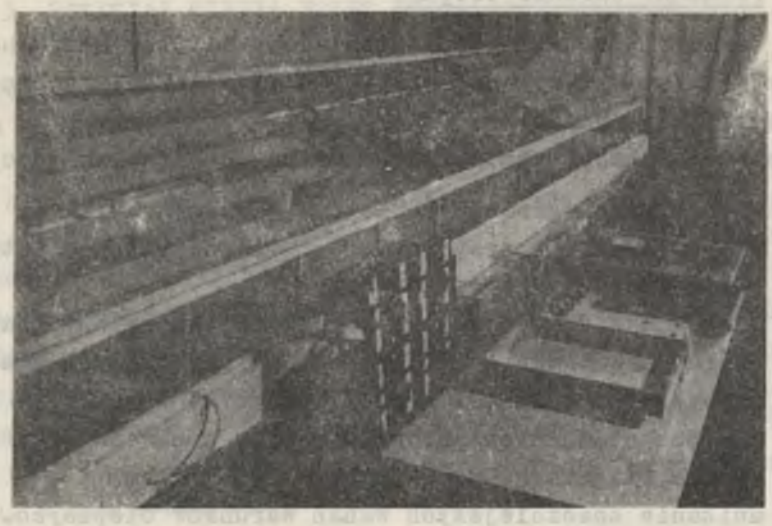
Wartości skal przeliczeniowych:

$S_T$ - bezwzględniej temperatury płynu
$S_\varrho$ - gęstości płynu
$S_\beta$ - współczynnika temperaturowego w $\alpha$ promienistym
$S_N$ - współczynnika uwzględniającego parametry płynu w zależności: $\alpha_K = Nu\lambda/l$

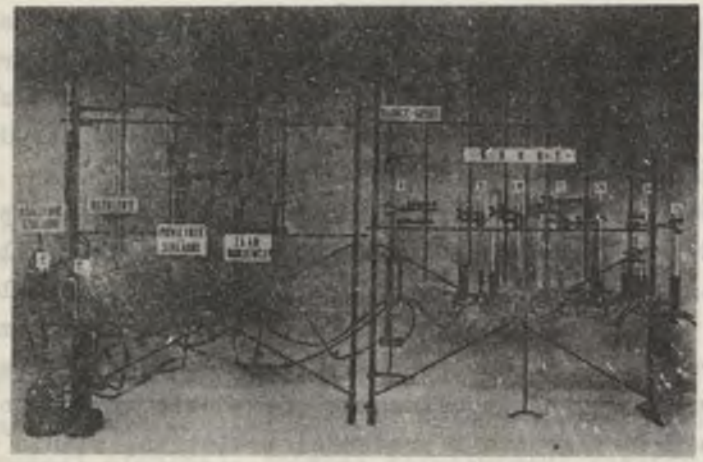
przyjęto dla przeciętnej wartości parametrów powietrza w naturze i modelu.

Konstrukcję i wyposażenie doświadczalne modelu przedstawia rys. 2.4. Zgodnie z przyjętymi skalami zastosowano w miejsce szkła - metapleks, oklejony w 49% paskami folii aluminiowej dla zmniejszenia emisyjności jego powierzchni. Wyposażenie aparaturowe modelu pozwala na pomiary z rejestracją pól temperaturowych i prędkości powietrza przy podanych w tab. 2-1 wariantach rozwiązania ogrzewania powietrznego.

Model analogowy szklarni (9 x 51 m) wykorzystano dla analizy jej bilansu cieplnego oraz dla przeprowadzenia szeregu ba-



Rys. 2.4. Fizykalny model szklarni



Rys. 2.5. Analogowy model szklarni

dań dynamicznych własności szklarni jako obiektu regulacji temperatury. Model ten, oparty na analogii hydromechaniczno-termodynamicznej, skonstruowano w sposób omówiony w [3 i 18], z wprowadzeniem pewnych nowych usprawnień. Przedstawia go rys. 2.5.

## 2.3. Pożądane warunki cieplne

W szklarni warunki cieple posiadają istotny wpływ na produkcję roślinną. Wpływ ten jest nie mniej ważny niż dobra uprawa i nawożenie gruntu.

Pożądane cechy tych warunków można ująć następująco:

- równomierne ogrzanie powietrza w całej szklarni;
- równomierna i przystosowana do temperatury powietrza - temperatura gruntu;
- dostosowanie, z uwagi na warunki fotosyntezy, temperatury powietrza i gruntu do pory dnia i nasłonecznienia;
- utrzymanie prędkości ruchów powietrza w zakresie dogodnym dla poszczególnych gatunków roślin i okresu ich rozwoju,
- wysoka wilgotność powietrza;
- unikanie znaczniejszych wahań warunków cieplnych.

Cechy te, ogólnie biorąc, odpowiadają wszystkim gatunkom upraw szklarniowych. Poszczególne gatunki różnią się jednak wrażliwością na prędkość powietrza i wahania jego temperatury. Należy również zaznaczyć, że instalacja ogrzewcza praktycznie nie ma wpływu na zawartość wilgoci w powietrzu. W szklarniach potrzebna wilgotność powietrza jest na ogół bez trudności utrzymana za pomocą urządzeń do zraszania ziemi.

Sprecyzowanie dla różnych roślin szklarniowych optymalnego zakresu powyższych warunków byłoby bardzo pomocne dla przyjęcia właściwej koncepcji ogrzewania. Niestety niewiele jest danych w tym zakresie. Znane są korzystne wartości temperatury powietrza [22], ale już w odniesieniu do tego, jakie wahania tej temperatury są dopuszczalne oraz jakie są dogodne wartości temperatury gruntu i prędkości powietrza, zdania wśród fizjologów roślin i ogrodników są podzielone. Podobnie nie jest wyjaśniona sprawa wpływu długofalowego podczerwonego promieniowania powierzchni ogrzewczych na rozwój roślin [23].

Wyjaśnienie tych zagadnień na pewno nie jest proste i wymaga długotrwałych badań w zakresie ekologii upraw szklarniowych, ale pozwoliłoby osiągnąć znaczny postęp w efektach ogrzewania.

## 3. ROZDZIAŁ CIEPŁA PRZEZ INSTALACJĘ OGRZEWCZĄ

Ciepło, dostarczane przez instalację ogrzewczą do wnętrza pawilonu szklarniowego, ma zapewnić w nim pożądane warunki cieplne. Rozdział strumieni tego ciepła decyduje o zużyciu energii cieplnej. Poszczególne systemy ogrzewania i warianty rozwiązań instalacji ogrzewczej mogą w różny sposób wpływać na kształtowanie się warunków cieplnych wewnątrz szklarni i z tego powodu mogą w różnym stopniu zbliżać te warunki do pożądanych. Również pożądane warunki cieplne mogą być przez różne instalacje osiągane przy odmiennym zużyciu energii cieplnej.

Dla przeprowadzenia porównań w tym zakresie należy przeanalizować pola temperaturowe i pola prędkości powietrza wewnątrz pawilonu, a mianowicie:

- pola temperatury oszklenia przy różnych rozwiązaniach ogrzewania szklarni, biorąc pod uwagę, że temperatura ta decyduje o wysokości strat ciepła i o kosztach ogrzewania;
- pola temperatury powietrza i gruntu oraz tory i prędkości ruchu powietrza w szklarni jako elementy w zasadniczy sposób kształtujące klimat wnętrza.

Dane na ten temat zebrano w ciągu badań w szklarniach PGO Pszczyna [18, 19] i w modelach szklarni oraz drogą obliczeniowych analiz bilansów cieplnych [26]. Poniżej omówiono tylko wyniki tych prac.

### 3.1. Bilans cieplny szklarni

Dogodną podstawę analizy stwarza bilans cieplny szklarni dla stanu równowagi cieplnej. Schemat strukturalny takiego bilansu przedstawiono na rys. 3.1.

W obrębie wnętrza szklarni wymiana ciepła odbywa się następującymi strumieniami:

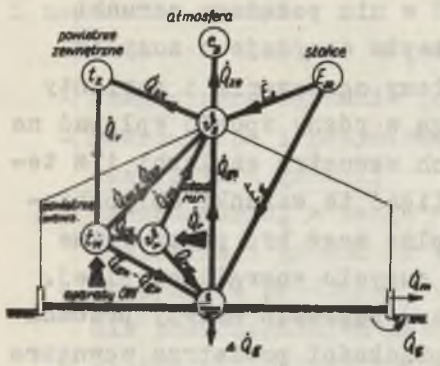
$\dot{Q}_{sk}$, $\dot{Q}_{sp}$ – drogą konwekcji i kondensacji pary przy powierzchni oszklenia,

$\dot{Q}_{gk}$, $\dot{Q}_{gp}$ – drogą konwekcji i parowania na powierzchni gruntu,

$\dot{Q}_{rk}$ – drogą konwekcji od rur grzejnych do powietrza

$\dot{Q}_{rs}$ – drogą promieniowania od rur grzejnych do oszklenia,

$\dot{Q}_{rg}$ - drogą promieniowania od rur grzejnych do gruntu
$\dot{Q}_{gs}$ - drogą promieniowania od gruntu do oszklenia.




Rys. 3.1. Schemat strumieni cieplnych ogrzewanej szklarni

Dostawa ciepła do szklarni może odbywać się za pośrednictwem instalacji rurowej ($\dot{Q}_r$) lub aparatów ogrzewczych ($\dot{Q}a$). Za jej straty do otoczenia uważane są następujące strumienie:

$\dot{Q}_{zk}$ - drogą konwekcji z oszklenia do otoczenia,

$\dot{Q}_{ze}$ - drogą promieniowania długofalowego z oszklenia do atmosfery i najbliższego otoczenia,

$\dot{Q}_v$ - na skutek wymiany ciepła przez infiltrację,

$\dot{Q}_g$ - poprzez grunt do otoczenia,

$\dot{Q}_m$ - poprzez cokół do otoczenia.

Straty ciepła, miarodajne dla określenia nominalnej wydajności instalacji ogrzewczej, występują w warunkach nocnych. Dlatego w dalszych rozważaniach, dotyczących stanu ustalonego, pomija się strumienie ciepła $\dot{E}_g$ i $\dot{E}_s$, absorbowane z promieniowania słonecznego przez grunt i oszklenie szklarni.

Dla utrzymania stanu równowagi cieplnej należy do szklarni dostarczyć ciepło w ilości, równej sumie wszystkich strat:

$$\dot{Q}_{zk} + \dot{Q}_{ze} + \dot{Q}_v + \dot{Q}_g + \dot{Q}_m = \Sigma \dot{Q}. \qquad (3.1)$$

Matematyczne ujęcie poszczególnych pozycji bilansu i związków między nimi zostało szczegółowo omówione w pracy [3]. Dla ilościowego scharakteryzowania rozdziału ciepła potrzebne były dalsze badania.

W latach 1964/65 przeprowadzono w PGO Pszczyna pomiary pól temperaturowych i zużycia ciepła w szklarni przy wymienionych poprzednio systemach ogrzewania. Pomiary te pozwoliły na zestawienie bilansów cieplnych szklarni, które omówiono w pracach

Dane dla bilansów cieplnych szklarni (wartości średnie)

| | Nr bilansu | | 7 | 8a | 1b | 6 | 10 | 2 | 3 | 01 | 02 | 03 | 04 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Data pomiaru | | 11.2.65 | 12.2.65 | 4.2.65 | 10.2.65 | 4.3.65 | 4.2.65 | 5.2.65 | oblicz. | oblicz. | oblicz. | oblicz. |
| | czas pomiaru | | $17^{15}-22^{30}$ | $16^{00}-20^{00}$ | $3^{00}-5^{00}$ | $19^{00}-23^{45}$ | $18^{40}-0^{10}$ | $18^{30}-23^{20}$ | $17^{00}-22^{25}$ | noc | noc | noc | noc |
| | system ogrzew. | | ORz | ORz | ORP | ORP | ORP | OPM | OPM | ORz | ORd | OP | OP |
| | typ szklarni | | 50 x 8 | 50 x 8 | 50 x 8 | 50 x 8 | 50 x 8 | 50 x 8 | 50 x 8 | 51 x 9 | 51 x 9 | 51 x 9 | 51 x 9 |
| Temperatura: | | | | | | | | | | | | | |
| powietrza zewnętrznego | $t_z$ | °C | -3,1 | 0,7 | -4,9 | -4,0 | -3,4 | -3,2 | -17,2 | -20,0 | -20,0 | -20,0 | -30,0 |
| powietrza w szklarni | $t_w$ | °C | 15,0 | 15,0 | 18,9 | 20,0 | 16,7 | 17,8 | 17,6 | +20,0 | +20,0 | +20,0 | +10,0 |
| oszklenia | $\vartheta_{sz}$ | °C | 2,8 | 4,9 | 3,2 | 1,7 | 3,0 | 2,6 | -3,5 | -11,0 | -8,5 | -11,0 | -21,5 |
| powierzchni gruntu | $\vartheta_g$ | °C | 12,6 | 12,9 | 10,2 | 10,7 | 14,0 | 11,5 | 11,7 | +13,0 | 11,5 | 6,5 | -2,2 |
| rur ogrzewczych | $\vartheta_r$ | °C | 47,5 | 43,9 | 54,7 | 55,9 | 48,0 | - | - | 100,0 | 100,0 | - | - |
| cokołu | $\vartheta_{mw}-\vartheta_{mz}$ | °C | 9,3 | 8,1 | 9,4 | 8,9 | 11,8 | 13,7 | 15,7 | 19,8 | 19,8 | 19,8 | 19,8 |
| Przyrost temperatury w okresie bilansowym: | | | | | | | | | | | | | |
| powietrza w szklarni | $\Delta t_w$ | deg | -0,4 | +0,4a | +2,6 | +1,0 | +4,0 | +0,7 | -4,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| oszklenia | $\Delta\vartheta_s$ | deg | -2,0 | -0,7 | -1,9 | +0,9 | +1,3 | -2,6 | -4,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| rur ogrzewczych | $\Delta\vartheta_r$ | deg | -0,7 | +8,5 | -12,0 | +0,2 | +17,9 | - | - | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| cokołu | $\Delta\vartheta_m$ | deg | -2,0 | -0,7 | -1,4 | +0,8 | +0,8 | -1,1 | -3,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Wilgotność powietrza | | | | | | | | | | | | | |
| w szklarni | $\varphi_w$ | % | 55,0 | 58,0 | 41,0 | 34,0 | 54,0 | 45,0 | 38,0 | 30,0 | 26,0 | 26,0 | 50,0 |
| na zewnątrz | $\varphi_z$ | % | 95,0 | 57,0 | 95,0 | 95,0 | 77,0 | 96,0 | 95,0 | 90,0 | 90,0 | 90,0 | 90,0 |
| Prędkość powietrza przy gruncie w szklarni | $w_g$ | kg/m²s | 0,39 | 0,18 | 0,17 | 0,34 | 0,66 | 1,10 | 1,18 | 0,35 | 0,35 | 0,78 | 0,78 |
| Dane meteorologiczne | | | | | | | | | | | | | |
| prędkość wiatru | W | m/s | 0,7 | 3,1 | 2,0 | 4,9 | 1,5 | 2,9 | 0,6 | 5,0 | 5,0 | 5,0 | 5,0 |
| zachmurzenie | B | - | 0,5 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,7 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| opad | | kg/m²s | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | $1,3\times10^{-4}$ | 0,0 | - | - | - | - |
| Powierzchnia ogrzewalna rur | $A_r$ | m² | 110,0 | 110,0 | 105,0 | 105,0 | 105,0 | - | - | 230,0 | 263,0 | - | - |

Tablica 3-2

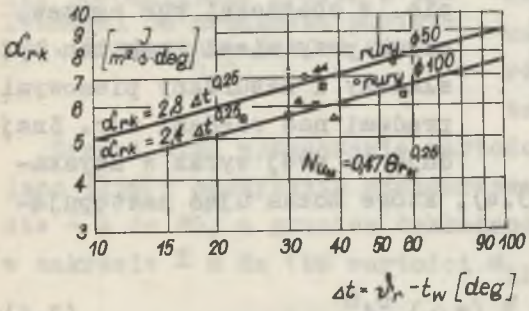
Strumienie cieplne ogrzewanej szklarni

| | Nr bilansu | | 7 | 8c | 1b | 6 | 10 | 2 | 3 | 01 | 02 | 03 | 04 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Data pomiaru | | 11.2.65 | 12.2.65 | 4.2.65 | 10.2.65 | 4.3.65 | 4.2.65 | 5.2.65 | Oblicz. | Oblicz. | Oblicz. | Oblicz. |
| | Czas pomiaru | | $17^{15}-20^{30}$ | $16^{00}-20^{00}$ | $3^{00}-5^{00}$ | $19^{00}-23^{45}$ | $18^{40}-0^{10}$ | $18^{30}-23^{20}$ | $17^{00}-22^{25}$ | noc | noc | noc | noc |
| | System ogrzew. | | ORz | ORz | ORP | ORP | ORP | OPM | OPM | ORz | ORd | OP | OP |
| | Typ szklarni | | 50 x 8 | 50 x 8 | 50 x 8 | 50 x 8 | 50 x 8 | 50 x 8 | 50 x 8 | 51 x 9 | 51 x 9 | 51 x 9 | 51 x 9 |
| **Energia doprowadzona z czynnikiem grzejnym do szklarni** | | | | | | | | | | | | | |
| do rur ogrzewczych | $\dot{Q}_r$ | kJ/s | 50,0 | 45,5 | 54,8 | 52,7 | 41,2 | - | - | 295,5 | 349,1 | - | - |
| do aparatów ogrzewczych | $\dot{Q}_a$ | kJ/s | - | - | 34,2 | 73,0 | 32,1 | 96,6 | 122,2 | - | - | 294,5 | 281,2 |
| **Energia odprowadzona do otoczenia** | | | | | | | | | | | | | |
| konwekcja z oszklenia | $\dot{Q}_{kz}$ | kJ/s | 36,9 | 32,6 | 82,0 | 100,2 | 54,8 | 65,8 | 74,9 | 183,1 | 232,0 | 183,1 | 171,0 |
| promieniowanie z oszklenia | $\dot{Q}_{ez}$ | kJ/s | 20,3 | 5,6 | 4,5 | 4,5 | 16,3 | 1,6 | 50,0 | 59,4 | 65,2 | 59,4 | 61,7 |
| wymiana powietrza | $\dot{Q}_r$ | kJ/s | 4,4 | 4,8 | 6,5 | 12,2 | 5,8 | 10,6 | 10,0 | 41,3 | 40,2 | 40,1 | 36,8 |
| przenikanie przez cokół i grunt | $\dot{Q}_c+\dot{Q}_g$ | kJ/s | 0,8 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 1,0 | 1,3 | 1,4 | 11,4 | 11,4 | 11,4 | 11,4 |
| topnienie śniegu | $\dot{Q}$ | kJ/s | - | - | - | - | - | 22,6 | 22, | - | - | - | - |
| **Przyrost energii wewnętrznej** | | | | | | | | | | | | | |
| rury ogrzewcze | $\Delta\dot{Q}_r$ | kJ/s | 0,0 | +0,5 | +1,7 | 0,0 | +1,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | - | - |
| powietrze w szklarni | $\Delta\dot{Q}_p$ | kJ/s | -0,2 | - | -0,9 | +0,2 | -0,6 | 0,0 | -0,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| grunt w szklarni | $\Delta\dot{Q}_g$ | kJ/s | -7,4 | -7,0 | +5,8 | +5,5 | -3,7 | -1,9 | -5,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| oszklenie | $\Delta\dot{Q}_s$ | kJ/s | -0,5 | -0,2 | -1,4 | +0,3 | +0,3 | -0,8 | -1,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| cokół | $\Delta\dot{Q}_m$ | kJ/s | -4,3 | -1,7 | -7,8 | +2,8 | -1,6 | -2,6 | -7,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Strumienie wewnątrz szklarni** | | | | | | | | | | | | | |
| Konwekcja: rury-powietrze | $\dot{Q}_{rk}$ | kJ/s | 29,0 | 22,6 | 26,7 | 26,2 | 19,4 | - | - | 164,4 | 187,5 | - | - |
| powietrze-grunt | $\dot{Q}_{gk}$ | kJ/s | 4,8 | 2,6 | 10,4 | 17,3 | 10,2 | 31,0 | 29,6 | 16,5 | 18,3 | 62,1 | 56,8 |
| powietrze - oszklenie | $\dot{Q}_{sk}$ | kJ/s | 23,0 | 22,1 | 61,7 | 73,4 | 38,4 | 57,5 | 88,0 | 103,3 | 128,2 | 177,5 | 180,3 |
| parowanie: grunt-powietrze | $\dot{Q}_{gp}$ | kJ/s | 6,3 | 8,9 | 7,5 | 10,3 | 11,9 | 19,9 | 13,2 | 24,2 | 24,9 | 25,1 | 19,8 |
| kondensacja powietrze-oszklenie | $\dot{Q}_{sp}$ | kJ/s | 7,4 | 3,4 | 0,8 | 4,5 | 10,9 | 18,7 | 13,7 | 20,7 | 21,9 | 36,1 | 23,3 |
| promieniowanie: rury-grunt | $\dot{Q}_{rg}$ | kJ/s | 9,0 | 10,2 | 12,1 | 11,7 | 8,7 | - | - | 51,8 | 43,0 | - | - |
| rury-oszklenie | $\dot{Q}_{rs}$ | kJ/s | 11,8 | 11,6 | 13,4 | 13,9 | 11,4 | - | - | 79,3 | 118,6 | - | - |
| rury-cokół | $\dot{Q}_{rm}$ | kJ/s | 0,6 | 0,6 | 0,9 | 0,9 | 0,7 | - | - | - | - | - | - |
| grunt-oszklenie | $\dot{Q}_{gs}$ | kJ/s | 14,9 | 10,9 | 9,2 | 13,2 | 10,7 | 13,0 | 21,8 | 36,2 | 28,5 | 29,1 | 29,1 |
| **Konwek. współcz. wnikania ciepła** | | | | | | | | | | | | | |
| zewnętrzna powierzchnia oszklenia | $\alpha_{zk}$ | $J/m^2sdeg$ | 9,9 | 16,1 | 16,5 | 28,3 | 14,0 | 18,3 | 8,7 | 26,2 | 26,2 | 26,2 | 26,2 |
| wewnętrzna powierzchnia oszklenia | $\alpha_{sk}$ | " | 3,5 | 3,7 | 6,1 | 6,5 | 4,7 | 6,3 | 6,9 | 4,7 | 6,1 | 7,7 | 7,7 |
| powierzchnia gruntu | $\alpha_{gk}$ | " | 5,0 | 3,0 | 3,0 | 4,7 | 9,5 | 14,6 | 12,6 | 4,5 | 4,5 | 10,0 | 10,0 |
| powierzchnia rur | $\alpha_{rk}$ | " | 7,0 | 7,1 | 7,1 | 7,2 | 6,1 | - | - | 8,9 | 8,9 | - | - |

[18 i 19], a niektóre z nich podane w tabelach 3-1 i 3-2. W bilansach pozycją zamykającą były strumienie konwekcyjnego przekazywania ciepła, z których ostatecznie wyliczono konwekcyjne współczynniki wnikania ciepła $\alpha_{ik}$. Zależności współczynników $\alpha_{ik}$ od najbardziej wpływających na nie parametrów podają rysunki 3.2 do 3.5. Można było je określić dzięki obserwacjom ruchów powietrza w pobliżu powierzchni rur, gruntu i oszklenia, które prowadzono równolegle z pomiarami cieplnymi.

Przekazywanie ciepła w szklarni przez rury ogrzewcze do powietrza (rys. 3.2) i od powietrza do oszklenia (rys. 3.3) posiada charakter konwekcji swobodnej. Uzyskane wartości $\alpha_{rk}$ dość dobrze (z rezerwą ok. 5-10%) podporządkowują się zależności [24, 25]:

$$Nu = 0{,}47\ Gr^{1/4}. \qquad (3.2)$$

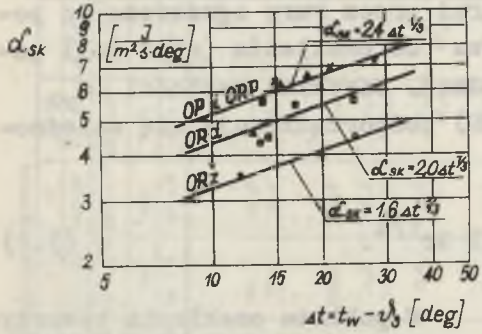



Rys. 3.2. Konwekcyjny współczynnik wnikania ciepła na zewnętrznej powierzchni rur ogrzewczych
Oznaczenia: o - ORz, Δ - ORP, □ - ORt

W pobliżu oszklenia towarzyszył konwekcji wyraźnie burzliwy ruch powietrza, wywołany zarówno warunkami odpowiadającymi dużej wartości liczby Gr jak i w pewnym stopniu ruchami powietrza pod wpływem innych czynników, omówionych w rozdz. 3.3. Ruchy te jednak nie posiadały wyraźnie zorganizowanego charakteru i wpływ różnicy temperatur $(t_w - \vartheta_s)$ na wartość $\alpha_{sk}$ pozostał decydujący. Niemniej wartości tego współczynnika wypadły przy ogrzewaniu powietrznym największe, przy ogrzewaniu rurowym z rurami nad gruntem (ORz) - najmniejsze, a dla ogrzewania rurowo-powietrznego i rurowego tradycyjnego (ORt) uzyskiwano wartości pośrednie. Rys. 3.3 ilustruje te zależności. Można je ująć następująco:

- dla OP i ORP $\alpha_{sk} = 2,4 \quad \Delta t^{1/3}$ (3.3)
- dla ORd $\alpha_{sk} = 2,0 \quad \Delta t^{1/3}$ (3.4)
- dla ORz $\alpha_{sk} = 1,5 \quad \Delta t^{1/3}$. (3.5)

Konwekcyjne wnikanie ciepła do gruntu nie wykazywało prawidłowej zależności od różnicy temperatur $(t_w - \vartheta_g)$. Występowała natomiast zależność $\alpha_{gk}$ od prędkości przepływu powietrza wzdłuż szklarni, wymuszonego przez działanie wiatru i nierównomierne ogrzanie szklarni na całej jej długości. Takie wzdłużne ruchy powietrza, omówione w rozdz. 3.3, obserwowano szczególnie wyraźnie w dolnej części nawy przy gruncie. W obecności rur ogrzewczych przy ziemi ruch ten był słabszy i zaburzany pionowymi prądami nad rzędami rur. Znajduje to swój wyraz w uzyskanych wartościach $\alpha_{gk}$ (rys. 3.4), które można ująć następująco:




Rys. 3.3. Konwekcyjny współczynnik wnikania ciepła na wewnętrznej powierzchni oszklenia. Oznaczenia jak na rys. 3.2

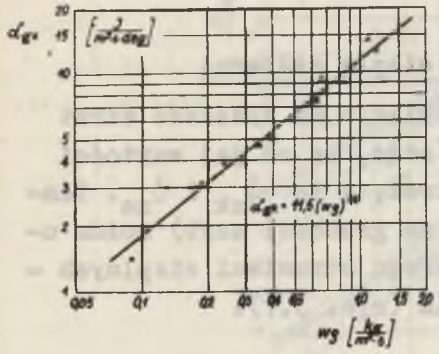
$$\alpha_{gk} = 11,5\,(w\varrho)^{0,8}. \quad (3.6)$$

Należy zwrócić uwagę, że uzyskane wyniki dotyczą gruntu nie porośniętego i nisko porośniętego (niskie krzaki pomidorów).

Dla praktycznego wykorzystywania zależności (3.6) przy projektowaniu ogrzewania szklarni może być przydatna informacja, że przeciętne wartości $(w\varrho)$ przy obliczeniowych warunkach meteorologicznych leżą w granicach:

- dla ORz i ORd $w\varrho = 0,1 - 0,4 \quad kg/m^2s$
- dla OP $w\varrho = 0,6 - 1,2 \quad kg/m^2s$
- dla ORP $w\varrho = 0,4 - 0,8 \quad kg/m^2s$.

Podane zależności na $\alpha_{sk}$, $\alpha_{gk}$ odniesione są do temperatury powietrza w środku nawy na wysokości 1,2 m, a więc nie zależą od różnic w pionowym rozkładzie tej temperatury przy poszczególnych systemach ogrzewania.



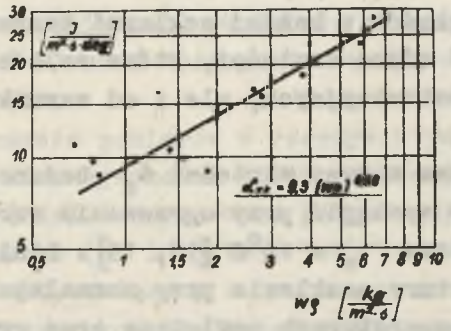
Rys. 3.4. Konwekcyjny współcz. wnikania ciepła dla nisko- i nie porośniętego gruntu w zależności od prędkości powietrza. Oznaczenia jak na rys. 3.2

Konwekcyjny ruch ciepła na zewnętrznej powierzchni oszklenia jest wyraźnie związany z prędkością wiatru (rys. 3.5):

$$\alpha_{zk} = 9{,}3\ (w_g)^{0{,}56}. \qquad (3.7)$$

Uzyskane zależności na $\alpha_{ik}$ nie mogą być traktowane jako ogólnie obowiązujące w szklarniach. Ważne są one dla badanego typu szklarni i dają możność przeprowadzenia pełnej analizy jej bilansu cieplnego w różnych warunkach cieplnych otoczenia i wnętrza.

Średni błąd wyznaczenia wartości $\alpha_{ik}$ ocenia się następująco [25a]: odczylenia standardowe $\alpha_{ik}$ wahają się w zakresie $\pm$ 4 do 8%, a granice dokładności na poziomie ufności 95% w zakresie $\pm$ 8 do 16% wartości $\alpha_{ik}$ w poszczególnych bilansach.



Rys. 3.5. Konwekcyjny współcz. wnikania ciepła na zewnętrznej powierzchni oszklenia w zależności od prędkości wiatru. Oznaczenia jak na rys. 3.2

Wyniki bilansu cieplnego dla stanu równowagi cieplnej szklarni podano w tab. 3-1 i 3-2 dla ogrzewania rurowego (bilanse 01 i 02 - rury przy ziemi i pod dachem) i dla ogrzewania powietrznego (bil. 03 i 04). Bilanse te sporządzono dla przyjmowanych obecnie warunków obliczania nominalnych strat ciepła szklarni wg PN i DIN.

## 3.2. Temperatura oszklenia i straty ciepła szklarni

Decydujący wpływ temperatury oszklenia na wysokość strat ciepła szklarni do otoczenia wynika stąd, że od jej wartości zależą dwa główne strumienie tych strat, a to $\dot{Q}_{zk}$ i $\dot{Q}_{ze}$. Temperaturę $\vartheta_s$ (z pominięciem spadku na grubości szyb) można ustalić jako wynik współdziałania szeregu strumieni cieplnych - zgodnie z bilansem cieplnym oszklenia (rys. 3.1):

$$\dot{Q}_{sk} + \dot{Q}_{sp} + \dot{Q}_{rs} + \dot{Q}_{gs} = \dot{Q}_{zk} + \dot{Q}_{ze}. \qquad (3.8)$$

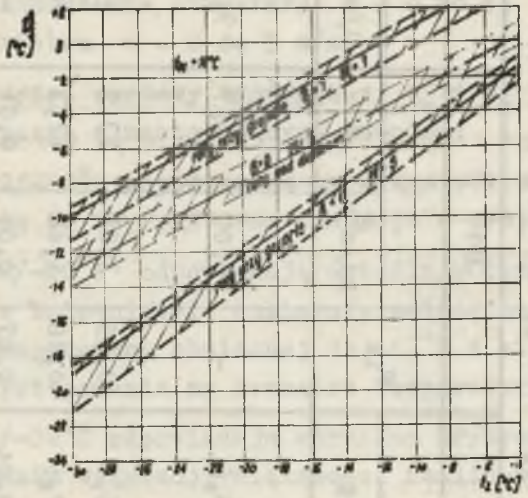
Z równania (3.8) wynika, że wartość temperatury oszklenia zależy od:

- kształtu nawy szklarniowej,
- parametrów cieplnych wnętrza, jak: temperatura, wilgotność i prędkość powietrza, temperatura rur, temperatura i wilgotność gruntu,
- rozwiązania instalacji ogrzewczej,
- parametrów zewnętrznych czynników klimatycznych.

Z powyższych względów w każdej szklarni temperatura oszklenia może przyjmować różne wartości, które zależeć będą nie tylko od rozwiązań konstrukcyjnych, ale i od warunków eksploatacji szklarni.

Na rys. 3.6 podano zakres wartości $\vartheta_s$ badanej szklarni 9 x 51 m, jakie mogą wystąpić przy ogrzewaniu rurowym i przy temperaturze powietrza $t_w = 14^{\circ}C$ [18, 19]. Linia ciągła określa wartości temperatury oszklenia przy normalnych w szklarniach wilgotnościach i temperaturach powietrza oraz gruntu. Przy wyższych wilgotnościach powietrza, przy dodatkowym ogrzewaniu gruntu, względnie podlewaniu go ciepłą wodą, temperatura oszklenia

może przybierać naksymalne wartości podane na wykresach. Dolny zakres $\Phi_s$ może mieć miejsce w szklarniach ogrzewanych, ale nie eksploatowanych, z suchym gruntem i powietrzem.



Rys. 3.6. Temperatura oszklenia szklarni 9 x 51 m w zależności od $t_z$ przy $t_w$ = + 14°C

Przy umieszczeniu rur tradycyjnie pod dachem temperatura oszklenia wzrasta o kilka stopni w porównaniu z przypadkiem instalacji z rurami przy ziemi (rys. 3.6 i tab. 3-1). Z tego powodu np. dla $t_z$ = -20 i $t_w$ = 20°C uzyskuje się przy umieszczeniu rur pod dachem straty ciepła większe o około 20% (tab. 3-2). Wynika to z odmiennego rozdziału ciepła przez instalację ogrzewczą (tab. 3-3) oraz wyższych wartości współczynników $\alpha_{sk}$ (rys. 3.2) przy ORd.

Natomiast w czasie pomiarów w rzeczywistym obiekcie nie stwierdzono różnic w wysokości strat ciepła przy ogrzewaniu rurami przy ziemi (ORz) i ogrzewaniu powietrznym (OP) [18, 19]. Bilanse obliczeniowe (01 i 03 tab. 3.2) oraz dane tab. 3-3 potwierdzają ten fakt, związany ze znacznym wzrostem $\alpha_{sk}$ przy OP dzięki czemu wzmożona konwekcja zastępuje promieniowanie rur na szyby.

Tablioa 3-3

Rozdział ciepła oddawanego przez instalację ogrzewczą w szklarni 9 x 51 m przy $t_w = +20^oC$, $t_z = -20^oC$, na 1 $m^2$ oszklenia

| Strumień ciepła | ORz | | | ORd | | | OP | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\varphi_{ik}$ | $\dot{q}$ | | $\varphi_{ik}$ | $\dot{q}$ | | $\dot{q}$ | |
| | | kJ/$m^2$s | % | | kJ/$m^2$s | % | kJ/$m^2$s | % |
| Konwekcja: | | | | | | | | |
| rury - powietrze | - | 5,34 | 55,6 | - | 6,09 | 53,7 | 9,56 | 100,0 |
| Promieniowanie: | | | | | | | | |
| rury - szyby | 0,51 | 2,57 | 26,8 | 0,65 | 3,84 | 33,9 | - | - |
| rury - grunt | 0,40 | 1,68 | 17,5 | 0,28 | 1,40 | 12,3 | - | - |
| rury - cokół | 0,09 | 0,01 | 0,01 | 0,07 | 0,01 | 0,01 | - | - |
| Razem: | 1,00 | 9,60 | 100,0 | 1,00 | 11,34 | 100,00 | 9,56 | 100,0 |

Przeprowadzono również obszerne obliczenia dla analizy strat ciepła szklarni w warunkach, uważanych za charakterystyczne dla metod obliczania tych strat, a mianowicie dla:

- zestawów temperatury $t_w$ i $t_z$: +20/-20, +12/-20, +6/-30°C,
- stopnia zachmurzenia atmosfery B = 0 do 1,
- prędkości wiatru w = 0 do 5 m/s,

Podane powyżej zestawy temperatur $t_w$ i $t_z$ uważa się za charakterystyczne z następujących powodów:

- $t_w/t_z$ = +20/-20°C odpowiadają warunkom obliczania nominalnych strat ciepła wg PN, DIN oraz tradycji w projektowaniu;
- $t_w/t_z$ = +12/-20°C odpowiadają aktualnym tendencjom oszczędnościowym w budownictwie szklarni, zalecającym utrzymanie w szklarni temperatury obniżonej do +12°C w stosunkowo krótkich okresach występowania na zewnątrz temperatury -20°C;
- $t_w/t_z$ = +6/-30°C odpowiadają warunkom krytycznym, niezbędnym dla utrzymania wegetacji większości roślin w krótkotrwałych okresach, np. podczas występowania wieloletniego absolutnego minimum temperatury zewnętrznej, które dla większości terytorium Polski zbliżone jest do - 30°C.

Dla wymienionego wyżej zakresu parametrów wnętrza i otoczenia zestawiono bilanse cieplne i ustalono składniki strat ciepła typowej szklarni 9 x 51 m. Wyniki podano na rys. 3.7.

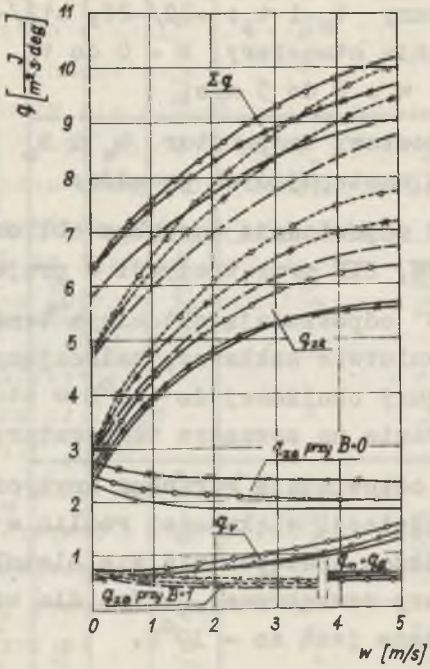
Jednostkowe zagęszczenie strumieni ciepła $\dot{q}_i$ określono wg równania:

$$\dot{q}_i = \frac{\dot{Q}_i}{A_s (t_w - t_z)} . \qquad (3.9)$$

Rys. 3.7 wykazuje dużą zależność strat ciepła szklarni od prędkości wiatru i stopnia zmętnienia atmosfery. Szczególnie wyraźna jest zależność głównej pozycji strat $\dot{q}_{zk}$ od prędkości wiatru. Znaczne zmniejszenie rzeczywistych strat ciepła można zatem uzyskać przez osłanianie szklarni od wpływu wiatru.

Przeprowadzona analiza strat ciepła szklarni może być pomocna przy nowelizacji normy PN-56/B-3406, której niedociągnięcia

w zakresie lekkich budynków, a zwłaszcza szklarni, wywołują wiele kłopotów i kontrowersji [26, 27].




Rys. 3.7. Zależność strat ciepła szklarni 9 x 51 m od temperatury $t_w$ i $t_z$ oraz od prędkości wiatru w i stopnia zachmurzenia B

## 3.3. Pola temperatur i prędkości powietrza w szklarni

### 3.3.1. Stan quasi - ustalony

Temperatury powietrza i powierzchni gruntu $\vartheta_g$ mają istotny wpływ na rozwój roślin. Średnie dla całej nawy wartości tych temperatur w stanie quasi- ustalonej równowagi cieplnej podają tablice 3-1 i 3-2 (bilanse 01 do 04).

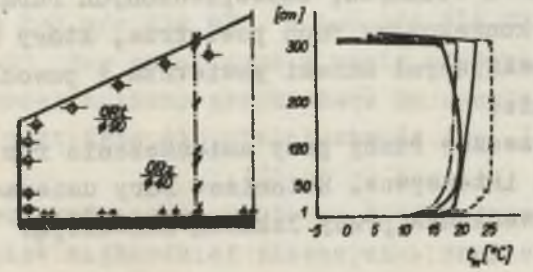
Dla tej samej wartości $t_w$ = +20°C temperatura powierzchni gruntu wykazuje tendencje do ustalenia się najwyżej przy ORz ($\vartheta_g$ = 13°C) i najniżej przy OP ($\vartheta_g$ = + 6,5°C). Przy ogrzewaniu powietrznym ogrzanie gruntu jest na tyle słabe, że jego temperatura mogłaby spaść poniżej 0°C przy długotrwałych mrozach i obniżeniu $t_w$ do ok. 10°C (dane dla bilansu 04).

3.3.2. Badania w naturalnym obiekcie

Temperatura gruntu szklarni ulega również wahaniom związanym z nasłonecznieniem i temperaturą zewnętrzną. Jednakże energia cieplna, nagromadzona w nim w ciągu nawet słonecznego dnia, nie odgrywa większej roli w noonym bilansie cieplnym szklarni. Jak wykazały badania [3, 4, 19], dobowe wahania temperatury gruntu w miesiącach zimowych zaznaczają się wyraźniej tylko w warstwach powierzchniowych, do głębokości 10-15 cm. Przy tym już w ciągu 3-5 godzin popołudniowych grunt ustala swoją temperaturę odpowiednio do stopnia ogrzania wnętrza szklarni. Obniżenie się temperatury zewnętrznej pociąga za sobą powolne obniżenie temperatury całej powierzchni gruntu, związane przede wszystkim ze spadkiem temperatury oszklenia.

Głównym czynnikiem w kształtowaniu temperatury gruntu jest ostatecznie jednak instalacja ogrzewcza, i to zarówno w odniesieniu do średniej wartości tej temperatury, jak i równomierności jej pola w całej nawie. Ogrzewanie rurami przy ziemi pozwala nie tylko utrzymać wyższą średnią temperaturę gruntu, ale także stwarza lepsze możliwości zabezpieczenia jego pasów wzdłuż ścian zewnętrznych. Przy ogrzewaniu powietrznym temperatura gruntu kształtuje się tak nisko, że konieczne staje się jego dodatkowe podgrzewanie.

Pionowy profil temperatury powietrza w szklarni przy systemach ogrzewania badanych w naturalnym obiekcie - przedstawiono na rys. 3.8. Dane te odpowiadają wartościom przeciętnym z wielu obserwacji. Uwidacznia się korzystny wpływ systemu ORz i ru-




Rys. 3.8. Pionowy profil temperatury powietrza w szklarni według pomiarów w naturalnym obiekcie. Oznaczenia: -•-ORz, ——OP2, ——ORt, - - - ORP

rowo-powietrznego na ogrzanie strefy do ok. 1,5 m. Przy ogrzewaniu powietrznym i rurami pod dachem (ORt) temperatura powietrza bezużytecznie wzrasta z wysokością.

Z rys. 3.8 można również wyciągnąć wnioski co do miejsca umieszczenia termometrów kontrolnych i czujników temperatury dla regulacji ogrzewania. Ze względu na dobro upraw roślinnych czujniki takie powinny być umieszczane w strefie 0,5 do 1,2 m, zależnie od rozwoju roślin w ciągu roku.

Przy ogrzewaniach rurowych pola temperatury powietrza w rzeczywistym obiekcie były dobrze wyrównane w poziomie. Zaburzenia profilu temperatury na długości szklarni pojawiały się tylko przy jej ścianach szczytowych: przy zewnętrznej występował spadek temperatury o 3-6 deg, od strony łącznika - jej wzrost o 2-3 deg. Zaznacza się potrzeba dodatkowego zabezpieczenia ściany szczytowej rurami grzejnymi.

Na równomierność poziomych pól temperatury powietrza wywiera wpływ zarówno średnia temperatura rur ogrzewczych, praktycznie wyrównana na długości szklarni dzięki połączeniu ich w pętle, jak i ruchy powietrza, występujące w całej szklarni. Ruchy te obserwowano przy pracy obu badanych instalacji rurowych. Wzdłuż szklarni powietrze płynęło dołem od zewnętrznej ściany szczytowej ku łącznikowi z prędkościami do 0,8 m/s. Następnie na przestrzeni kilkunastu metrów przed łącznikiem prądy powietrza wznosiły się ku górze i częściowo wracały wzdłuż szklarni, a częściowo wznosiły się pod dach, przenikały przez nieszczelności na zewnątrz, względnie spływały wzdłuż chłodnych szyb ku dołowi. Przy ścianach bocznych, zabezpieczonych rurami ogrzewczymi, występował konwekcyjny ruch powietrza, który spotykał się z chłodnymi opadającymi masami powietrza i powodował ich intensywne mieszanie.

Wzdłużne i poprzeczne ruchy przy umieszczeniu rur pod dachem były bardziej intensywne. Natomiast rury umieszczone nad ziemią uspokajały wzdłużne prądy lokalną konwekcją.

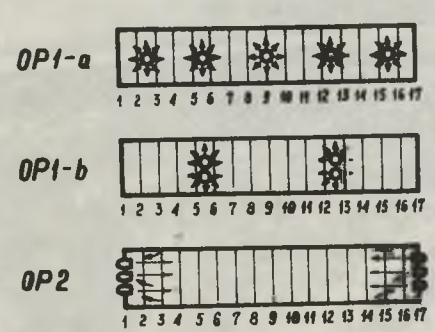
### 3.3.3. Badania w modelu fizykalnym

Przy ogrzewaniu powietrznym pionowe i poziome profile temperatury i ruchy powietrza są zależne od sposobu jego rozdzia-

łu przez urządzenia ogrzewcze. Wobec trudności i dużych kosztów, związanych ze zmianami w instalacjach rzeczywistego obiektu w Pszczynie, badania tego systemu ogrzewania przeprowadzono za pomocą modelu fizykalnego szklarni (rys. 2.4).

Niskie koszty budowy i zalety ruchowe instalacji bezprzewodowych, z indywidualnymi aparatami ogrzewczymi [26], były powodem, że w pierwszej kolejności zajęto się wariantami ogrzewania powietrznego OP1 i OP2 wg tab. 2-1.

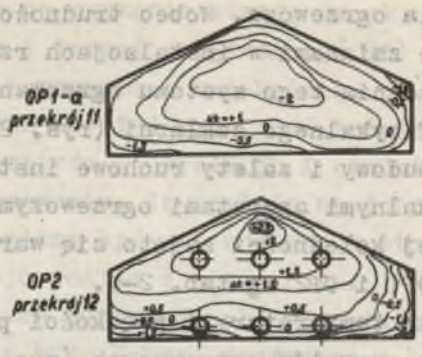
Obserwowano pola temperatury i prędkości powietrza przy różnym rozmieszczeniu aparatów ogrzewczych (rys. 3.9) oraz przy zmianach prędkości i temperatury nawiewu. Charakterystyczną cechą dla wszystkich rozpatrywanych rozwiązań bezprzewodowych jest intensywna cyrkulacja i mieszanie powietrza w całej nawie.



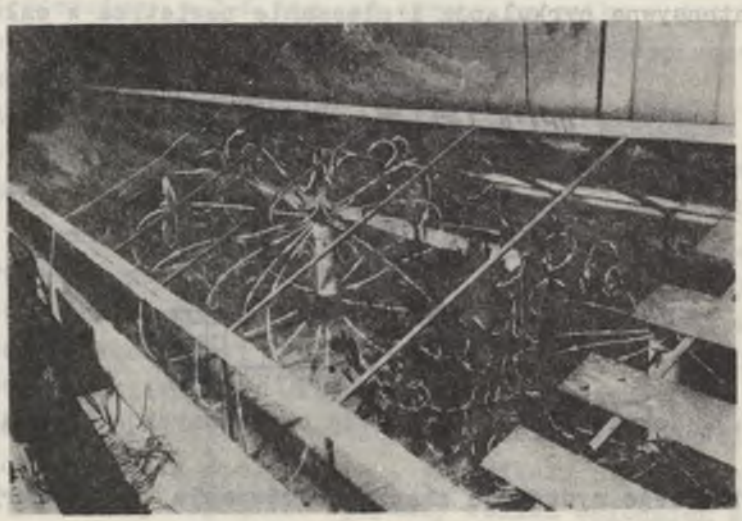

Rys. 3.9. Rozmieszczenia aparatów ogrzewczych w modelu szklarni

Na skutek tego występuje znaczne wyrównanie temperatury powietrza zarówno wzdłuż,jak i na wysokości nawy. Przy nawiewie z prędkością 2-5 m/s dla OP1, a 4-6 m/s dla OP2 i nadwyżką temperatury 20-30 deg uzyskiwano w nawie rozkład temperatury powietrza, przedstawiony przykładowo na rysunku 3.10. Przebieg strumieni powietrza dla OP1 ilustruje rys. 3.11, dla OP2 rys. 3.12.

Przy rozdziale pierścieniowym (OP1) mieszanie powietrza w szklarni jest najbardziej intensywne. Przy nawiewaniu skoncentrowanych strumieni od ścian szczytowych (OP2) strumienie te ścielą się wzdłuż dachu (rys. 3.12), dzięki czemu zwiększa się ich zasięg, chociaż kosztem zwiększonych strat ciepła szklarni.




Rys. 3.10. Przykłady rozkładu temperatury w szklarni przy ogrzewaniu powietrznym, wg pomiarów w modelu



Rys. 3.11. Rozpływ powietrza w szklarni ogrzewanej aparatami ogrzewczymi w układzie OP1-a wg rys. 3.9

Rys. 3.12. Rozpływ i prędkości powietrza w szklarni przy nawiewie skoncentrowanymi strumieniami (OP2)

Rys. 3.12 ilustruje również proporcje prędkości strumieni nawiewnych i powrotnych przy OP2. Przedstawione przykładowo proporcje nie są zupełnie dogodne. Aby zmniejszyć prędkość strumieni powrotnych w szczytowych częściach szklarni, należało zmniejszyć współczynnik burzliwości strumieni nawiewnych i podnieść wyżej otwory nawiewne.

Pomiędzy prędkością strumieni powietrza a rozkładem jego temperatury w nawie występuje wyraźny związek. Wyraża się on wzrostem pionowego i poziomego gradientu temperatury powietrza przy zmniejszaniu się jego prędkości w powrotnych strumieniach. Uwidacznia się to już niekorzystnie przy prędkościach poniżej 0,2 m/s.

Nawiew wywiera decydujący wpływ na rozpływ powietrza w nawie, a więc także na bieg powrotnych strumieni. Dlatego konieczne jest odpowiednie kształtowanie strumieni nawiewnych co do ich wydatku i zasięgu oraz rozmieszczenia i ilości, w powiązaniu z wielkością i kształtem szklarni. Pożądane prędkości strumieni powrotnych osiąga się przy wydatku aparatów ogrzewczych, odpowiadającym 10–15-krotnej pojemności szklarni. Dogodny i praktycznie osiągalny zasięg strumieni nawiewnych mieści się w granicach 7–10 m przy nawiewie pierścieniowym (OP1) i 15–20 m przy nawiewie skoncentrowanymi strumieniami (OP2). Strumienie nawiewne, posiadające z natury temperaturę wyższą od przeciętnej w szklarni, powinny być prowadzone w górnej części szklarni, ponad roślinami. Strefa roślin winna znajdować się w zasięgu strumieni powrotnych i obszarów przejściowych. Taki rozdział powietrza może być kłopotliwy w okresach wysokiego wzrostu roślin. Dlatego wtedy może być potrzebny nawiew za pomocą dołączanych przewodów rozdzielczych. W szklarni z roślinnością średniej wysokości (rys. 3.11) strumienie powrotne są rozpraszane i z trudem docierają w pobliże gruntu.

Podane względy wskazują, że w klimacie Polski bardziej korzystne może być ogrzewanie rurowo-powietrzne, przy którym występuje lepsze ogrzanie gruntu od rur i które pozwala zmniejszyć temperaturę nawiewanego powietrza.

## 4. CHARAKTERYSTYKA DYNAMICZNA SZKLARNI

Lekkość i przeźroczystość przegród szklarni sprawia, że jest ona w wysokim stopniu podatna na wpływy cieplne otoczenia. Dotyczy to zwłaszcza nieustalonych procesów przenoszenia ciepła, związanych z wahaniami temperatury zewnętrznej, prędkości wiatru, nasłonecznienia czy zachmurzenia. Czasowe przebiegi parametrów klimatycznych otoczenia wywołują reakcję pól temperaturowych wnętrza. Zadaniem instalacji ogrzewczej jest odpowiednia stabilizacja tych pól. Rozwiązanie instalacji, sposób jej regulacji, a także regulator - powinny być dostosowane do dynamicznych własności obiektu regulacji i jego obciążeń.

Charakterystyka dynamiczna obiektu regulacji obejmuje czasowe zależności wielkości regulowanej od wielkości nastawiającej i poszczególnych zakłóceń. Związki te wyraża się w postaci transmitancji nastawczej i zakłóceniowych, w których występują jako dynamiczne parametry obiektu: stałe czasowe, opóźnienia i współczynniki wzmocnienia. Im mniejszy jest stosunek opóźnień do zastępczej stałej czasowej, tym lepsza jest podatność obiektu na regulację.

W przypadku obiektu ogrzewanego, w skład którego nieodłącznie wchodzą jakieś rurowe instalacje, szczególnie odczuwalne są opóźnienia transportowe, odpowiadające czasowi przepływu czynnika grzejnego na określoną odległość. Można je stosunkowo łatwo ustalić np. na podstawie projektu instalacji i dlatego korzystnie jest, w miarę możliwości, wyodrębnić je z transmitancji obiektu.

Kombinat szklarniowy jako obiekt regulacji ogrzewania składa się:

- z urządzeń ogrzewniczych źródła ciepła (kotłowni lub wymiennikowni), zazwyczaj znacznie oddalonego od poszczególnych szklarni;
- z rozdzielczej sieci cieplnej o długości kilkuset metrów;
- ze szklarni (budynek + instalacja) jako bezpośredniego obiektu regulacji temperatury.

Można przyjąć, że część, obejmująca źródło ciepła i sieć, charakteryzuje się głównie opóźnieniami typu transportowego. Natomiast w samej szklarni występują zarówno opóźnienia transportowe, jak i inercyjne. W badaniach regulacyjnych własności całego kombinatu warto zatem oddzielnie rozpatrywać dynamiczną charakterystykę samej szklarni, a oddzielnie transport czynnika poza nią. Uzyskuje się w ten sposób możność analizowania wpływu cech konstrukcyjnych i ruchowych instalacji ogrzewczych na własności regulacyjne obiektu.

Parametrami cieplnymi wnętrza, które mają istotne znaczenie dla uprawy roślin, jest temperatura powietrza wewnętrznego ($t_w$) oraz temperatura gruntu ($\vartheta_g$). Oddziaływanie instalacji ogrzewczych szklarni na temperaturę gruntu jest słabe i powolne. Odpowiednie podgrzewanie tego gruntu można osiągnąć za pomocą oddzielnych instalacji, zatopionych pod jego powierzchnią. Oddziaływanie takich instalacji na temperaturę powietrza w szklarni jest z kolei również znikome [41, 42]. Z tego powodu w dalszych rozważaniach przyjęto tylko temperaturę $t_w$ jako wielkość regulowaną.

Za wielkości zakłócające uważa się: temperaturę zewnętrzną ($t_z$), napromieniowanie słoneczne ($\dot{E}_{sł}$) oraz prędkość (w) wiatru i zachmurzenie (B).

Wybór wielkości nastawiającej związany jest z systemem ogrzewania. W rozpatrywanych w niniejszej pracy ogrzewaniach wodnych rurowych z jakościową regulacją, wielkością tą może być temperatura wody grzejnej, a w ogrzewaniach powietrznych - temperatura powietrza ($t_a$) wypływającego z aparatów ogrzewczych lub wydatek ciepła ($\dot{Q}_a$) tych aparatów.

Dla scharakteryzowania obiektu określono dynamiczne czasowe odpowiedzi temperatury $t_w$ na skokowe zmiany wielkości nastawiającej i zakłóceń. Badania transmitancji przeprowadzono w oparciu o energijny bilans zmiennych w czasie strumieni cieplnych obiektu (rys. 3.1).

Wyposażenie ogrzewnioze szklarni składało się kolejno z ORz, OP1 oraz ORz + OP1 - wg oznaczeń omówionych w tabeli 2-1. Statyczne wydajności badanych instalacji wynikają z danych tab. 2-2. Ogrzewanie rurowo-powietrzne, które można dość dowolnie

zestawić z obu instalacji składowych, badano przy wydajności części rurowej, odpowiadającej 70% nominalnej mocy zainstalowanej.

Badania prowadzono dwutorowo, a to:

- analitycznie, drogą teoretycznego rozwiązania układu równań, składających się na dynamiczny bilans cieplny obiektu, korzystając z maszyny cyfrowej Odra 1003,
- eksperymentalnie, za pomocą hydrodynamicznego modelu analogowego szklarni.

W obu wariantach badań przyjęte ujęcia matematycznego modelu obiektu w pewnym stopniu różnią się między sobą.

## 4.1. Analiza matematyczna własności obiektu

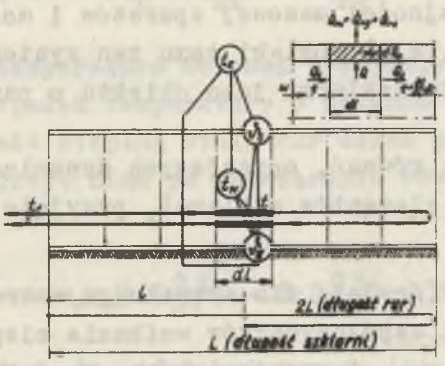
Rozpatruje się bilanse strumieni cieplnych dla następujących elementów szklarni:

- powietrze wewnętrzne,
- oszklone przegrody,
- powierzchniowa warstwa gruntu,
- instalacja ogrzewcza.

Dynamiczne własnośći wymienionych elementów są różne. Dzięki intensywnym ruchom powietrza wewnątrz szklarni występuje jego dobre mieszanie i wyrównanie temperatury w całej objętości. Związane z tym niewielkie opóźnienia transportowe oraz stosunkowo nieduża pojemność cieplna powietrza sprawiają, że można je traktować jako element o skupionych parametrach, reprezentowanych średnią wartością temperatury $t_w$. Podobnie średnia temperatura $\vartheta_s$ szyb dość dobrze reprezentuje temperaturowe pole całego oszklenia.

Stan cieplny gruntu charakteryzują poziome powierzchnie izotermiczne ($\vartheta_{go}$ i $\vartheta_{gi}$ na rys. 3.1 i 4.3), co prowadzi do układu o parametrach rozłożonych w kierunku pionowym. Dla znacznego uproszczenia rozważań matematycznych wzięto pod uwagę jako parametr skupiony średnią temperaturę $\vartheta_g$ i pojemność cieplną cienkiej, powierzchniowej warstwy gruntu (rys. 4.1). W takiej warstwie bowiem zamykają się wahania jego temperatury, związa-

ne z krótkotrwałymi zakłóceniami, rozważanymi w procesie regulacji. Warto nadmienić, że w szklarni wahania temperatury gruntu są bardzo powolne w stosunku do wahań wielkości regulowanej ($t_w$) oraz że oddziaływanie $\vartheta_g$ na $t_w$ jest słabe [41]. Zostało to szczegółowo przebadane przy pomocy modelu analogowego, w którym potraktowano grunt jako element o parametrach rozłożonych (rys. 4.3).




Rys. 4.1. Schemat matematycznego modelu rurowego ogrzewania szklarni

Rurowa instalacja ogrzewcza składa się z wielu pętli rur, prowadzonych przez całą długość szklarni tam i z powrotem. Stanowi więc układ przepływowy o parametrach rozłożonych. Zakładając brak osiowego przewodzenia ciepła i wstecznego mieszania oraz stałość własności czynnika grzejnego - układ taki można opisać równaniem różniczkowym cząstkowym, zawierającym pochodne cząstkowe względem czasu i długości [29, 31]. Uwzględniono to w obliczeniowym ujęciu dynamicznego bilansu szklarni. Można wyobrazić sobie, że w wyniku tego szklarnia dzieli się na plastry o długości -dl-, które indywidualnie reagują na falę temperatury wody grzejnej, płynącą wzdłuż rur. Bilans każdego takiego plastra może być przedstawiony za pomocą parametrów skupionych wg schematu strumieni na rysunku 4.1, jeżeli przyjmie się idealne mieszanie i wyrównanie temperatury powietrza w kierunku prostopadłym do osi rur ogrzewczych. Z rys. 4.1 wynika również, że działanie nastawiające obu części pętli ogrzewczej w obrębie plastra jest przesunięta w czasie.

Pominięcie opóźnienia w transporcie ciepła od rur do powietrza, związanego z wyrównaniem temperatury w całej masie powietrza w obrębie szklarni, zniekształca w jakimś stopniu obraz charakterystyki obiektu. Możliwości uwzględnienia tego opóźnienia omówiono w rozdz. 4.3.

Przy powietrznym ogrzewaniu dostawa ciepła odbywa się za pośrednictwem wentylatorowych aparatów ogrzewczych, przy pełnej recyrkulacji powietrza. Występujące przy tym transportowe opóźnienie, potrzebne na wymieszanie powietrza wewnątrz szklarni, zależy od wydajności masowej aparatów i może być całkiem małe (patrz rozdz. 4.3). Dzięki temu ten system ogrzewania sprzyja traktowaniu szklarni jako obiektu o parametrach skupionych.

Dla lineryzacji równań, opisujących dynamiczne bilanse cieplne poszczególnych elementów szklarni, przyjęto następujące uproszczenia:

- stosowano stałe (średnie dla aktualnego zakresu zmian temperatury) wartości współczynników wnikania ciepła: konwekcyjnych $\alpha_{sk}$, $\alpha_{gk}$, $\alpha_{rk}$ i promienistych $\alpha_{rg}$, $\alpha_{rs}$, $\alpha_{gs}$ oraz stałą prędkość wiatru (w), warunkującą wartość $\alpha_{zk}$.
- strumienie ciepła, związane z przenoszeniem masy od parującej powierzchni gruntu ($\dot{Q}_{gp}$) do powietrza i od powietrza do powierzchni kondensującej szyb ($\dot{Q}_{sp}$), uwzględniono przez odpowiednią korektę wartości promienistego współczynnika wnikania ciepła $\alpha_{gs}$.

W podanych poniżej równaniach dynamicznych bilansów symbole temperatur $t$, $t_w$, $\vartheta_g$, $\vartheta_s$, $t_z$ oznaczają przyrosty wartości tych temperatur ponad stan ustalony:

$$t_i \sim \Delta t_i(\tau) \qquad \vartheta_i \sim \Delta\vartheta_i(\tau).$$

4.1.1. Transmitancje obiektu z ogrzewaniem rurowym (ORz)

Uwaga: Wszystkie bilanse rozdziału 4.1.1. odniesione są do 1 m długości szklarni (dl = 1 m).

Bilans cieplny instalacji rurowej

Bilans strumienia wody grzejnej w odcinku szklarni o długości dl = 1 m i w przedziale czasu $d\tau$ (rys. 4.1):

$$\dot{Q}_1 \, d\tau = \dot{Q}_2 \, d\tau + \dot{Q} \, d\tau + dQ. \qquad (4.1a)$$

Bilans dla ścianki rury:

$$\dot{Q} \, d\tau = dQ_r + \dot{Q}_{rk} d\tau + \dot{Q}_{rg} d\tau + \dot{Q}_{rs} d\tau. \qquad (4.1b)$$

Zakłada się, że temperatura ścianki przyjmuje temperaturę wody oraz pomija się spadek temperatury w ściance ($\lambda = \infty$). Zatem $t \approx \vartheta_r$, a pojemność cieplną stali rur można połączyć z pojemnością wody grzejnej. Stąd po rozwiązaniu równań (4.1a) i (4.1b):

$$-0{,}5(mc + m_r c_r)\left(\frac{\partial t}{\partial \tau}\right) - \dot{m}c\left(\frac{\partial t}{\partial l}\right) = 0{,}5\, A_r \alpha_{rk}(t - t_w) +$$

$$+ 0{,}5\, A_r \alpha_{rg}(t - \vartheta_g) + 0{,}5\, A_r \alpha_{rs}(t - \vartheta_s).$$

Wprowadzony do powyższego równania mnożnik 0,5 wynika stąd, że dla dynamicznej reakcji plastra szklarni o długości dl czynna jest w danej chwili, podczas przepływu fali cieplnej, tylko połowa rur każdej pętli. Po uporządkowaniu powyższego równania otrzymuje się:

$$-0{,}5\,(mc + m_r c_r)\left(\frac{\partial t}{\partial \tau}\right) - \dot{m}c\left(\frac{\partial t}{\partial l}\right) =$$

$$= 0{,}5\, A_r(\alpha_{rk} + \alpha_{rg} + \alpha_{rs})\, t - 0{,}5\, A_r\left[\alpha_{rk} t_w + \alpha_{rg}\vartheta_g + \alpha_{rs}\vartheta_s\right].$$

Wprowadza się niżej podane oznaczenia i dokonuje się transformacji Laplace'a względem czasu:

$$K_1 = A_r(\alpha_{rk} + \alpha_{rg} + \alpha_{rs}), \qquad w = \frac{2\,\dot{m}}{m}$$

$$T_1 = \frac{mc}{K_1}, \quad T_r = \frac{m_r c_r}{K_1}, \quad wT_1 = \frac{2\,\dot{m}c}{K_1}, \quad T_{1r} = T_1 + T_r$$

$$K_{1w} = \frac{A_r \alpha_{rk}}{K_1}, \quad K_{1g} = \frac{A_r \alpha_{rg}}{K_1}, \quad K_{1s} = \frac{A_r \alpha_{rs}}{K_1}$$

$$F_1 = \frac{T_1}{T_{1r}^{p+1}}, \quad F_{1w} = \frac{K_{1w}}{T_{1r}^{p+1}}, \quad F_{1g} = \frac{K_{1g}}{T_{1r}^{p+1}}, \quad F_{1s} = \frac{K_{1s}}{T_{1r}^{p+1}}.$$

W wyniku tego otrzymuje się równanie:

$$t(p) + wF_1 \frac{dt(p)}{d1} = F_{1w} t_w(p) + F_{1g} \vartheta_g(p) + F_{1s} \vartheta_s(p). \quad (4.1c)$$

Rozwiązaniem tego równania różniczkowego, przy przyjęciu warunku początkowego: $t(0,\tau) = t_1$, jest równanie:

$$t(p) = \exp(-1/wF_1) t_1(p) +$$

$$+ \left[1-\exp(-1/wF_1)\right] \left[F_{1w} t_w(p) + F_{1g} \vartheta_g(p) + F_{1s} \vartheta_s(p)\right]. \quad (4.1)$$

Bilans cieplny powierzchniowej warstwy gruntu

$$\dot{Q}_{rg} d\tau + \dot{Q}_{gk} d\tau + \dot{E}_g d\tau - dQ_g = (\dot{Q}_{gs} + \dot{Q}_{gp})\, d\tau. \quad (4.2a)$$

Po rozwinięciu:

$$0,5A_r \alpha_{rg}(t - \vartheta_g) + A_g \alpha_{gk}(t_w - \vartheta_g) + \dot{E}_g - m_g c_g \left(\frac{d\vartheta_g}{d\tau}\right) =$$

$$= A_g \alpha_{gs}(\vartheta_g - \vartheta_s).$$

W powyższym równaniu strumień $\dot{Q}_{gp}$ uwzględniono za pomocą zwiększenia wartości $\alpha_{gs}$. Po uporządkowaniu tego równania wprowadza się oznaczenia:

$$K_2 = 0,5A_r \alpha_{rg} + A_g \alpha_{gk} + A_g \alpha_{gs} \qquad T_2 = m_g c_g / K_2$$

$$K_{2r} = 0,5A_r \alpha_{rg}/K_2, \quad K_{2w} = A_g \alpha_{gk}/K_2, \quad K_{2s} = A_g \alpha_{gs}/K_2,$$

$$K_{2E} = 1/K_2.$$

Po dokonaniu transformacji Laplace'a względem czasu oblicza się transmitancje częściowe $F_{2i}$ (tab. 4-2):

$$F_{2r} = K_{2r}/(T_2p+1) \qquad F_{2w} = K_{2w}/(T_2p+1)$$

$$F_{2s} = K_{2s}/(T_2p+1) \qquad F_{2E} = K_{2E}/(T_2p+1)$$

stąd otrzymuje się równanie:

$$\vartheta_g(p) = F_{2r}t(p) + F_{2w}t_w(p) + F_{2s}\vartheta_s(p) + F_{2E}\dot{E}_g(p). \quad (4.2)$$

Bilans cieplny powietrza wewnętrznego

$$\dot{Q}_{rk}d\tau + \dot{Q}_{gp}d\tau - dQ_w = \dot{Q}_{gk}d\tau + \dot{Q}_{sk}d\tau + \dot{Q}_v d\tau + \dot{Q}_{sp}d\tau. \quad (4.3a)$$

Przyjęto, że $\dot{Q}_{gp} \sim \dot{Q}_{sp}$ i w dalszych rozważaniach pomija się te strumienie

$$0{,}5\, A_r\alpha_{rk}(t-t_w) - m_w c_w \left(\frac{d\, t_w}{d\tau}\right) =$$

$$= A_g\alpha_{gk}(t_w - \vartheta_g) + A_s\alpha_{sk}(t_w - \vartheta_s) + \dot{m}_z c_w(t_w - t_z).$$

Stosuje się przekształcenia i oznaczenia, jak w poprzednich bilansach:

$$K_3 = 0{,}5A_r\alpha_{rk} + A_g\alpha_{gk} + A_s\alpha_{sk} + \dot{m}_z c_w, \qquad T_3 = m_w c_w/K_3$$

$$K_{3r} = 0{,}5A_r\alpha_{rk}/K_3, \quad K_{3g} = A_g\alpha_{gk}/K_3, \quad K_{3s} = A_s\alpha_{sk}/K_3, \quad K_{3z} = \dot{m}_z c_w/K_3.$$

Po transformacji Laplace'a wprowadza się transmitancje $F_{3i}$ (tab. 4-2):

$$F_{3r} = K_{3r}/(T_3p+1) \qquad F_{3g} = K_{3g}/(T_3p+1)$$

$$F_{3s} = K_{3s}/(T_3p+1) \qquad F_{3z} = K_{3z}/(T_3p+1)$$

i otrzymuje się równanie

$$t_w(p) = F_{3r}t(p) + F_{3g}\vartheta_g(p) + F_{3s}\vartheta_s(p) + F_{3z}t_z(p). \qquad (4.3)$$

Bilans cieplny oszklenia

$$\dot{Q}_{rs}d\tau + \dot{Q}_{sk}d\tau + \dot{Q}_{gs}d\tau + \dot{Q}_{sp}d\tau + \dot{E}_s d\tau - dQ_s =$$

$$= (\dot{Q}_{zk} + \dot{Q}_{ze})d\tau \qquad (4.4a)$$

$$0{,}5A_r\alpha_{rs}(t-\vartheta_s) + A_s\alpha_{sk}(t_w-\vartheta_s) + A_g\alpha_{gs}(\vartheta_g - \vartheta_s) +$$

$$+ \dot{E}_s - m_s c_s \left(\frac{d\vartheta_s}{d\tau}\right) = A_s(\alpha_{zk} + \alpha_{ze})(\vartheta_s - t_z)$$

$\alpha_{ze}$ – zastępczy współczynnik wnikania ciepła, charakteryzujący długofalowe promieniowanie do atmosfery, omówiono w [3, 41]. W dalszym ciągu wprowadza się oznaczenia: $\alpha_{zk} + \alpha_{ze} = \alpha_{ke}$. Przekształcenia i oznaczenia analogiczne, jak w poprzednich bilansach:

$$K_4 = 0{,}5A_r\alpha_{rw} + A_s\alpha_{sk} + A_g\alpha_{gs} + A_s\alpha_{ke}$$

$$T_4 = m_s c_s/K_4, \quad K_{4r} = 0{,}5A_r\alpha_{rs}/K_4, \quad K_{4w} = A_s\alpha_{sk}/K_4$$

$$K_{4g} = A_g\alpha_{gk}/K_4, \quad K_{4z} = A_s\alpha_{ke}/K_4, \quad K_{4E} = 1/K_4$$

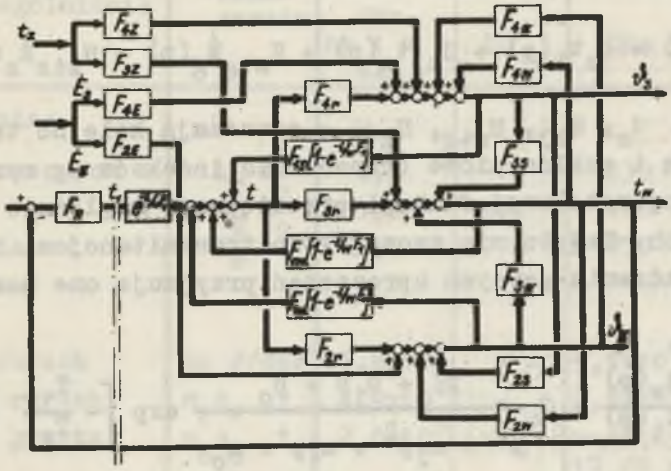
wprowadza się transmitancje $F_{4i}$ (tab. 4-2):

$$F_{4r} = K_{4r}/(T_4p+1) \qquad F_{4w} = K_{4w}/(T_4p+1) \qquad F_{4g} = K_{4g}/T_4p+1$$

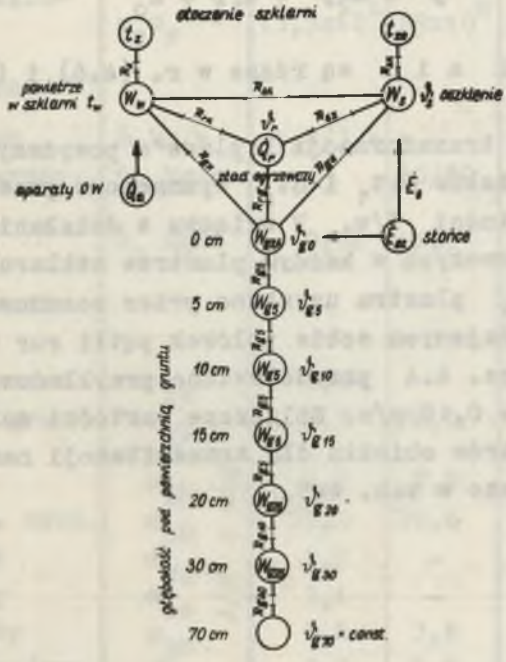
$$F_{4z} = K_{4z}/(T_4p+1) \qquad F_{4E} = K_{4E}/(T_4p+1)$$

$$\vartheta_s(p) = F_{4r}t(p) + F_{4w}t_w(p) + F_{4g}\vartheta_g(p) + F_{4z}t_z(p) + F_{4E}\dot{E}_s(p). \qquad (4.4)$$

Rys. 4.2 przedstawia schemat blokowy szklarni z ogrzewaniem rurowym, oparty na równaniach 4.1 do 4.4. Spośród podanych tam trzech wielkości wyjściowych: $t_w$, $\vartheta_g$ i $\vartheta_s$ – z punktu widzenia



Rys. 4.2. Schemat blokowy układu regulacji temperatury szklarni z instalacją rurową




Rys. 4.3. Schemat funkcjonalny modelu analogowego szklarni

regulacji istotne znaczenie posiada temperatura powietrza wewnętrznego ($t_w$). Dane dla obliczenia poszczególnych członów równań zawiera tabela 4-1 i 4-2.
Po rozwiązaniu układu równań 4.1 do 4.4 otrzymano równanie ogólne odpowiedzi czasowej obiektu w postaci:

$$t_w(p) = G_s t_1(p) + H_{z3} t_z(p) + H_{z1g} \dot{E}_g(p) + H_{z1s} \dot{E}_s(p), \quad (4.5)$$

w którym $G_s$, $H_{z3}$, $H_{z1g}$, $H_{z1s}$ - oznaczają kolejno transmitancje nastawczą i zakłóceniowe (oznaczenia indeksów wg rys. 5.2) w postaci operatorowej funkcji przestępnej, względnie operatorów wymiernych. Zajęto się szczegółowo transmitancjami $G_s$ i $H_{z3}$. Po wprowadzeniu pewnych uproszczeń przyjmują one następującą postać:

$$G_s = \frac{t_w(p)}{t_1(p)} = C \frac{p^2 + b_1 p + b_o}{p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_o} \exp\left[-\frac{T_{1r}}{T_1} \frac{1}{w} p\right] \quad (4.6)$$

$$H_{z3} = \frac{t_w(p)}{t_z(p)} = C \frac{p^2 + b_1 p + b_o}{p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_o}. \quad (4.7)$$

Wartości stałych a i b są różne w r. (4.6) i (4.7) - patrz tab. 4-3.

Po odwrotnej transformacji Laplace'a powyższych funkcji dla jednostkowych skoków $\Delta t_1$ i $\Delta t_z$ wyznaczono przebiegi $\Delta t_w(\tau)$ dla szeregu wartości 1/w. W związku z działaniem nastawczym połowy rur ogrzewczych w każdym plastrze szklarni, pełną odpowiedź $\Delta t_w / \Delta t_1$ plastra uzyskano przez zesumowanie odpowiedzi dla odpowiadających sobie połówek pętli rur w odległości 1 i 2L-1. Na rys. 4.4 przedstawiono przykładowo takie odpowiedzi przy w = 0,18 m/s. Obliczone wartości zastępczych dynamicznych parametrów obiektu dla transmitancji nastawczej i zakłóceniowej podano w tab. 4-5.

Dane do dynamicznych bilansów szklarni 9 x 51 m

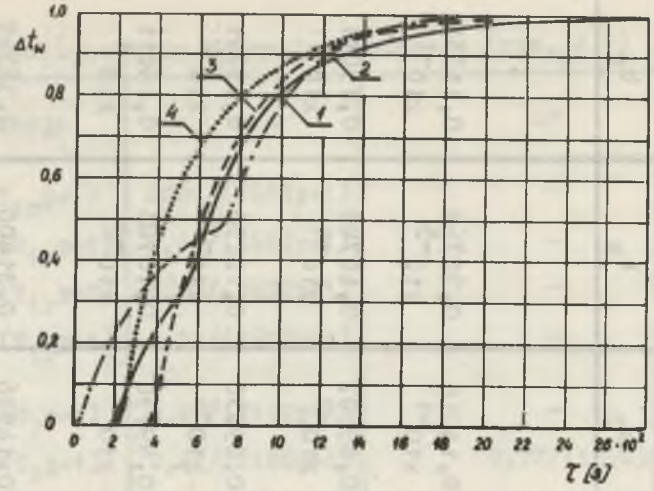
| Wyszczególnienie | oznaczenia | Obliczenia | | Model analogowy | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ORz na 1 m dł. | OP | ORz | OP |
| Powierzchnia: | | | | | |
| rur ogrzewczych | $A_r$ $m^2$ | 4,5 | - | 230 | - |
| gruntu | $A_g$ $m^2$ | 9,0 | 460 | 460 | 460 |
| oszklenia | $A_s$ $m^2$ | 15,1 | 770 | 770 | 770 |
| Masa: | | | | | |
| wody w rurach | mc J/deg | $17{,}8 \times 10^4$ | - | $9{,}1 \times 10^6$ | - |
| stali w rurach | $m_r c_r$ " | $4{,}9 \times 10^4$ | - | $2{,}5 \times 10^6$ | - |
| warstwy gruntu | $m_g c_g$ " | $2{,}0 \times 10^5$ | $1 \times 10^7$ | warstwy 2,5 do 10 cm grubości | |
| powietrza w szklarni | $m_w c_w$ " | $4{,}1 \times 10^4$ | $21 \times 10^6$ | $2{,}1 \times 10^6$ | $2{,}1 \times 10^6$ |
| przegród oszklonych | $m_s c_s$ " | $13{,}5 \times 10^4$ | $69 \times 10^6$ | $6{,}9 \times 10^6$ | $6{,}9 \times 10^6$ |
| Masa strumienia: | | | | | |
| wody w rurach | $\dot{m}$ kg/s | 1,8/3,6 | - | - | - |
| powietrza ogrzew. | $\dot{m}_a$ kg/s | - | 4,0/8,0 | - | 4x 2,0 |
| powietrza infiltruj. | $\dot{m}_z$ kg/s | 0,02 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Współczynnik wnikania ciepła: | | | | | |
| rury - powietrze | $\alpha_{rk}$ | 8,4 | - | 8,5 | - |
| powietrze - grunt | $\alpha_{gk}$ | 4,5 | 10,0 | 4,0 | 7,0 |
| powietrze - oszklenie | $\alpha_{sk}$ | 4,6 | 7,7 | 4,9 | 6,4 |
| oszkl. - pow. zewn. | $\alpha_{zk}$ J/m$^2$ s deg | 26,4 | 26,4 | 25,6 | 25,6 |
| rury - grunt | $\alpha_{rg}$ | 2,6 | - | 2,6 | - |
| rury - szyby | $\alpha_{rs}$ | 3,1 | - | 3,3 | - |
| grunt - szyby | $\alpha_{gs}$ | 5,6 | 3,8 | 4,1 | 4,1 |
| szyby - atmosfera | $\alpha_{ze}$ | 8,8 | 8,8 | 8,8 | 8,8 |

Transmitancje do schematu blokowego (rys. 4.2)

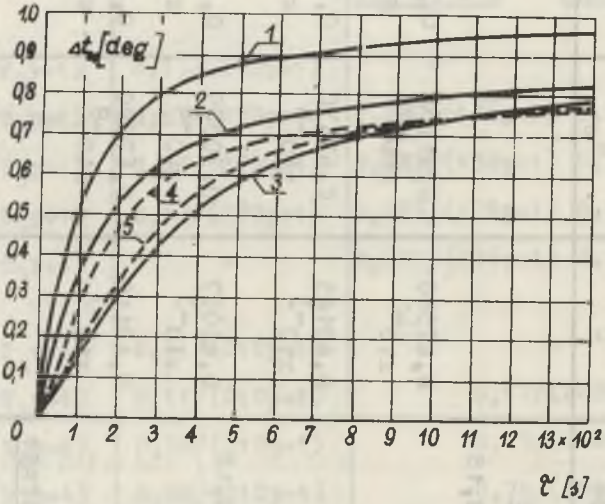
| Transmitancja | ORz | OP | |
|---|---|---|---|
| $F_1 = T_1/(T_{1r}p+1)$ | 2800/(3600p+1) | - | |
| $F_{1w} = K_{1w}/(T_{1r}p+1)$ | 0,60/(3600p+1) | - | |
| $F_{1g} = K_{1g}/(T_{1r}p+1)$ | 0,18/(3600p+1) | - | |
| $F_{1s} = K_{1s}/(T_{1r}p+1)$ | 0,22/(3600p+1) | - | |
| $F_{2r} = K_{2r}/(T_2p+1)$ | 0,06/(2100p+1) | - | |
| $F_{2w} = K_{2w}/(T_2p+1)$ | 0,42/(2100p+1) | 0,72/(1570p+1) | |
| $F_{2s} = K_{2s}/(T_2p+1)$ | 0,52/(2100p+1) | 0,27/(1570p+1) | |
| $F_{2E} = K_{2E}/(T_2p+1)$ | 0,00048/(2100p+1) | $1,57x10^{-4}/(1570p+1)$ | |
| | | dla $\dot{m}_a = 4$ | dla $\dot{m}_a = 8$ |
| $F_{3r} = K_{3r}/(T_3p+1)$ | 0,13/(270p+1) | - | - |
| $F_{3g} = K_{3g}/(T_3p+1)$ | 0,27/(270p+1) | 0,297/(136p+1) | 0,237/(108p+1) |
| $F_{3s} = K_{3s}/(T_3p+1)$ | 0,47/(270p+1) | 0,383/(136p+1) | 0,305/(108p+1) |
| $F_{3z} = K_{3z}/(T_3p+1)$ | 0,13/(270p+1) | 0,065/(136p+1) | 0,051/(108p+1) |
| $F_{3a} = K_{3a}/(T_3p+1)$ | - | 0,255/(136p+1) | 0,407/(108p+1) |
| $F_{4r} = K_{4r}/(T_4p+1)$ | 0,01/(210p+1) | - | |
| $F_{4w} = K_{4w}/(T_4p+1)$ | 0,11/(210p+1) | 0,17/(200p+1) | |
| $F_{4g} = K_{4g}/(T_4p+1)$ | 0,08/(210p+1) | 0,05/(200p+1) | |
| $F_{4z} = K_{4z}/(T_4p+1)$ | 0,80/(210p+1) | 0,78/(200p+1) | |
| $F_{4E} = K_{4E}/(T_4p+1)$ | 0,00 48/(210p+1) | $2,9x10^{-5}/(200p+1)$ | |

Wartości stałych we wielomianach transmitancji
(równania: 4.6, 4.7, 4.12, 4.13)

| Transmitancja | C | $a_o$ | $a_1$ | $a_2$ | $b_o$ | $b_1$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Ogrzew. rurowe | | | | | | |
| dla l/w = 25/0,18 | | | | | | |
| $G_s$ | 0,47580 $\times 10^{-3}$ | 0,91168 $\times 10^{-8}$ | 0,36467 $\times 10^{-4}$ | 0,14318 $\times 10^{-1}$ | 0,30769 $\times 10^{-5}$ | 0,11355 $\times 10^{-1}$ |
| $H_{z3}$ | 0,48145 $\times 10^{-3}$ | 0,67430 $\times 10^{-8}$ | 0,20587 $\times 10^{-4}$ | 0,89507 $\times 10^{-2}$ | 0,10785 $\times 10^{-4}$ | 0,19011 $\times 10^{-1}$ |
| dla l/w = 75/0,18 | | | | | | |
| $G_s$ | 0,43087 $\times 10^{-3}$ | 0,30389 $\times 10^{-8}$ | 0,12536 $\times 10^{-4}$ | 0,69330 $\times 10^{-2}$ | 0,10256 $\times 10^{-5}$ | 0,39701 $\times 10^{-2}$ |
| $H_{z3}$ | 0,48118 $\times 10^{-3}$ | 0,67280 $\times 10^{-8}$ | 0,20865 $\times 10^{-4}$ | 0,89790 $\times 10^{-2}$ | 0,10785 $\times 10^{-4}$ | 0,19011 $\times 10^{-1}$ |
| Ogrzew. powietrzne | | | | | | |
| $H_s$ | | 0,21813 $\times 10^{-7}$ | 0,51907 $\times 10^{-4}$ | 0,14896 $\times 10^{-1}$ | 0,31400 $\times 10^{-5}$ | 0,56369 $\times 10^{-2}$ |
| $H'_{z3}$ | | 0,15859 $\times 10^{-7}$ | 0,41173 $\times 10^{-4}$ | 0,12990 $\times 10^{-1}$ | 0,31399 $\times 10^{-5}$ | 0,56369 $\times 10^{-2}$ |




Rys. 4.4. Czasowe charakterystyki skokowe szklarni z ogrzewaniem rurowym. Krzywe 1, 2, 3 - $\Delta t_w/\Delta t_1$ w przekroju początkowym środkowym, końcowym obiektu o parametrach rozłożonych. Krzywa 4 - $\Delta t_w/\Delta \vartheta_r$ obiektu o parametrach skupionych




Rys. 4.5. Czasowe charakterystyki skokowe szklarni z ogrzewaniem powietrznym:

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 - $\Delta t_w/\Delta t_a$ | dla | $\dot{m}_a$ = 8 kg/s | - wg obliczeń |
| 2 - $\Delta t_w/\Delta t_a$ | dla | $\dot{m}_a$ = 4 kg/s | - wg obliczeń |
| 3 - $\Delta t_w/\Delta t_z$ | | | - wg obliczeń |
| 4 - $\Delta t_w/\Delta \dot{Q}_a$ | | | - z modelu analogowego |
| 5 - $\Delta t_w/\Delta t_z$ | | | - z modelu analogowego |

4.1.2. Transmitancje obiektu z ogrzewaniem powietrznym

Dla ogrzewania powietrznego bierze się pod uwagę bilanse powietrza wewnętrznego, gruntu i oszklenia. W oparciu o uwagi podane poprzednio elementy te przedstawia się za pomocą parametrów skupionych. Pomija się wyprowadzenie równań przy zachowaniu oznaczeń analogicznych, jak w rozdz. 4.1.1, z tym, że oznaczenia te odnoszą się teraz do całej szklarni.

Bilans cieplny powierzchniowej warstwy gruntu

$$\dot{Q}_{gk}d\tau + \dot{E}_g d\tau - dQ_g = (\dot{Q}_{gs} + \dot{Q}_{gp})d\tau \qquad (4.8a)$$

$$K_2 = A_g(\alpha_{gk} + \alpha_{gs})$$

$$\vartheta_g(p) = F_{2w}t_w(p) + F_{2s}\vartheta_s(p) + F_{2E}\dot{E}_g(p). \qquad (4.8)$$

Bilans cieplny powietrza wewnętrznego

$$\dot{Q}_a d\tau - dQ_w = \dot{Q}_{gk}d\tau + \dot{Q}_{sk}d\tau + \dot{Q}_v d\tau. \qquad (4.9a)$$

Pominięto strumienie $\dot{Q}_{gp}$ i $\dot{Q}_{sp}$. Strumień ciepła dostarczanego przez aparaty ogrzewcze:

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_a c_w (t_a - t_w)$$

a strumień tracony na skutek infiltracji:

$$\dot{Q}_v = \dot{m}_z c_w (t_w - t_z).$$

W związku z tym pojawiają się zmienione, względnie dodatkowe oznaczenia:

$$K_3 = \dot{m}_a c_w + \dot{m}_z c_w + A_g \alpha_{gk} + A_g \alpha_{sk}$$

$$K_{3a} = \dot{m}_a c_w / K_3 \qquad F_{3a} = K_{3a}/(T_3 p + 1).$$

Zatem:

$$t_w(p) = F_{3a}t_a(p) + F_{3g}\vartheta_g(p) + F_{3s}\vartheta_s(p) + F_{3z}t_z(p). \quad (4.9)$$

Bilans cieplny oszklenia

$$\dot{Q}_{sk}d\tau + (\dot{Q}_{gs} + \dot{Q}_{sp})d\tau + \dot{E}_s d\tau - dQ_s = (\dot{Q}_{zk} + \dot{Q}_{ze})d\tau \quad (4.10a)$$

$$K_4 = A_s(\alpha_{sk} + \alpha_{ke}) + A_g\alpha_{gs}$$

$$\vartheta_s(p) = F_{4w}t_w(p) + F_{4g}\vartheta_g(p) + F_{4z}t_z(p) + F_{4E}\dot{E}_s(p). \quad (4.10)$$

Po rozwiązaniu układu równań 4.6 do 4.8 otrzymano dla ogrzewania powietrznego ogólne równanie odpowiedzi czasowej obiektu w postaci:

$$t_w(p) = H_s t_a(p) + H'_{z3}t_z(p) + H'_{z1g}\dot{E}_g(p) + H'_{z1s}\dot{E}_s(p), \quad (4.11)$$

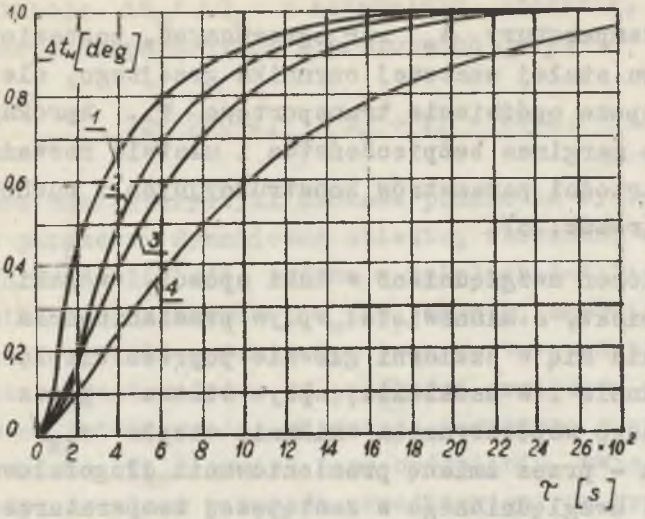
w którym $H_s$, $H'_{z3}$, $H'_{z1g}$, $H'_{z1s}$ oznaczają transmitancje: nastawczą i zakłóceniowe w postaci operatorów wymiernych (indeksy przyjęto zgodnie z rys. 5.2).

Szczegółowo obliczono transmitancje $H_s$ i $H'_{z3}$. Doprowadzono je do postaci (tab. 4-3):

$$H_s = \frac{t_w(p)}{t_a(p)} = \frac{\dot{m}_a}{m_w} \frac{p^2 + b_1 p + b_o}{p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_o} \quad (4.12)$$

$$H'_{z3} = \frac{t_w(p)}{t_z(p)} \frac{\dot{m}_z}{m_w} \frac{p^2 + b_1 p + b_o}{p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_o}. \quad (4.13)$$

Po dokonaniu odwrotnego przekształcenia Laplace'a powyższych funkcji dla jednostkowych skoków $t_a$ i $t_z$, wyznaczono przebiegi $\Delta t_w(\tau)$ dla $\dot{m}_a$ = 4 i 8 kg/s (rys. 4.6, krzywe 1 do 3). Zastępcze dynamiczne parametry obiektu podano w tab. 4-6.




Rys. 4.6. Czasowe charakterystyki skokowe szklarni z ogrzewaniem rurowym, z modelu analogowego:
1 - $\Delta t_w/\Delta \vartheta_r$, 2 - $\Delta t_w/\Delta t_z$, 3 - $\Delta t_w/\Delta \alpha_{zk}$, 4 - $\Delta t_w/\Delta \dot{E}_{sł}$

## 4.2. Badania przy pomocy modelu analogowego

Modelu analogowego szklarni użyto jako analizatora równań różniczkowych, opisujących dynamiczny bilans cieplny obiektu. Schemat strukturalny tego modelu (rys. 4.3 dla ORP) odpowiada schematowi strumieni cieplnych na rys. 3.1. Matematyczne ujęcie modelu charakteryzuje się następującymi właściwościami:

- Powietrze wewnętrzne i przegrody szklarni potraktowano jako elementy o parametrach skupionych.
- Grunt w szklarni potraktowano jako element o parametrach rozłożonych warstwowo, dzięki czemu można było analizować czasowe przebiegi temperatury gruntu, a także uwzględniać te przebiegi w transmitancjach obiektu.
- Rurową instalację ogrzewczą ujęto jako element o parametrach skupionych, który poza modelem uzupełnia się dodatkowym opóźnieniem transportowym dostawy ciepła. W ten sposób zastąpiono rzeczywistą transmitancję nastawczą obiektu o parametrach rozłożonych przez skupioną czasową odpowiedź $t_w$ na zmiany

średniej temperatury $\vartheta_r$ rur ogrzewczych, pozbawioną wprawdzie wpływu stałej czasowej czynnika grzejnego, ale opóźnioną o zastępcze opóźnienie transportowe $T_t$. Aproksymacja taka stwarza margines bezpieczeństwa i ułatwia rozważania nad doborem wartości parametrów konstrukcyjnych i ruchowych instalacji (rozdz. 5).

- Wpływ zakłóceń uwzględniono w taki sposób, w jaki one wpływają na obiekt, a mianowicie: wpływ promieniowania słonecznego ujawnia się w szklarni głównie poprzez ciepło absorbowane w gruncie i w oszkleniu, wpływ wiatru - przez zmianę konwekcyjnego współczynnika wnikania ciepła $\alpha_{zk}$, wpływ zachmurzenia - przez zmianę promieniowania długofalowego do atmosfery, uwzględnianego w zastępczej temperaturze powietrza zewnętrznego $t_{ze}$ [3] lub wartości $\alpha_{ze}$ (patrz rozdz. 4.1). Lineryzację równań, opisujących bilans cieplny szklarni, przeprowadzono w modelu analogicznie, jak to podano w rozdz. 4.1.

Dzięki operatywności modelu analogowego można było uzyskać wielostronne dane do charakterystyki dynamicznej obiektu. Dla trzech badanych systemów ogrzewania szklarni 9 x 51 m opracowano transmitancje nastawcze i zakłóceniowe w postaci czasowych charakterystyk skokowych w odniesieniu do temperatury powietrza ($t_w$) jako wielkości regulowanej.

Dla szklarni "poznańskiej" 8 x 50 m ponadto badano:

- transmitancje nastawcze i zakłóceniowe w odniesieniu do pozostałych dwóch wielkości wyjściowych (rys. 4.2), tj. temperatury gruntu i oszklenia, przy rozpatrywanych trzech systemach ogrzewania,
- transmitancje, w których $\vartheta_g$ i $\vartheta_s$ występowały jako zakłócenia:

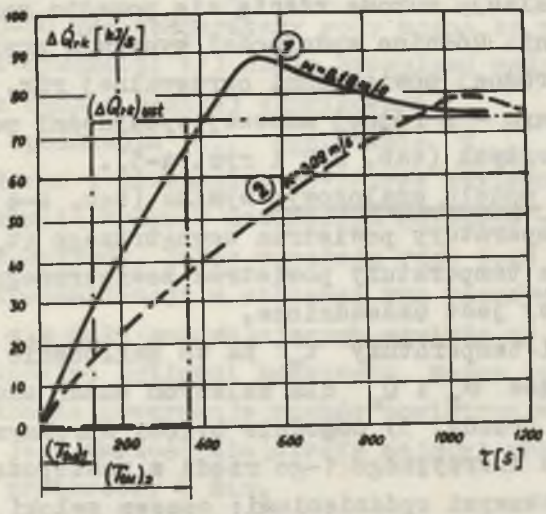
$$\Delta t_w/\Delta \vartheta_g \quad \text{i} \quad \Delta t_w/\Delta \vartheta_s$$

- transmitancję $\Delta t_w / \Delta \dot{Q}_a$ w naturalnym obiekcie, gdzie uzyskano wartości parametrów dynamicznych [45]:

$$T = 200 \text{ s}, \quad T_u + T_t = 60 \text{ s}.$$

Niektóre charakterystyki skokowe podano na rys. 4.5 i 4.6. Zastępcze parametry dynamiczne obiektu, określane na podstawie powyższych transmitancji, podano w tabelach 4-4 i 4-5.

Transmitancję nastawczą $\Delta t_w / \Delta \vartheta_r$ należy, zgodnie z założeniem badań, uzupełnić opóźnieniem transportowym dostawy ciepła. Opóźnienie to jest zależne od prędkości przepływu wody w rurach oraz od intensywności mieszania powietrza w szklarni. Zastępczą wartość ($T_{tw}$) części tego opóźnienia, związanej z przepływem wody, ustalono w sposób przedstawiony na rys. 4.7. Ilustruje on czasowy przebieg przyrostu konwekcyjnej wydajności rur ogrzewczych $\Delta \dot{Q}_{rk}(\tau)$ w badanej szklarni 9 x 51 m po wprowadzeniu skoku temperatury wody na dolocie $\Delta t_1 = 54$ deg. Zastępcze opóźnienie $T_{tw}$ uzyskano jako czas, po upływie którego rozpoczęta dostawa ciepła o wydajności $(\Delta \dot{Q}_{rk})_{ust}$, odpowiadającej potrzebom nowego stanu ustalonego, energetycznie zastą-




Rys. 4.7. Zastępcze opóźnienie transportowe $T_{tw}$ czynnika grzejnego dla transmitancji skupionej $\Delta t_w / \Delta \vartheta_r$ szklarni 9x51 m, uwzględniające skok $\Delta t_1$ temperatury wody grzejnej na wlocie do instalacji oraz prędkość przepływu tej wody

piłaby rzeczywisty przebieg rozgrzewania szklarni strumieniem $\Delta\dot{Q}_{rk}(\tau)$, przy idealnym mieszaniu powietrza w szklarni.

Przy obliczaniu $\Delta\dot{Q}_{rk}(\tau)$ wykorzystano czasowe odpowiedzi parametrów wnętrza na skok temperatury rur: $\Delta t_w/\Delta\vartheta_r$, $\Delta\vartheta_s/\Delta\vartheta_r$ i $\Delta\vartheta_g/\Delta\vartheta_r$ (tab. 4-4 i 4-5). Dla okresów $\Delta\tau$ spadki temperatury wody grzejnej w poszczególnych odcinkach rur obliczano na podstawie strat ciepła odpowiedniego "plastra" szklarni, które w stanie quasi - ustalonym równe są ciepłu oddawanemu przez rury do jej wnętrza:

$$\dot{m}\, c(\Delta t_{i1} - \Delta t_{i2}) = \Delta\dot{Q}_{ek} + \Delta\dot{Q}_v + \Delta\dot{Q}_g ,$$

gdzie $\Delta t_{i1}$, $\Delta t_{i2}$ - oznaczają przyrosty temperatury wody na początku i końcu i-tego odcinka rur.

## 4.3. Omówienie wyników badań

Wyniki badań rozdziału 4 przedstawiono w tab. 4-4 do 4-6 i na rys. 4.4 do 4.7. Dotyczą one dwóch typów szklarni bardzo zbliżonych konstrukcyjnie oraz instalacji ogrzewczych, które w obrębie poszczególnych systemów statycznie różnią się wydajnością cieplną przy podobnym rozmieszczeniu urządzeń (tab. 2-1 i 2-2). Instalacje rurowe różnią się ponadto rozmieszczeniem rur w szklarni. Różnice wydajności wynikają przy ogrzewaniu rurowym - z różnej powierzchni ogrzewalnej rur, przy ogrzewaniu powietrznym - z różnej masowej wydajności powietrza w aparatach ogrzewczych (tab. 2-2 i rys. 4-5).

Z badań w modelu analogowym wynika (tab. 4-4 i 4-5), że przyjęcie temperatury powietrza wewnętrznego ($t_w$) za wielkość regulowaną, a temperatury powietrza zewnętrznego ($t_z$) za główne zakłócenie, jest uzasadnione.

Odpowiedzi temperatury $t_w$ na to zakłócenie oraz na sygnały nastawiające $\vartheta_r$ i $\dot{Q}_a$ dla dalszych badań zamkniętego układu regulacji (rozdz. 5) dogodnie byłoby aproksymować odpowiedzią elementu inercyjnego 1-go rzędu z zastępczą stałą czasową T oraz dodatkowymi opóźnieniami: czasem zwłoki $T_u$ i transportowym $T_t$, wg wzoru:

$$\Delta t_w(\tau) = \Delta t_w(\infty) \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau - T_u - T_t}{T}\right)\right]. \quad (4.14)$$

Taka odpowiedź dość dobrze aproksymuje transmitancje przy ogrzewaniu rurowym, podane na rys. 4.6. Przy ogrzewaniu powietrznym charakter krzywej transmitancji wysoce utrudnia aproksymowanie jej nawet za pomocą kilku stałych czasowych. Natomiast odpowiedź elementu inercyjnego 1-go rzędu z czasem zwłoki pokrywa się z rzeczywistą odpowiedzią w jej części początkowej, istotnej dla badania własności obiektu. Dlatego mimo wszystko przyjęto podany sposób aproksymacji dla transmitancji uzyskanych w modelu analogowym.

Należy pamiętać, że do czasu zwłoki $T_u$, podanego w tabelach, trzeba dodać odpowiednią wartość opóźnienia $T_t$ dostawy ciepła, które zawsze występuje w ogrzewanym obiekcie. Część $T_{tw}$ tego opóźnienia (rys. 4.7) odpowiada pewnej części czasu zużywanego przez wodę na przepłynięcie poprzez rury w szklarni. Wynosi ona ok. 24% tego czasu przy prędkości wody 0,18 m/s i wzrasta do ok. 33% przy prędkościach 0,09 m/s i mniejszych. Podane prędkości wody odpowiadają w badanej szklarni spadkowi temperatury tej wody w rurach o 20 deg, względnie 40 deg w nominalnych warunkach strat ciepła. Dla stosowanych zatem w praktyce spadków 40–80 deg temperatury wody można by przyjmować wartość $T_{tw}$ w wysokości 1/3 czasu przepływu wody przez szklarnię. Wartość ta będzie poniżej skorygowana.

Drugą część opóźnienia $T_t$, opóźnienie $T_{tk}$, związane z konwekcją wokół rur i mieszaniem powietrza szklarni, praktycznie można by ustalić tylko w naturalnym obiekcie - ze względu na różnorodność wpływów, jakie wywołują ruch tego powietrza. Próby badania transmitancji w szklarni PGO Pszczyna dla ogrzewania rurowego nie dały zadowalających wyników ze względu na trudności regulacyjne kotłowni kombinatu. Można jednak przyjąć w oparciu o dokonane obserwacje ruchów powietrza w szklarni (rozdz. 3), że jego wartość dla strefy zajętej przez rośliny w szklarni nie przekroczy 1 min.

W odniesieniu do ogrzewania powietrznego udało się w naturalnym obiekcie stwierdzić, że wartość opóźnienia dostawy cie-

Tablica 4-4

Parametry dynamiczne typowej szklarni 9 x 51 m
(dane z modelu analogowego)

| Transmitancja | ORz | | | ORP | | | OP | | | Wymiar $K_s$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | T | $T_u$ | $K_s$ | T | $T_u$ | $K_s$ | T | $T_u$ | $K_s$ | |
| | s | s | | s | s | | s | s | | |
| $\Delta t_w / \Delta \vartheta_r$ | 260 | 40 | 0,25 | 310 | 40 | 0,16 | - | - | - | $\frac{deg}{deg}$ |
| $\Delta t_w / \Delta \dot{Q}_a$ | - | - | - | 300 | 40 | 0,006 | 240 | 20 | 0,002 | $\frac{deg}{J/s}$ |
| $\Delta t_w / \Delta t_z$ | 560 | 100 | 0,40 | 510 | 80 | 0,83 | 480 | 20 | 0,857 | $\frac{deg}{deg}$ |
| $\Delta t_w / \Delta \alpha_{zk}$ | 860 | 40 | 0,43 | - | - | - | 840 | 60 | 0,324 | $\frac{deg}{J/m^2 s\ deg}$ |
| $\Delta t_w / \Delta \dot{E}_{sł}$ | 1320 | 70 | 0,30x $x10^{-4}$ | - | - | - | 1200 | 100 | 0,23x $x10^{-4}$ | $\frac{deg}{J/s}$ |

Oznaczenia: T - zastępcza stała czasowa obiektu
$T_u$ - czas zwłoki (bez opóźnienia transportowego)
$K_s$ - współczynnik wzmocnienia obiektu

$$K_s = \frac{\Delta y_{max}}{\Delta x_{skok}} \quad \text{wzgl.} \quad K_s = \frac{\Delta y_{max}}{\Delta z_{skok}}$$

Parametry dynamiczne szklarni "poznańskiej" 8 x 50 m
(dane z modelu analogowego)

| Transmitancja | Ogrzewanie trad. rurowe ORt | | | Ogrzew. doświad. rurowe ϕ 40 | | | Ogrzew. doświad. rurowo-powietrz. | | | Ogrzew. doświad. powietrzne | | | Wymiar $K_s$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | T | $T_u$ | $K_s$ | T | $T_u$ | $K_s$ | T | $T_u$ | $K_s$ | T | $T_u$ | $K_s$ | |
| | s | s | | s | s | | s | s | | s | s | | |
| $\Delta t_w/\Delta \vartheta_r$ | 460 | 47 | 0,50 | 410 | 40 | 0,16 | 360 | 40 | 0,14 | - | - | - | deg/deg |
| $\Delta t_w/\Delta t_z$ | 500 | 100 | 0,33 | 740 | 110 | 0,45 | 620 | 180 | 0,31 | 480 | 160 | 0,49 | deg/deg |
| $\Delta t_w/\Delta \alpha_{zk}$ | - | - | - | 700 | 200 | 0,10 | 1280 | 160 | 0,23 | 1340 | 260 | 0,18 | deg/J/m$^2$s deg |
| $\Delta \vartheta_g/\Delta t_w$ | - | - | - | - | - | - | 960 | 60 | 0,19 | 2500 | 100 | 0,21 | deg/deg |
| $\Delta \vartheta_g/\Delta \vartheta_r$ | - | - | - | 2220 | 280 | 0,07 | 1520 | 180 | 0,07 | - | - | - | deg/deg |
| $\Delta \vartheta_g/\Delta t_z$ | - | - | - | 2200 | 920 | 0,13 | 2800 | 800 | 0,11 | 3080 | 800 | 0,18 | deg/deg |
| $\Delta \vartheta_g/\Delta \alpha_{zk}$ | - | - | - | 1840 | 1380 | 0,015 | 2340 | 900 | 0,09 | 3020 | 840 | 0,05 | deg/J/m$^2$s deg |
| $\Delta \vartheta_s/\Delta t_w$ | - | - | - | - | - | - | 210 | 0 | 0,21 | 460 | 0 | 0,38 | deg/deg |
| $\Delta \vartheta_s/\Delta \vartheta_r$ | - | - | - | 720 | 0 | 0,18 | 360 | 0 | 0,05 | - | - | - | deg/deg |
| $\Delta \vartheta_s/\Delta t_z$ | - | - | - | 460 | 0 | 0,69 | 500 | 0 | 0,65 | 600 | 0 | 0,65 | deg/deg |
| $\Delta \vartheta_s/\Delta \alpha_{zk}$ | - | - | - | 460 | 0 | 0,15 | 600 | 0 | 0,20 | 640 | 0 | 0,20 | deg/m$^2$s deg |

pła jest bardzo mała. W odległości ok. 20 m od aparatów ogrzewczych opóźnienia tego nie można było nawet wyodrębnić w dynamicznej odpowiedzi $\Delta t_w/\Delta \dot{Q}_a$. Kryło się ono w zastępczym czasie zwłoki o wartości 40 do 80 sek. [45].

Odpowiedzi temperatury oszklenia na wszystkie wymuszenia skokowe zbliżone są do odpowiedzi elementu inercyjnego pierwszego rzędu, z małą stałą czasową i bez czasu zwłoki. Natomiast temperatura gruntu na wszystkie wymuszenia skokowe reaguje, jak element składający się z szeregowo połączonych kilku członów inercyjnych, z dużą zastępczą stałą czasową i dość dużym czasem zwłoki [41].

Analiza obliczeniowa własności obiektu z ogrzewaniem rurowym pozwoliła ustalić przebieg czasowych odpowiedzi temperatury regulowanej ($t_w$) na skok temperatury wody grzejnej na wejściu do instalacji ($t_1$). Charakterystyki skokowe $\Delta t_w/\Delta t_1$ odniesione do połowy powierzchni ogrzewalnej rur ($0{,}5\ A_r$) każdego plastra (tab. 4–6) dają się również aproksymować za pomocą jednej zastępczej stałej czasowej i opóźnień, podobnie jak transmitancja $\Delta t_w/\Delta \Phi_r$, uzyskana w modelu. Dla wszystkich przekrojów szklarni stała czasowa T posiada praktycznie jednakową wartość. Jest ona większa od analogicznej stałej czasowej transmitancji z modelu, ponieważ uwzględnia pojemność cieplną rur z wodą i wywołana jest połową $A_r$.

Prędkość przepływu wody wywiera zupełnie nieznaczny wpływ na stałą T. Wyraźniej natomiast wpływa na wzmocnienie odpowiedzi w poszczególnych przekrojach obiektu przy czynnej połowie rur (tab. 4–6). Okazuje się jednak, że wzmocnienie $K_s$ plastra z czynnymi obu częściami rur jest jednakowe dla wszystkich przekrojów szklarni, ale maleje z obniżeniem prędkości wody (w).

Na rys. 4.4 przedstawiono charakterystyki skokowe dla środkowego i dwóch skrajnych przekrojów szklarni przy $w = 0{,}18$ m/s. Charakterystyki te mają przebieg aperiodyczny, z małym przeregulowaniem. Można je aproksymować za pomocą funkcji transformowanej (patrz rys. 4.1):

$$\frac{t_w(p)}{t_1(p)} = \frac{K_s'}{Tp+1}\left\{\exp\left[-T_u p - \frac{1}{w}\,\frac{T_1 r^{p+1}}{T_1}\right] + \exp\left[-T_u p - \frac{2L-l}{w}\,\frac{T_1 r^{p+1}}{T_1}\right]\right\} \qquad (4.15)$$

Parametry dynamiczne typowej szklarni 9 x 51 m
dane z obliczeń

| Transmitanoja | Ogrzewanie rurowe ORz | | | | Ogrzewanie powietrzne OP | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | T | $T_u$ | $T_{tw}$ | $K_s$ | T | $T_u$ | $K_s$ |
| | s | s | s | deg/deg | s | s | deg/deg |
| $\Delta t_w / \Delta t_1$ dla 0,5 $A_r$ | 360 | 10 | $\exp(-T_{1r}1/wT_1)$ | 0,168 $\exp(-1/wT_1)$ | - | - | - |
| $\Delta t_w / \Delta t_a$ dla: $\dot{m}_a = 8$ | - | - | - | - | 140 | 0 | 0,54 |
| $\dot{m}_a = 4$ | | | | | 200 | 5 | 0,37 |
| $\Delta t_w / \Delta t_z$ dla: 0,5 $A_r$ | 940 | 20 | - | 0,77 | - | - | - |
| $\dot{m}_a = 4$ | - | - | - | - | 630 | 15 | 0,46 |

Z równania (4.15) wynika, przy nikłym wpływie prędkości wody (w) na stałą czasową T, że zmniejszanie tej prędkości jest równoznaczne z przesuwaniem odpowiedzi wzdłuż pętli (1/w rośnie). Towarzyszy temu również zmniejszanie wzmocnienia w stosunku exp $(-1/wT_1)$. Fakt ten wskazuje, że za pomocą prędkości wody lub związanego z nią opóźnienia transportowego można wywierać decydujący wpływ na charakterystykę obiektu.

Na rys. 4.4 naniesiono również transmitancję $\Delta t_w/\Delta \vartheta_r$ (krzywa 4) z zastępczym opóźnieniem $T_{tw}$, równym 1/3 czasu przepływu wody przez szklarnię (1/3 x 560 s). Opóźnienie to zbiega się nie przypadkowo z początkiem odpowiedzi $t_w$ w środkowym przekroju szklarni (krzywa 2). Wyjaśnia to porównanie $T_{tw}$ z przesunięciem czasowym krzywej 2;

$$\frac{1}{3}\,\frac{102}{w} \sim \frac{T_{1r}}{T_1}\,\frac{25}{w}\,.$$

Dążąc do tego, żeby transmitancja $\Delta t_w/\Delta \vartheta_r$, uzyskana w modelu, była zbliżona do uśrednionej transmitancji $\Delta t_w/\Delta t_1$ dla całej szklarni, należałoby zmodyfikować ją przez powiększenie opóźnienia $T_{tw}$ do wartości około 40–50% czasu przepływu wody przez szklarnię.

Po wprowadzeniu podanych wyżej uzupełnień można stosować transmitancję $\Delta t_w/\Delta \vartheta_r$ z modelu analogowego dla badań dynamicznych własności instalacji ogrzewczej.
Transmitancje zakłóceniowe $\Delta t_w/\Delta t_z$ przy czynnej połowie rur (tab. 4–6) są jednakowe dla wszystkich przekrojów szklarni i praktycznie nie zależą od prędkości przepływu wody grzejnej.

Obliczeniowe charakterystyki szklarni przy ogrzewaniu powietrznym (rys. 4.6, krzywa 1–3) potwierdzają przebieg krzywych uzyskanych w modelu analogowym. Różnice wynikają stąd, że przyjęto w nich za wielkość nastawiającą temperaturę $(t_a)$ powietrza ogrzewającego, a nie strumień ciepła $(\dot{Q}_a)$ tego powietrza.

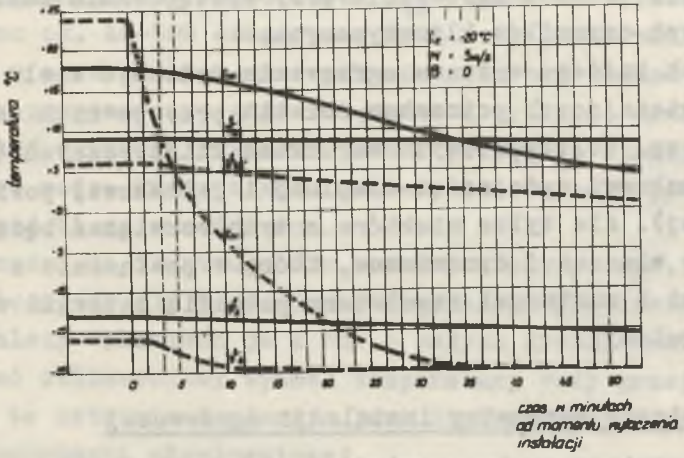
Wartość zastępczej stałej czasowej transmitancji nastawczej w pewnym stopniu informuje o podatności obiektu na regulację. Niskie wartości stałej czasowej przy ogrzewaniu powietrznym

(tab. 4-4 do 4-6) wskazują na regulacyjne zalety tego systemu, które ujawniają się również przy ogrzewaniu rurowo-powietrznym. Przy ogrzewaniach rurowych wartości T można zmniejszać przez zmniejszanie średnio rur (porównać ORt i ORz).

Korzystniejsze rozmieszczenie rur ogrzewczych z uwagi na kształtowanie pól temperaturowych poprawia również dynamiczne własności obiektu. Zmniejsza bowiem odległości transportowe dla ruchów powietrza, przyśpiesza transmitancję nastawczą (ORz w stosunku do ORt) i zwalnia transmitancje zakłóceniowe.

Powiększenie powierzchni ogrzewalnej rur - np. instalacje doświadczalne w stosunku do ORt i ORz (tab. 2-2), transmitancja $\Delta t_w/\Delta t_1$ dla połowy rur w stosunku do $\Delta t_w/\Delta \vartheta_r$ - zwiększa wzmocnienie nastawcze i osłabia wzmocnienie zakłóceniowe.

W nieco odmienny, poglądowy sposób przedstawia właściwości szklarni rys. 4.8, na którym podano przebieg jej ostygania przy




Rys. 4.8. Przebieg ostygania szklarni 9 x 51 m po wyłączeniu ogrzewania rurowego (linie ciągłe) i powietrznego (linie przerywane) przy $t_z = -20^oC$, w = 5 m/s, pogodzie bezchmurnej, w nocy

stałej temperaturze zewnętrznej. Temperatura powietrza w szklarni po wyłączeniu ogrzewania powietrznego spada od $24^oC$ do $5^oC$ w przeciągu 3 min, natomiast zapas ciepła zmagazynowany w rurach ogrzewczych takiej samej szklarni pozwala na przeciągnięcie ostygania do ok. 50 minut.

Nie należy zatem identyfikować wniosków odnośnie do właściwości regulacyjnych szklarni przy różnych systemach ogrzewania z zaleceniami co do wyboru systemu ogrzewania. Taki wybór bowiem powinien uwzględnić, oprócz właściwości regulacyjnych, także i inne względy, m.i. nasuwającą się z rys. 4.8 potrzebę pozostawienia pewnej pojemności cieplnej w instalacji ogrzewczej w celu zabezpieczenia się przed krótkotrwałymi skutkami awarii w dostawie energii elektrycznej do pomp i wentylatorów.

## 5. REGULACYJNOŚĆ INSTALACJI OGRZEWCZEJ SZKLARNI

W układzie regulacji temperatury istnieje ścisła współzależność dynamicznych własności jego elementów, w naszym przypadku: budynku szklarni, jej instalacji ogrzewczej i regulatora. Własności te bowiem łącznie składają się na jakość przebiegu regulacji procesu ogrzewania przy występowaniu zakłóceń od zewnętrznych czynników klimatycznych.

W ramach każdego systemu ogrzewania może być wiele rozwiązań, odpowiadających potrzebom obiektu przy pewnych ustabilizowanych, np. obliczeniowych warunkach klimatycznych (instalacje o jednakowej wydajności cieplnej i jednakowej powierzchni ogrzewalnej). Ale tylko niektóre z tych rozwiązań będą posiadały takie własności dynamiczne, które w powiązaniu z odpowiednimi typami i nastawami regulatora potrafią zapewnić wymaganą jakość regulacji.

### 5.1. Dynamiczne parametry instalacji ogrzewczej

Wpływ rozmieszczenia urządzeń ogrzewczych i ich wydajności na charakterystykę dynamiczną szklarni został omówiony w rozdz. 4.3. Jednakże zarówno sposób rozmieszczenia, jak i nominalna wydajność tych urządzeń wynika ze statycznej charakterystyki obiektu. Stąd możliwości ich zmieniania ze względu na regulacyjność obiektu - są niewielkie, a także celowość takich zmian byłaby problematyczna. Należy natomiast zwrócić uwagę na te konstrukcyjne i ruchowe parametry instalacji, które wpływają na osiągalną prędkość zmiany jej wydajności cieplnej.

Do parametrów takich należą:

a) czas transportowego opóźnienia dostawy ciepła,

b) spadek temperatury czynnika grzejnego w obrębie szklarni,

c) stosunek powierzchni ogrzewalnej rur ogrzewczych do ich pojemności wodnej,

d) pojemność cieplna instalacji.

Poniżej analizuje się te parametry dla rozpatrywanych trzech systemów ogrzewania szklarni.

W ogrzewaniach wodnych rurowych, z regulacją jakościową, krąży stała ilość wody grzejnej, a wydajność cieplna instalacji zależy od temperatury tej wody. Osiągalna prędkość zmian wydajności instalacji zależy zatem od czasu, jaki przepływająca woda, po zmianie swojej temperatury na wejściu, zużywa na wywołanie nowego rozkładu temperatury rur. Związane z tym zastępcze opóźnienie transportowe $T_{tw}$ omówiono w rozdz. 4.3. Wynosi ono ok. 40–50% czasu przepływu wody przez szklarnię. Czas ten w ogrzewaniach rurowych nie może być jednak całkiem swobodnie przyjmowany, gdyż natężenie i prędkość przepływu wody grzejnej w rurach związana jest z przyjętym spadkiem temperatury tej wody, który z kolei zależy od stosunku powierzchni ogrzewalnej do pojemności rur.

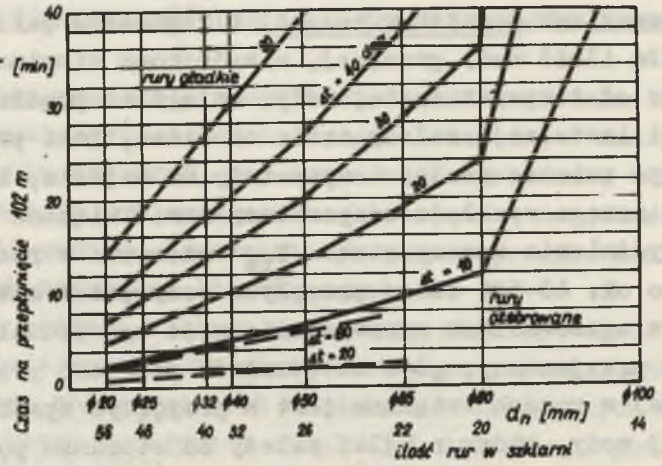
Zależności te ilustruje dla badanej szklarni rys. 5.1. Wynika z niego, że dla poprawienia regulacyjności instalacji rurowych należy wykonywać je z rur o małych średnicach i należy ograniczać obliczeniowy spadek temperatury wody grzejnej – pomimo, że ta ostatnia tendencja jest niekorzystna z punktu widzenia gospodarki ciepłowniczej.

W ogrzewaniach powietrznych szklarni za pomocą indywidualnych aparatów ogrzewczych mamy do czynienia z dwoma czynnikami grzejnymi, a to:

- z powietrzem samej szklarni
- z gorącą wodą dostarczającą ciepło od źródła do nagrzewnic w aparatach.

Regulacja dostawy ciepła loco szklarnia odbywa się dzięki temu dwustopniowo, następująco:

- regulacja temperatury nawiewnego powietrza przez centralną regulację temperatury wody grzejnej (regulacja jakościowa), jako pierwszy stopień,
- regulacja dostawy ciepła do szklarni przez sporadyczne uruchamianie silników w aparatach ogrzewczych (regulacja ilościowa), jako drugi stopień.




Rys. 5.1. Czas przepływu wody o średniej temperaturze 100°C przez rury ogrzewczę szklarni 9 x 51 m ($\dot{Q}_T$ = 300 kW), przy różnych spadkach temperatury tej wody

Własności dynamiczne dostawy ciepła przez aparaty ogrzewcze reprezentują parametry, wymienione poprzednio w punktach a, b, i d. Opóźnienie transportowe (punkt a) należy rozumieć jako czas wymieszania się powietrza w zasięgu działania każdego aparatu, po uruchomieniu wentylatora. Czas ten jest niewielki i zależy od prędkości wypływu powietrza i wydajności wentylatora (rozdz. 4.3).

Spadek temperatury powietrza w szklarni (punkt b) związany jest z wydatkiem wentylatora. Stąd minimalna wielokrotność mieszania powietrza w szklarni ogranicza od góry temperaturę nawiewu. Temperaturę tę ogranicza również wrażliwość roślin.

Pojemność cieplna instalacji (punkt d) odpowiada pojemności cieplnej powietrza znajdującego się w szklarni. Pojemność ta jest zupełnie mała.

Dostawa ciepła przez aparaty ogrzewcze odznacza się zatem dużą elastycznością. Dzięki temu wymagania co do dynamicznych własności wodnej części instalacji ogrzewania powietrznego (dostawa ciepła do aparatów) są znacznie łagodniejsze w porównaniu z ogrzewaniem rurowym. Podobne złagodzenie wymagań dotyczy również rurowej części instalacji w ogrzewaniu rurowo-powietrznym.

Z powyższych rozważań wynika, że przy jakościowej regulacji opóźnienie transportowe dostawy ciepła najlepiej reprezentuje własności regulacyjne instalacji ogrzewczej w szklarni. W ogrzewaniach powietrznych opóźnienie to można łatwo utrzymać w zakresie niewielkich wartości. Dlatego nie odczuwa się tam trudności regulacyjnych. Natomiast w ogrzewaniach rurowych jego wartość wyraźnie wpływa na rozwiązanie instalacji i zachodzi potrzeba wyznaczenia dopuszczalnego zakresu takich opóźnień z uwagi na regulacyjność układu.

## 5.2. Przebieg i jakość regulacji temperatury w szklarni

Jako kryterium jakości regulacji temperatury w szklarni przyjęto wartości jej odchyleń dynamicznych oraz czas ich występowania. Oczywiście, jakość będzie tym lepsza, im mniejsze będą wartości tych wielkości. Dopuszczalne granice powinny być określone przez fizjologów roślin z uwagi na dobro upraw szklarniowych i charakter obiektu. W rozdz. 5.3 granice te określono orientacyjnie, w oparciu o wypowiedzi ogrodników.

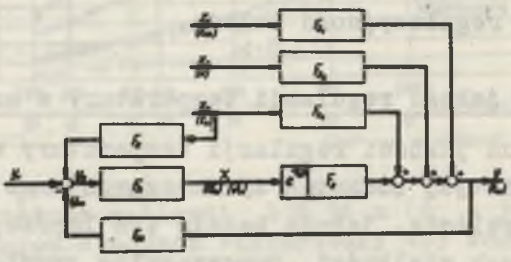
Przebiegi regulacji przy podanych trzech systemach ogrzewania badano w zamkniętym układzie regulacji temperatury (rys. 5.2) z uwzględnieniem transmitancji, omówionych w rozdz. 4. Badania te przeprowadzono w powiązaniu z określonym typem i nastawą regulatora [29]. Rozpoczęto je od najprostszych regulatorów: 2-położeniowych i proporcjonalnych [43]. Pominięto bardziej złożone układy, ponieważ przy czystym proporcjonalnym działaniu regulatora można stosunkowo łatwo otrzymać wartości nastaw zbliżone do optymalnych [29]. Ponadto informacje uzy-

skane przy regulacji proporcjonalnej mogą być wykorzystywane również dla bardziej złożonych regulatorów.

Obserwacje dla regulatora 2-położeniowego przeprowadzono za pomocą hydraulicznego modelu analogowego [45]. Zachowanie się układu z regulatorem proporcjonalnym i proporcjonalnym z przystawką do kompensacji głównego zakłócenia badano przy użyciu elektronowych maszyn analogowych AM-2 i ZA-0. Schemat blokowy badanego układu podaje rys. 5.2. Transmitancję $F_s$ zastępowano parametrami dynamicznymi z tab. 4-3.

Podane wyżej typy regulatorów charakteryzują się następującymi własnościami regulacyjnymi:

Regulator dwupołożeniowy wywołuje stałe oscylacje wielkości regulowanej wokół jej wartości zadanej. Oscylacje te są zależne od całkowitych opóźnień w układzie regulacji, od strefy nieczułości regulatora oraz od gwałtowności i częstotliwości występujących zakłóceń.



Rys. 5.2. Schemat blokowy zamkniętego układu regulacji temperatury ogrzewanej szklarni

Regulator proporcjonalny wywołuje trwałe uchyby statystyczne wielkości regulowanej, które zależą od nastawionego wzmocnienia regulatora $K_R$ i bezwzględnych zmian wartości zakłóceń, przy czym ich częstotliwość jest obojętna.

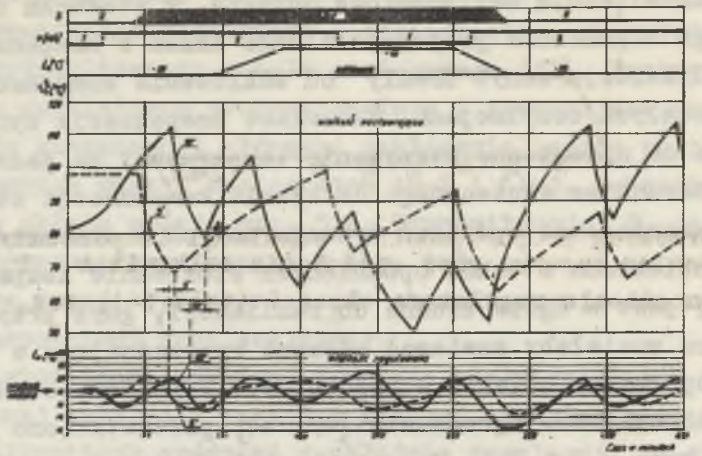
Kompensacja zakłóceń przy regulacji proporcjonalnej pozwala na przyśpieszenie reakcji regulatora i zlikwidowanie uchybu statycznego, spowodowanego głównym zakłóceniem. Kompensacja zakłóceń (element $F_k$ rys. 5.2) może być statyczna, przekazująca regulatorowi sygnał proporcjonalny do wartości zakłóce-

nia lub dynamiczna, jeżeli przekazywać będzie sygnał, uwzględniający transmitancję zakłóceniową obiektu. W stosunku do działania samego regulatora proporcjonalnego układ z kompensacją statyczną likwiduje uchyb trwały od zakłócenia kompensowanego, po krótkotrwałych oscylacjach. Natomiast kompensacja dynamiczna pozwala na niezmienne utrzymanie temperatury na zadanej wartości. Warunkiem skutecznego działania kompensacji statycznej jest ograniczenie opóźnień transportowych w obiekcie. Natomiast w obiektach z takim opóźnieniem stosowanie kompensacji dynamicznej jest w ogóle trudne do realizacji, gdyż przystawka kompensująca musiałaby zawierać element wyprzedzający w czasie.

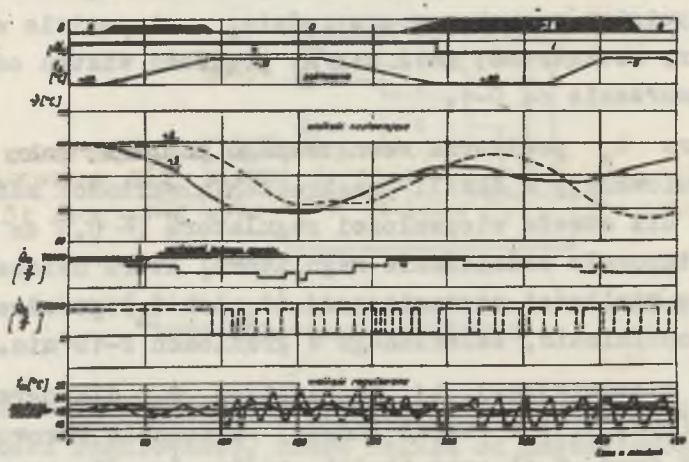
Efekt współpracy obiektu z regulatorem 2-położeniowym dla wymienionych systemów ogrzewania [43, 44] przedstawiono przykładowo na rys. 5.3 i 5.4. Na rysunkach tych przedstawiono przebiegi trzech grup parametrów:

- Zewnętrznych czynników klimatycznych jako zakłóceń, które wprowadzano do układu wg programu odpowiadającego maksymalnym rzeczywistym warunkom w przyrodzie, a mianowicie skoki temperatury zewnętrznej 6–12 deg/h, prędkość wiatru od 1–5 m/s, zachmurzenie od 0–1.
- Temperatury $t_w$ powietrza wewnętrznego szklarni jako wielkości regulowanej; w chwili przekroczenia wartości zadanej o więcej, niż strefa nieczułości regulatora ($\pm$ 0,5 do 1,0 deg), następowało zadziałanie regulatora, które uwidocznia się zmianą wielkości nastawiającej ($\vartheta_r$ lub $\dot{Q}_a$) po okresie czystego opóźnienia, zmienianego w granicach 2–10 min.
- Wielkości nastawiającej, tj. temperatury $\vartheta_r$ dla ogrzewania rurowego (rys. 5.3) i części rurowej ogrzewania rurowo-powietrznego (rys. 5.4) oraz ilości ciepła $\dot{Q}_a$ dla ogrzewania powietrznego (rys. 5.4).

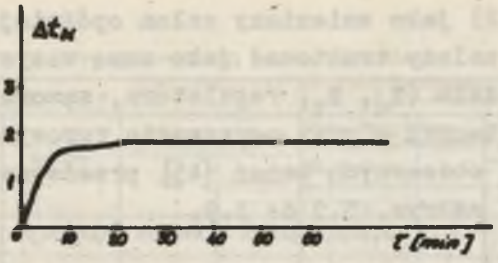
W przypadku regulacji proporcjonalnej, oprócz obserwacji jej przebiegu w zakresie omówionym powyżej dla regulacji 2-położeniowej, badano również stabilność zamkniętego układu przy różnych wzmocnieniach regulatora i różnych wartościach czystego opóźnienia $T_o$ w obiekcie. Wartości $T_o$ zmieniano w granicach 2 do 15 minut i wprowadzano do transmitancji obiektu



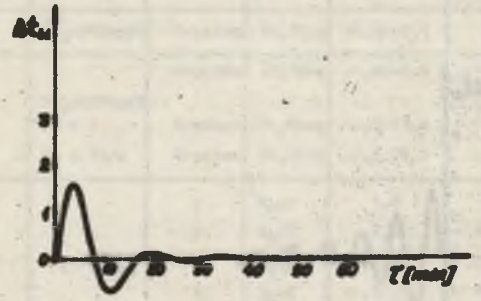
Rys. 5.3. Przebieg 2-położeniowej regulacji temperatury powietrza w badanej szklarni przy ogrzewaniu rurowym z 5- i 10-minutowym opóźnieniem transportowym



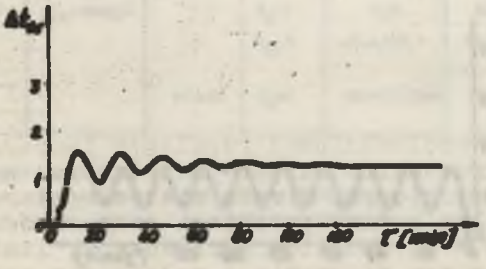
Rys. 5.4. Przebieg 2-położeniowej regulacji temperatury powietrza w szklarni z ogrzewaniem rurowo-powietrznym, przy 2-minutowym opóźnieniu transportowym. Strefa nieczułości regulatora ± 0,5 deg. Linią pełną podano przebiegi przy sukcesywnym uruchamianiu po jednym z 4 aparatów ogrzewczych, linią przerywaną - przy grupowym włączaniu i wyłączaniu aparatów



Rys. 5.5. Przebieg proporcjonalnej regulacji temperatury szklarni z ogrzewaniem rurowym przy opóźnieniu całkowitym $T_o$ = 5,5 min i wzmocnieniu regulatora $K_R$ = 1 (tab. 5-1, poz. 12)



Rys. 5.6. Przebieg proporcjonalnej regulacji temperatury szklarni, z kompensacją statyczną zakłócenia $\Delta t_z$, dla ogrzewania rurowego przy $T_o$ = 5,5 min, $K_R$ = 1 (tab. 5-1, poz. 16)

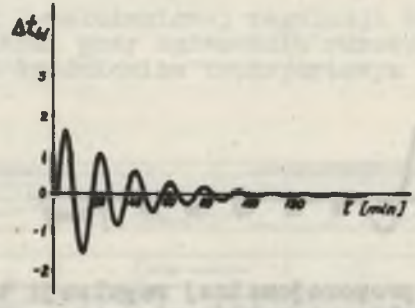


Rys. 5.7. Przebieg proporcjonalnej regulacji temperatury szklarni z ogrzewaniem rurowym przy $T_o$ = 5,5 min, $K_R$ = 3. Pojawiają się oscylacje (tab. 5-1, poz. 14)

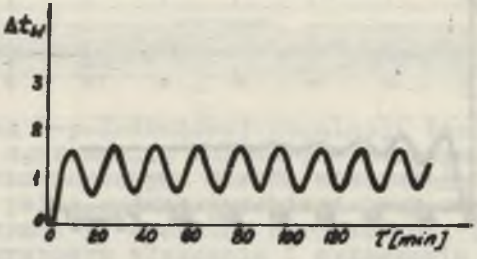
($F_s$ na rys. 5.2) jako zmieniany człon opóźniający $e^{-T_c p}$. Opóźnienie to należy traktować jako sumę wszystkich czystych opóźnień w układzie ($T_u$, $T_t$, regulatora, zaworu itp.), wśród których $T_{tw}$ stanowi - przy ogrzewaniu rurowym - największą pozycję. Wyniki obszernych badań [45] przedstawiono wycinkowo w tab. 5-1 i na rys. 5.3 do 5.9.

## 5.3. Omówienie wyników badań

Przy regulacji 2-położeniowej ogrzewania rurowego przeregulowania temperatury $t_w$ zależą wyraźnie od wartości czystego opóźnienia w układzie. W instalacji ORz (wg tab. 2.1), przy opóźnieniach 5-10 min, regulator taki wywołuje oscylacje $t_w$




Rys. 5.8. Przebieg proporcjonalnej regulacji temperatury szklarni z kompensacją statyczną zakłócenia $\Delta t_z$, dla ogrzewania rurowego przy $T_c$= 5,5 min, $K_R$ = 3 (tab. 5-1, poz. 17)




Rys. 5.9. Przebieg proporcjonalnej regulacji temperatury szklarni z ogrzewaniem rurowym przy $T_c$ = 5,5 min, $K_R$ = 4. Granica stabilności

Przebieg regulacji temperatury szklarni

| Poz. | Program | | | | | Jakość regulacji | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | System ogrzewania | Opóźnienie układu regulacji min | Zakłócenie | Regulator typ | Regulator nastawa | Maks. odchyl. wielk. regul. $\Delta t_w$ maks | Czas regul. | Czas występ. odchyl. $\Delta t_w$ większego niż 1 deg | Czas występ. odchyl. $\Delta t_w$ większego niż 2 deg | Liczba oscylacji |
| | | | | | | deg | min | min | min | |
| 1 | | 2 | $\Delta t_z$=12deg/h | 2-położ. | ± 0,5deg | +1,2/-2,0 | - | 5/5 | 0/2 | trwałe |
| 2 | | | | p | $K_R$=1 | 7,2 | 130 | Trwałe odchyl. | | - |
| 3 | | | | p | $K_R$=4 | 3,6 | 60 | Trwałe odchyl. | | - |
| 4 | OP | 2 | $\Delta t_z$=12deg/h ΔB = 1 | p | $K_R$=10 | 1,7 | 30 | Trwałe odchyl. | | - |
| 5 | | | Δw = 4m/s | p.k.s. | $K_R$=1 | 2,7 | 60 | 11,5 | 5 | - |
| 6 | | | | p.k.s. | $K_R$=4 | 1,7 | 90 | 5 | 0 | - |
| 7 | | | | p.k.d. | $K_R$=1 | 0 | 0 | 0 | 0 | - |
| 8 | ORP | 2 | $\Delta t_z$=12deg/h | 2-położ. | ±0,5deg | +0,8/-0,8 | - | - | - | trwałe |
| 9 | | 5 | | 2-położ | ±0,5deg | +1,4/-2,4 | - | 11/27 | 0/12,5 | trwałe |
| 10 | | 5 | $\Delta t_z$=12deg/h ΔB = 1 | 2-położ. | ±1,0deg | +2,8/-3,8 | - | 25/40 | 15/25 | trwałe |
| 11 | | 10 | Δw = 4m/s | 2-położ. | ±1,0deg | +3,8/-6,0 | - | 30/65 | 22/55 | trwałe |
| 12 | | | | p | $K_R$=1 | 1,8 | 9 | trwałe | - | - |
| 13 | | | | p | $K_R$=2 | 1,4 | 50 | trwałe | - | 2 |
| 14 | | 5,5 | $\Delta t_z$=6deg/h | p | $K_R$=3 | 1,2 | 80 | trwałe | - | 6 |
| 15 | | | | p | $K_R$=4 | +1,7/+0,8 | ∞ | oscylacje wokół $\Delta t_w$ = +1,1 deg | | trwałe |
| 16 | | 5,5 | $\Delta t_z$=6deg/h | p.k.s. | $K_R$=1 | +1,5/-0,7 | 25 | 4/0 | 0/0 | 1 |
| 17 | ORz | | | p.k.s. | $K_R$=3 | +1,7/-1,7 | 120 | 5/5 | 0/0 | 8 |
| 18 | | | | p | $K_R$=1 | 1,8 | 14 | trwałe | - | - |
| 19 | | 9,0 | $\Delta t_z$=6deg/h | p | $K_R$=3 | 1,3 | 130 | trwałe | - | 6 |
| 20 | | | | p | $K_R$=4 | +2,0/+0,5 | ∞ | oscylacje | | trwałe |
| 21 | | 9,0 | $\Delta t_z$=6deg/h | p.k.s. | $K_R$=1 | +1,9/-0,8 | 50 | 6/0 | - | 2 |
| 22 | | 15,0 | $\Delta t_z$=6deg/h | p | $K_R$=1 | 1,9 | 90 | trwałe | - | 1 |
| 23 | | | | p | $K_R$=3 | +2,4/+0,7 | 220 | trwałe odchyl. zanikaj. oscylacje | | 6 |
| 24 | | | | p.k.s. | $K_R$=5 | narastające | ∞ | narastające oscylacje | | trwałe |

Oznaczenia: p - proporcjonalny
p.k.s. - proporcjonalny z kompensacją statyczną
p.k.d. - proporcjonalny z kompensacją dynamiczną

z amplitudą 6–10 deg (rys. 5.3). Byłoby to nied uszczalne w normalnej eksploatacji szklarni. Dla instalacji tradycyjnej (ORt) z rurami ϕ 80 do 100 mm, przy aktualnym tam zastępczym opóźnieniu transportowym $T_{tw}$ = 25 min, wahania temperatury $t_w$ nawet przekraczały 16 deg [45].

Przy ogrzewaniu powietrznym wyraźnie poprawia się jakość regulacji po zastosowaniu podziału potrzebnej wydajności ogrzewania na kilka zespołów ogrzewczych w jednej szklarni. Na rys. 5.4 widać, że przy równoczesnym włączaniu lub wyłączaniu wszystkich aparatów ogrzewczych wahania temperatury wynosiły ± 3 deg, przy ciągłych oscylacjach. Natomiast przy sukcesywnym uruchamianiu poszczególnych aparatów wahania te zamykają się w granicach ± 0,8 deg, i to przy strefie nieczułości regulatora ± 0,5 deg. Wynik taki można uznać za zadowalający, jeżeli weźmie się pod uwagę, że nierównomierność temperatury powietrza w szklarni, związana z jego rozpływem i działaniem chłodnego oszklenia wynosi 1–3 deg (patrz rozdz. 3.3). Strefy nieczułości regulatora nie należy jednak zwiększać powyżej ± 0,5 deg.

Ogrzewanie rurowo-powietrzne pod względem podatności na regulację zachowuje się tak, jak ogrzewanie powietrzne, dzięki możliwości przerzucenia kłopotliwych chwilowych wahań obciążenia cieplnego na część powietrzną ogrzewania. Natomiast dla części rurowej pozostawione są sezonowe, duże i powoli zmieniające się obciążenia. W związku z tym część rurowa może być regulowana nawet centralnie dla całego kombinatu, w źródle ciepła.

Regulator dwupołożeniowy nadaje się więc dobrze dla ogrzewań powietrznych i rurowo-powietrznych. W instalacjach rurowych wywołuje on zbyt długie okresy znaczniejszych przeregulowań temperatury. Zmniejszenie tam opóźnień poniżej 3–4 minuty wpłynęłoby korzystnie na jakość regulacji. Ale warunek ten jest trudny do spełnienia w rzeczywistym obiekcie ze względu na jego rozległość oraz kłopotliwą konieczność zastosowania bardzo cienkich rur i małych spadków temperatury wody grzejnej (rys. 5.1).

Przy regulacji proporcjonalnej większe wzmocnienia $K_R$ regulatora wywołują mniejsze odchylenia trwałe wielkości regulowanej $t_w$. Towarzyszy temu jednak wydłużanie się czasu regu-

lacji i wzrost liczby oscylacji (tab. 5-1 i przykładowo rys. 5.5 do 5.9).

Dla przyjętych parametrów dynamicznych obiektu granica stabilności układu przy ogrzewaniu rurowym występuje przy wzmocnieniu regulatora $K_R$ = ok. 4 (rys. 5.9). Dla opóźnień dłuższych niż 6 min. układ osiągał ją już przy mniejszych wartościach $K_R$. Przy ogrzewaniu powietrznym można zwiększać $K_R$ w szerokich granicach (od 1-8) nie naruszając stabilności regulacji.

Statyczna kompensacja wpływu temperatury zewnętrznej jako głównego zakłócenia (rys. 5.6) usuwa trwałe uchyby temperatury wewnętrznej, jednak przy równoczesnym wydłużeniu czasu regulacji i wzrastaniu amplitudy przeregulowań. W układach ogrzewania rurowego z opóźnieniami ponad 10 min., dla wszystkich branych pod uwagę wzmocnień $K_R$ regulatora, współpracującego z przystawką kompensacyjną, czas stabilizacji wydłuża się nadmiernie, przy bardzo wolno zanikającej, dużej amplitudzie wielkości regulowanej (tab. 5-1).

Za górną granicę wartości opóźnień, przy której przeregulowania nie przekraczają 1,5-2 deg w ciągu 20-10 minut, należy przyjąć 7-8 minut. W rozdziale 4.3 ustalono, że zastępcze opóźnienie transportowe czynnika grzejnego wynosi ok. 40-50% czasu jego przepływu przez rury szklarni. Stąd, przykładowo, dla zapewnienia odpowiedniej regulacyjności badanej instalacji rurowej należałoby przyjąć taką prędkość przepływu w niej wody, aby przebywała ona wewnątrz szklarni nie dłużej, niż 16 do 20 minut. Takim wymaganiom wg rys. 5.1 odpowiadają rury o średnicy 40 mm przy spadku temperatury wody o 40 deg.

W układach ogrzewania powietrznego występują z zasady małe opóźnienia i przebieg regulacji jest znacznie korzystniejszy. Można tam nawet zastosować kompensację dynamiczną głównego zakłócenia ($\Delta t_z$), przy której przeregulowanie eliminuje się zupełnie (tab. 5-1 poz. 7).

## 6. WNIOSKI

1. Przeprowadzone badania w zakresie ogrzewania szklarni pozwalają na przyjęcie:

   - sposobu rozmieszczenia urządzeń ogrzewczych w szklarni i doboru ich parametrów dla przestrzennego kształtowania warunków cieplnych wnętrza odpowiednio do ekologicznych i energetycznych wymagań;

   - zakresu dynamicznych własności instalacji ogrzewczej, potrzebnych dla jej skonstruowania tak, aby mogła skutecznie oddziaływać na obiekt w procesie regulacji ogrzewania.

   Dla uzyskania potrzebnych danych rozwiązano bilans cieplny ogrzewanej szklarni łącznie z określeniem warunków konwekcyjnej wymiany ciepła oraz ustalono dynamiczne własności szklarni jako obiektu regulacji temperatury.
   Można zatem uważać, że dla rozważanego typu lekkiego obiektu ustalono podstawy dla doboru własności instalacji ogrzewczej, przy stosowaniu jakościowej regulacji dostawy ciepła za pośrednictwem wody. Szczegółowe dane i wytyczne dla konstrukcji instalacji ogrzewczych nie są omawiane w niniejszej pracy.

2. Warunki cieplne wnętrza szklarni, związane z właściwościami badanych systemów ogrzewania, można ogólnie scharakteryzować następująco:

   2.1. Za pomocą ogrzewania rurowego można zapewnić dogodne ogrzanie roślin i powietrza w szklarni. Najbardziej korzystne warunki uzyskuje się przy umieszczeniu rur tuż nad ziemią.

   2.2. Przy ogrzewaniu powietrznym stopień równomierności ogrzania wnętrza jest wyraźnie związany z prędkością ruchów powietrza w całej szklarni; w przypadku roślin nie znoszących takiego ruchu rozwiązanie ogrzewania powietrznego jest utrudnione. Należy liczyć się z możliwością wymrożenia szklarni przy nawet krótkotrwałych przerwach w dostawie ciepła.

2.3. Przy ogrzewaniu rurowo-powietrznym można osiągnąć bardzo wyrównany rozkład temperatury powietrza i dobre ogrzanie strefy przygruntowej.

2.4. We wszystkich wymienionych systemach ogrzewania powierzchniowa warstwa gruntu nie osiąga temperatur, uważanych za optymalne dla upraw szklarniowych. Występujące różnice wynoszą przy ogrzewaniu rurowym zwykle kilka stopni, natomiast przy ogrzewaniu powietrznym są duże większe. Właściwe ogrzanie gruntu w szklarni wymaga instalacji odrębnej, zatopionej w jego masywie.

2.5. Przy ogrzewaniu rurami przy ziemi i ciepłym powietrzem nie występują wyraźne różnice w wysokości strat ciepła szklarni. Natomiast umieszczenie rur ogrzewczych pod dachem zwiększa straty o ok. 20%.

3. Przy konstruowaniu instalacji ogrzewczej dla szklarni należy zwracać szczególną uwagę na własności regulacyjne tej instalacji. Pod tym względem badane systemy ogrzewania można następująco scharakteryzować:

3.1. W przypadku ogrzewania rurowego wymagane własności regulacyjne instalacji wyraźnie zawężają zakres wartości jej parametrów konstrukcyjnych i ruchowych, jakie można by przyjąć na podstawie tradycyjnych zasad projektowania, a także mogą wpływać na rozwiązania układu ciepłowniczego dla całego kombinatu. Ograniczenia te wynikają z konieczności zminimalizowania opóźnień transportowych w całym układzie regulacji.

3.2. Konieczność ograniczenia opóźnień transportowych pociąga za sobą potrzebę:

- przyspieszenia obiegu wody grzejnej przez zmniejszenie średnic rur ogrzewczych i ewentualne stosowanie rur ożebrowanych oraz przez ograniczenie nominalnego spadku temperatury wody;
- zbliżenia miejsca regulacji temperatury wody grzejnej bezpośrednio do nawy szklarniowej, a więc stosowania np. dwustopniowej regulacji wraz z wynikają-

oymi stąd konsekwencjami co do ciepłowniczego układu kombinatu.

3.3. Ogrzewanie powietrzne szklarni posiada przy wszystkich stosowanych rozwiązaniach dobre własności regulacyjne i może być regulowane nawet za pomocą prostych regulatorów 2-położeniowych. Wymaga natomiast pieczołowitego opracowania konstrukcji aparatów ogrzewczych z uwagi na rozdział i prowadzenie powietrza wewnątrz szklarni.

4. Dynamiczne własności szklarni określonego typu jako obiektu regulacji temperatury zależą od rozdziału strumieni ciepła w jej wnętrzu, a więc od systemu i rozwiązania instalacji ogrzewczej oraz od wydajności zainstalowanych urządzeń.

5. Wnioski w zakresie metodyki badań:

5.1. Przy badaniach bilansu cieplnego i warunków cieplnych rzeczywistego obiektu wielu wartościowych informacji mogą dostarczyć obserwacje ruchów powietrza, prowadzone równolegle z pomiarami energetycznymi.

5.2. W fizykalnych modelach szklarni udaje się dogodnie prowadzić cieplne i aerodynamiczne badania ogrzewania powietrznego. Natomiast modelowanie ogrzewania rurowego jest trudne do zrealizowania.

5.3. Dla określenia regulacyjnych własności instalacji ogrzewczej można wyznaczać własności dynamiczne szklarni, traktując ją jako obiekt o parametrach skupionych. Do uzyskanej w ten sposób transmitancji nastawczej należy dodatkowo wprowadzić zastępcze opóźnienie transportowe.

5.4. Traktowanie szklarni jako obiektu o parametrach skupionych umożliwia wykorzystanie modeli analogowych do badania jej własności dynamicznych. Modele takie okazały się dużo operatywniejszym i tańszym środkiem badawczym od analiz obliczeniowych, wymagających użycia wydajnej maszyny cyfrowej.

Praca wpłynęła do Redakcji 17.XII.1968 r.

## OZNACZENIA WIELKOŚCI I JEDNOSTEK MIAR

| | | |
|---|---|---|
| A | Pole powierzchni (w rozdz. 4.1.1 $m^2/m$ szklarni) | $m^2$ |
| B | Stopień zachmurzenia w skali 0 do 1 | |
| c | Ciepło właściwe | J/kg deg |
| C | Stała w równ. 4.6 i 4.7 | |
| $\dot{E}_g$, $\dot{E}_s$ | Strumień energii słonecznej absorbowanej w gruncie, oszkleniu szklarni | J/s |
| F | Transmitancja | |
| G | Transmitancja w postaci operatorowej funkcji przestępnej | |
| H | Transmitancja w postaci operatora wymiernego | |
| K | Stała w równaniach transmitancji (w rozdz. 4.1.1 J/m s deg) | J/s deg |
| K | Wzmocnienie | |
| L | Długość całkowita szklarni | m |
| l | Współrzędna bieżąca długości | m |
| m | Masa (w rozdz. 4.1.1 - kg/m szklarni) | kg |
| $\dot{m}$ | Strumień materii (masy) | kg/s |
| OR, OP | Systemy ogrzewania wg tab. 2-1 | |
| p | Operator różniczkowy Laplace'a | |
| $\dot{Q}$ | Strumień ciepła (w rozdz. 4.1.1 - J/s m) | J/s |
| $\dot{q}$ | Jednostkowe zagęszczenie strumienia ciepła | $J/m^2s$ deg |
| R | Opór cieplny | $m^2s$ deg/J |
| T | Stała czasowa | s |
| $T_c$,$T_t$,$T_u$ | Opóźnienie czyste całkowite, transportowe, czas zwłoki | s |

| | | |
|---|---|---|
| $T_{tw}$, $T_{tk}$ | Zastępcze opóźnienie transportowe związane z: przepływem czynnika grzejnego, konwekoją i mieszaniem | s |
| S | Skala modelu | |
| t | Temperatura płynu (wody, powietrza) | $^oC$ |
| W | Pojemność ciepła | J/deg |
| w | Prędkość | m/s |
| x | Wielkość nastawiająca | |
| y | Wielkość regulowana | |
| z | Zakłóoenie | |
| $\alpha$ | Współczynnik wnikania ciepła | $J/m^2s$ deg |
| $\vartheta$ | Temperatura materiału przegrody | $^oC$ |
| $\lambda$ | Współczynnik przewodzenia ciepła | J/m s deg |
| $\varrho$ | Gęstość | $kg/m^3$ |
| $\varphi_{ik}$ | Stosunek opromieniowania | |
| $\tau$ | Czas | s |

## I n d e k s y

- <u>odnoszące się do czynników</u>:

| | |
|---|---|
| a | aparat ogrzewczy |
| g | grunt w szklarni |
| m | murowany cokół szklarni |
| r | rury ogrzewcze |
| s | oszklenie |
| w, z | powietrze: wewnątrz, zewnątrz szklarni |
| - | woda grzejna (bez indeksu oznaczającego czynnik) |

- <u>odnoszące się do przekazywania energii</u>

| | |
|---|---|
| ke | konwekoja i promieniowanie do atmosfery |
| gk,rk,sk | konwekoja na powierzchni: gruntu, rur, oszklenia |

gp, sp — parowanie (kondensacja) na powierzchni: gruntu, oszklenia

gs — promieniowanie między powierzchnią gruntu i oszklenia

rg, rs — promieniowanie między powierzchnią rur i powierzchnią: gruntu, oszklenia

v — infiltracja powietrza

ze, zk — promieniowanie, konwekcja z zewnętrznej powierzchni oszklenia

- odnoszące się do transmitancji (wg. rys. 5.2)

k — przystawki kompensującej zakłócenia

m — członu pomiarowego

R — regulatora

s — obiektu regulacji

z — zakłócenia: z1 - energia słoneczna, z2 - wiatr, z3 - temp. zewn.

## LITERATURA

- do rozdziału 1


[1] Hiller F.: Wärmehaushalt und Klimafaktoren des Gewächshauses. Praca doktorska. H.L.H. 1967.

[2] Renard: Wärmebedarf von Gewächshäusern. H.L.H. 1962, Nr 4, s. 101/5.

[3] Mierzwiński S.: Warunki ogrzewania szklarni ustalone na podstawie badań typowego obiektu. Praca doktorska. Politechnika Śląska Gliwice 1963 r.

[4] Chlipalski T., Mierzwiński S.: Badania w zakresie ogrzewania i wentylacji oraz optymalnego mikroklimatu dla uprawy roślin w szklarniach. Biuletyn PAN Nr 58, W-wa 1962.

[5] Mierzwiński S.: Doświadczalne szklarnie dla badania systemów ogrzewania i mikroklimatu. Biuletyn PAN nr 58 W-wa 1962.

[6] Mierzwiński S.: Badania zużycia ciepła i warunków cieplnych ogrzewanej szklarni. Biuletyn PAN nr 58, W-wa 1962.

[7] Institut für Technik im Gartenbau im Wageningen - Holland (opis działalności). Gartenwelt Nr 2 1967 s. 35, Nr 4 1967, s. 74.

[8] Hanan J.J., Holley W.D.: Temperature house for plant research. Proc. Amer. Soc. Hortic. Scie. 1960 t. 75, s. 799--803.

[9] Gudehus H.: Zur Belüftung von Gewächshäusern. Gartenwelt Nr 19, 1967, s. 392/3. (Prace Instytutu Techniki Ogrodnictwa i Rolnictwa Politechniki w Hannowerze).

[10] Jegiazarow A.G.: Tiepłowyj rasczot parnikow s wodianym obogrewom. MISI Sbornik trudow No 21, wyp. 1, Moskwa 1957 r.

[11] Bouchet R.: Etude theoretique du bilan d'energie des serres. 4° Congres International du Chauffage et de la Climatisation. Paryż 1967.

[12] Germing G.H.: Influence of orientation and type of heating 4° Congr. Intern. du Chauff. et de la Climatisation. Paryż 1967 r.

[13] Rademacher H.: Erfahrung mit der Bodenheizung durch Kunststoffrohre. Gartenwelt Nr 8, 1966, s. 192/4.

[14] Seemann J.: Wärmeregelung in geheizten Gewächshäusern nach ökologischen Gesichtspunkten. Gartenbauwissenschaft t 1. 1956, s. 102/128.

[15] Seemann J.: Klima und Klimasteuerung im Gewächshaus. Bonn 1957. Landwirtschaftsverl.

[16] Weleczka: Probleme der Heizung und Temperaturregelung. Gartenwelt Nr 5, 1967, s. 99/101.

[17] Chalamejzer M.B.: Quelques questions de l'automatisation des phytotrons et dynamique de la regulation automatique de parametres de l'air. 4° Congr. Intern. du Chauff. et de la Climat. Paryż 1967.

- do rozdziału 2 i 3

[18] Mierzwiński S., Jedynak M., Turkiewicz K.: Badania cieplne w szklarni z doświadczalną instalacją ogrzewczą. Zesz. Nauk. Politechniki Śląskiej Inż. San. Nr 10 1966.

[19] Mierzwiński S. z zespołem: Badania i pomiary warunków ogrzewania szklarni. Kat. Ogrzew. i Went. Pol. Śl. 1965.

[20] Baturin W.W., Elterman W.M.: Aeracja promyslennych zdanij. Gos. Izd. Lit. po stroit. Arch. i Stroit. Mat., Moskwa 1963.

[21] Taliew W.N.: Aerodinamika wentilacji. Wyd. 2, Gos. Izd. Lit. po Stroit. Arch. i Str. Mat. Moskwa 1963.

[22] Rünger W.: Licht und Temperatur in Zierpflanzenbau. Paray, Berlin 1957.

[23] Müller D.: Ökologische Energetik der Photosynthese. Handbuch der Pflanzenphysiologie. Band V T. 2. Springer 1960.

[24] Michiejew M.A.: Osnowy tiepłopieredaczi. G.E. Izd. Moskwa 1956.

[25] Ochęduszko S.: Termodynamika stosowana. WNT Warszawa 1967.

[25a] Volk W.: Statystyka stosowana dla inżynierów. Tłum. z ang. WNT W-wa 1965.

[26] Mierzwiński S., Jedynak M., Turkiewicz K.: Straty ciepła szklarni. G.W. i T.S. Nr 3 1968.

[27] Mierzwiński S.: Badania wymiany powietrza w szklarni. G.W.T.S. Nr 1 1964.

[28] Mierzwiński S.: Ogrzewanie powietrzne szklarni. Biuletyn PAN Nr 58 s. 156. Warszawa 1962.

- do rozdziału 4 i 5

[29] Harriot P.: Regulacja procesów chemicznych. WNT W-wa 1967.

[30] Sierow R., Korolkow: Dinamika processow w tiepło- i masso-obmiennych apparatach. Wyd. Energia, Moskwa 1967.

[31] Profos P.: Die Regelund der Dampfanlagen. Springer Verl. 1962.

[32] Trybalski T.: Zarys ogólnej metody doboru regulacyjnie optymalnego aparatu wymiany ciepła oraz jego zastępczej uproszczonej funkcji przejścia. Praca habil. Zesz. Nauk. Pol. Śl. Automatyka Nr 2 1962.

[33] Dewiatow B.N.: Opriedielenie charakteristiki i regulirujemosti technologiczeskich apparatow w swiazi s zadaczej ob optimalnych parametrach obiekta i regulatora. Izw. Ak. Nauk ZSRR Otd. tiech. nauk Nr 5 1958, s. 29/33.

[34] Dewiatow B.N.: Opredielenie dinamiczeskich charakteristik i kriteriew inecjonnosti i regulirujemnosti chimiko-technologiĉeskich apparatow. Awtomatika i Telemech. Nr 6 1960 s. 779/790.

[35] Thal - Larsen H.: Dynamics of heat exchangers and their models. Trans. ASME, 1960, Nr 2, s. 489/504.

[36] Krzyżanowski R.: Metoda wyznaczania własności dynamicznych grubościennych przegrzewaczy pary. Praca doktorska. Pol. Śl. 1965.

[37] Bałakiriew W.S., Dudnikow E.G., Cirlin A.M.: Eksperimentalnoje opredielenie dinamiczeskich charakteristik promŝlennych obiektow uprawlenia. Wyd. Energia Moskwa 1967.

[38] Błach Z.Ŝ.: Pierechodnyje processy w liniejnych sistiemach awtomatiĉeskoho regulirowania. Gos. Izd. Fiz. Mat. Lit. Moskwa 1961.

[39] Ordynoew W.M.: Matematiĉeskoje opisanie obiektow awtomatizacji. Izd. Maŝinostr. Moskwa 1965.

[40] Butkowskij A.G.: Tieoria optimalnoho uprawlenia sistiemami s raspredielonnymi parametrami. Wyd. Nauka Moskwa 1965.

[41] Mierzwiński S., Piotrowski J.: Dynamiczne własności szklarni jako obiektu regulacji temperatury. Zesz. Nauk. Pol. Śl. Inż. San. Nr 10 1966.

[42] Mierzwiński S., Piotrowski J.: Charakterystyka szklarni jako obiektu ogrzewania. G.W.T.S. Nr 8, 1968.

[43] Mierzwiński S., Piotrowski J., Puszer M.: Własności regulacyjne instalacji ogrzewczych dla budynków lekkiej konstrukcji. Zesz. Nauk. Pol. Śl. Inż. San. Nr 12 1968.

[44] Mierzwiński S.: Jakość regulacji ogrzewniczych układów kombinatów szklarniowych G.W.T.S. 1969 (w druku).

[45] Mierzwiński S. z zespołem: Badania charakterystyki szklarni - Dane wyjściowe do projektowania ogrzewania zespołu szklarni. Kat. Ogrzew. i Wentylacji Pol. Śl. 1967.

[46] Kravciv M.: Model skleniku jako regulowane soustavy. Zemědělska Technika 14 (XLI) 1968 s. 167/178.

# ZAGADNIENIA DOBORU WŁASNOŚCI INSTALACJI OGRZEWCZEJ DLA LEKKIEGO OBIEKTU

## S t r e s z c z e n i e

Omówiono wyniki badań, zmierzających do sprecyzowania własności instalacji gogrzewczej, które pozwalają przystosować jej rozwiązanie do potrzeb ogrzewanego obiektu. Przeanalizowano przestrzenne oddziaływanie instalacji ogrzewczej na obiekt przez prześledzenie rozdziału strumieni ciepła przy poszczególnych systemach ogrzewania, a także czasowe oddziaływanie takich instalacji na obiekt w procesie regulacji temperatury jego wnętrza. Następnie określono potrzebny zakres parametrów konstrukcyjnych i ruchowych takich instalacji dla stworzenia wymaganych warunków cieplnych i dla umożliwienia automatyzacji procesu ogrzewania obiektu.

Wykonane badania i analizy matematyczne dotyczą szklarni wolnostojącej z ogrzewaniem rurowym, powietrznym i rurowo-powietrznym. Były one przeprowadzane w naturalnym produkcyjnym obiekcie oraz przy użyciu modelu fizykalnego, urządzeń analogowych i maszyny cyfrowej.

Badania te obejmowały:

- Bilans cieplny szklarni, ze wszczególnym uwzględnieniem konwekcyjnej wymiany ciepła, pól temperaturowych wnętrza i oszklenia, pól prędkości ruchu powietrza oraz strat ciepła szklarni;
- Dynamiczną charakterystykę szklarni jako obiektu regulacji temperatury, traktowanego jako układ o parametrach rozłożonych i skupionych, ze szczególnym uwzględnieniem opóźnień transportowych w transmitancjach nastawczych;
- Własności regulacyjne badanych rozwiązań instalacji ogrzewczych i uzyskiwaną jakość regulacji temperatury wnętrza.

# ВОПРОСЫ ПОДБОРА СВОЙСТВ ОТОПИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБЪЕКТА ЛЁГКОЙ КОНСТРУКЦИИ


## Р е з ю м е

Обсуждено было результаты исследований, стремящихся к уточнению свойств отопительной установки, которые позволят применить её решение к потребностям отопляемого объекта. Проанализировали пространственное воздействие отопительной установки на объект благодаря наблюдениям распределения теплового потока при отдельных отопительных системах, а тоже временное воздействие таких установок на объект в процессе регулирования температуры его интерьера. Затем определили необходимый объём параметров конструкционных и эксплуатационных таких установок для создания требуемых отопительных условий и для получения возможности автоматизации отопительного процесса объекта.

Проведённые исследования и математические анализы относятся к отдельностоящей теплице с отоплением трубчатым, воздушным и трубчото-воздушным. Были они проведены в натуральном, производственном объекте, при применении физикальной модели, аналоговых установок и счётных машин.

Исследования эти охватывали:

- Тепловой баланс теплицы, с особенным учётом конвекционного обмена тепла, температурных полей интерьера и остекления, полей скорости движения воздуха, а тоже потер тепла теплицы;
- Динамическую характеристику теплицы как объекта регулирования температуры, рассматриваемого как систему о распределённых и сосредоточенных параметрах, с особенным учётом запаздывань в передаточной функции обьекта;
- Регуляционные свойства исследоваемых решений отопительной установки и получаемое качество регулирования температуры интерьера.

# PROBLEMS OF THE CHOICE OF PROPERTIES OF HEATING INSTALLATION FOR LIGHT STRUCTURE OBJECTS


## S u m m a r y

The properties of heating installation corresponding with specific needs of light structure objects were researched and discussed. An inquiry was carried into heat streams value and distribution in relation to various heating systems, also the time lag in the process of temperature control. Following - certain structural and functional parameters of installation have been determined in order to adapt it to automatic control.

Three heating systems were investigated: heating pipes, forced air heating and combined. Research was conducted in a production glasshouse then mathematically analised using computer and finally with physical and analoque models.

Researches contained:

1. Thermal balance of the glasshouse, convectional heat exchange, temperature fields of inside air and ambient surfaces, velocity field and heat losses.
2. Dynamic characteristics of glasshouse examined as temperature control object with concentrated and continous heating surface parameters, considering expecially time lag in transfer function.
3. Adaptation of respective heating systems to automatic control and quality of control effects.

ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ
ukazują się w następujących seriach:

A. AUTOMATYKA
B. BUDOWNICTWO
Ch. CHEMIA
E. ELEKTRYKA
En. ENERGETYKA
G. GÓRNICTWO
IS. INŻYNIERIA SANITARNA
MF. MATEMATYKA-FIZYKA
M. MECHANIKA
NS. NAUKI SPOŁECZNE

Dotychczas ukazały się następujące zeszyty
serii:; IS

Inżynieria Sanitarna z. 1, 1960 r., s. 139, zł 11,25
Inżynieria Sanitarna z. 2, 1962 r., s. 109, zł 8,40
Inżynieria Sanitarna z. 3, 1961 r., s. 75, zł 5,80
Inżynieria Sanitarna z. 4, 1962 r., s. 70, zł 4,95
Inżynieria Sanitarna z. 5, 1964 r., s. 76, zł 6,15
Inżynieria Sanitarna z. 6, 1964 r., s. 201, zł 12,30
Inżynieria Sanitarna z. 7, 1965 r., s. 143, zł 4,—.
Inżynieria Sanitarna z. 8, 1965 r., s. 200, zł 16,75
Inżynieria Sanitarna z. 9, 1966 r., s. 183, zł 11,—
Inżynieria Sanitarna z. 10, 1966 r., s. 137, zł 8,—
Inżynieria Sanitarna z. 11, 1967 r., s. 92, zł 6,—
Inżynieria Sanitarna z. 12, 1968 r., s. 137. zł 9,—

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej
P 33555/69

Cena zł 8.–