

J. PORTACHA, E. PRAWDZIK,
A. SMYK

Instytut Techniki Ciepłej
Politechniki Warszawskiej

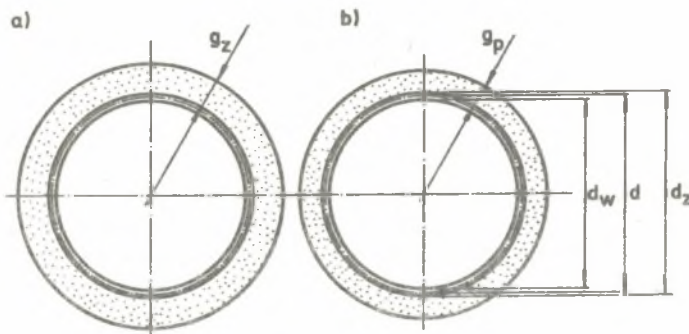
OPTIMALIZACJA KONSTRUKCJI MAGISTRALI CIEPŁOWNICZEJ
W LUBELSKIM ZAGŁĘBIU WĘGLOWYM

Streszczenie. W pracy przedstawiono problem optymalizacji konstrukcji magistrali dla założonych maksymalnych mocy ciepłowniczych i temperatur wody sieciowej.

1. Wstęp

Kompleksowe zagospodarowanie Lubelskiego Zagłębia Węglowego wymaga między innymi rozwiązania zagadnienia uciepłownienia tego rejonu. Nie ulega wątpliwości, że większość odbiorców powinna być zasilana docelowo ze źródła scentralizowanego w postaci elektrociepłowni.

Przesył ciepła do odbiorców odległych między sobą od kilku do kilkunastu kilometrów realizowany będzie magistralami ciepłowniczymi. Powstaje podstawowe pytanie, jaka powinna być ich konstrukcja, tzn. średnice rurociągów oraz grubości izolacji termicznej na przewodzie zasilającym i powrotnym (rys. 1). Dla zorientowania w skali problemu warto nadmienić, że nakłady inwestycyjne na system sieci magistralnych szacuje się na około 2 mld zł, a roczne koszty przesyłu na kilkaset mln zł.



Rys. 1. Magistrala ciepłownicza dwuprzewodowa
a) rurociąg zasilający, b) rurociąg powrotny

Decydujący wpływ na optymalne rozwiązanie konstrukcji magistrali mają podane niżej założenia (w nawiasach zaznaczono, jakie założenie przyjęto przy uzyskiwaniu wyników podanych w niniejszym referacie):

rodzaj czynnika (woda), maksymalna przesyłana moc ciepłownicza, roczny wykres obciążeń ciepłowniczych (ciepło na c.o., na c.w., na wentylację sztywów), sposób regulacji (jakościowo-ilościowa), temperatury wody sieciowej, rodzaj magistrali (promieniowa, napowietrzna), rodzaj podpór (niskie), liczba przewodów w magistrali (2 lub 4).

Wartości maksymalnej mocy ciepłowniczej wynosiły, w zależności od wielkości odbioru, od 100 do 850 MW. Natomiast badany zakres obliczeniowych temperatur wody sieciowej zawierał się w przypadku zasilania: od 130 do 190°C, a w przypadku powrotu: od 50 do 90°C.

Pozostałe założenia, niezbędne do przeprowadzenia obliczeń, zostaną podane dalej. Koszty wytwarzania ciepła dla różnych temperatur przyjęto na podstawie własnych obliczeń.

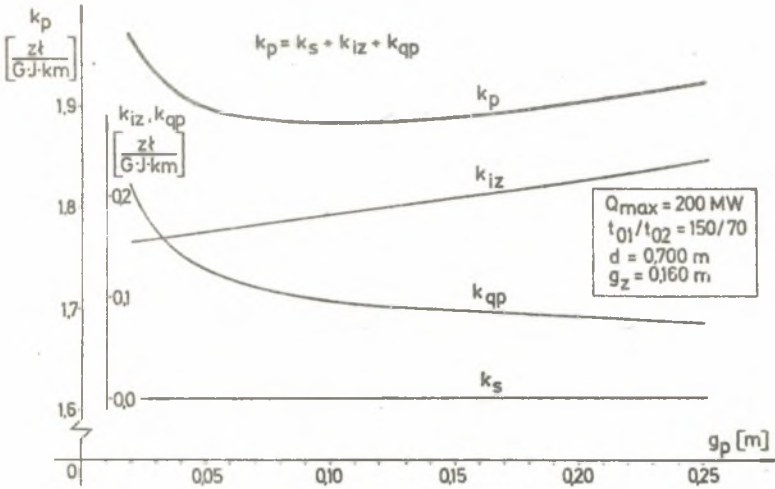
W pracy przedstawiono problem optymalizacji konstrukcji magistrali dla podanych wyżej zakresów maksymalnych mocy ciepłowniczych i temperatur wody sieciowej. Podano wykorzystaną postać jednostkowego kosztu przesyłu ciepła - jako funkcję kryterium. Opisano zastosowaną metodę rozwiązania zadania optymalizacyjnego oraz zamieszczono wyniki obliczeń.

2. Opisowe sformułowanie zadania optymalizacji konstrukcji magistrali

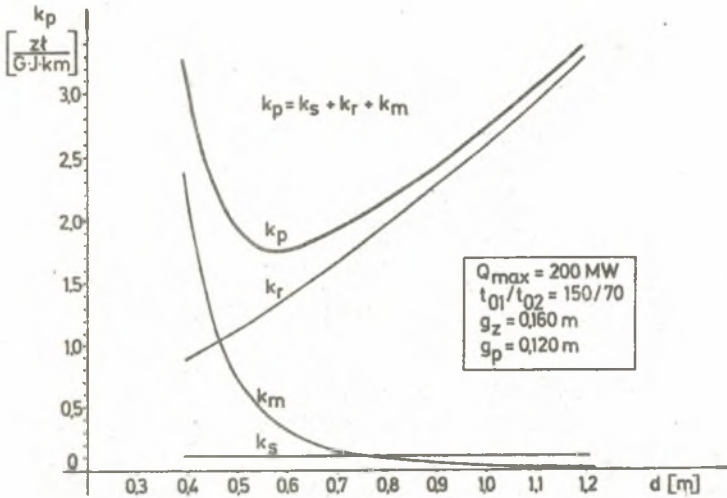
Należy obliczyć średnicę rurociągu i grubość izolacji termicznej na przewodzie zasilającym i powrotnym dla magistrali ciepłowniczej przy warunku, aby przy określonych założeniach techniczno-ekonomicznych jednostkowy koszt przesyłu ciepła był minimalny.

Czy takie zadanie jest poprawne? Ze względu na średnicę tak, ponieważ wraz ze wzrostem średnicy rosną roczne koszty z tytułu poniesionych nakładów inwestycyjnych, ale zmniejszają się roczne koszty pompowania (rys.2b). Ze względu na obie grubości izolacji również, bowiem gdy zwiększymy grubość izolacji, to co prawda zwiększa się roczne koszty inwestycyjne, ale ulegną zmniejszeniu roczne koszty strat ciepła na skutek przewodzenia (rys. 2a). Można więc szukać takich wartości średnicy i grubości izolacji, aby suma całych rocznych kosztów była najmniejsza. Sumą tę odniesioną do jednostki przesłanego ciepła i do jednostki długości magistrali jest jednostkowy koszt przesyłu (k_p).

Podane zadanie jest więc zadaniem optymalizacji w przestrzeni trójwymiarowej. Kolejnymi współrzędnymi są: średnica rurociągu, grubość izolacji na przewodzie zasilającym i grubość izolacji na przewodzie powrotnym. Funkcją celu, której minimum szukamy, jest jednostkowy koszt przesyłu ciepła - k_p , zł/(GJ.km).



Rys. 2a. Zmiana składowych kosztu przesyłu ciepła (k_p) w funkcji grubości izolacji na rurociągu powrotnym (g_p)
 k_{iz} , k_{qp} , k_s - składowe koszty od: izolacji, strat ciepła przez przewodzenie i stałe (niezależne od grubości izolacji)



Rys. 2b. Zmiana składowych kosztu przesyłu ciepła (k_p) w funkcji średnicy rurociągu (d)
 k_r , k_m , k_s - składowe rosnące (w funkcji d), malejące i stałe (niezależne od średnicy)

3. Sformułowanie matematyczne problemu optymalizacji konstrukcji magistrali

Znaleźć:

$$\min \left\{ k_p(d, g_z, g_p, t_{01}, t_{02}, Q_{\max}) \quad \text{gdzie } d \in D; g_z, g_p \in G; \right. \\ \left. \text{przy } t_{01} = \text{const}, t_{02} = \text{const}, Q_{\max} = \text{const} \right\}$$

gdzie:

- k_p - jednostkowy koszt przesyłu ciepła, zł/(GJ.km),
- d, g_z, g_p - zmienne decyzyjne,
- d - średnica nominalna rurociągu, m,
- g_z - grubość izolacji termicznej na przewodzie zasilającym, m,
- g_p - grubość izolacji termicznej na przewodzie powrotnym, m.

Zmienne decyzyjne d, g_z i g_p mogą przyjmować jedynie wartości dyskretne:

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_{16}\}$$

$$G = \{g_1, g_2, \dots, g_{24}\}$$

Wartość średnic wewnętrznych (d_w) i zewnętrznych (d_z), będących funkcjami średnicy nominalnej d , przyjmują również wartości dyskretne:

$$d_w \in D_w; \quad D_w = \{d_{w1}, d_{w2}, \dots, d_{w16}\}$$

$$d_z \in D_z; \quad D_z = \{d_{z1}, d_{z2}, \dots, d_{z16}\}$$

Zbiory znormalizowanych liczb D, D_w, D_z i G zostały określone na podstawie norm PN-74/H-74209 i PN-71/B-13102 oraz zakresu parametrów przesyłowego czynnika

t_{01}, t_{02}, Q_{\max} - zmienne parametryczne

t_{01} - obliczeniowa temperatura wody sieciowej na zasilaniu, °C,

t_{02} - obliczeniowa temperatura wody sieciowej na powrocie, °C,

Q_{\max} - maksymalna moc cieplownicza przesyłana magistralą, kW.

Zmienne parametryczne t_{01}, t_{02}, Q_{\max} są zmiennymi ciągłymi i należą do zbiorów:

$$t_{01} \in \langle 130^{\circ}\text{C}, 190^{\circ}\text{C} \rangle; \quad t_{02} \in \langle 50^{\circ}\text{C}, 90^{\circ}\text{C} \rangle$$

$$Q_{\max} \in \langle 100 \cdot 10^3 \text{ kW}, 1000 \cdot 10^3 \text{ kW} \rangle$$

Pod względem matematycznym jest to klasyczne zadanie optymalizacyjne szukania minimum funkcji 3 zmiennych dyskretnych. Rozwiązanie zadania otrzymuje się dla określonych wartości zmiennych parametrycznych.

4. Funkcja celu - jednostkowy koszt przesyłu ciepła (k_p)

W oparciu o wytyczne badania efektywności w zakresie energetyki i ciepłownictwa jednostkowy koszt przesyłu ciepła magistralą jest określony zależnością:

$$k_p = \frac{I \cdot z \cdot (r + s) + B \cdot r + K_b + K_{qm}}{A_{cu} \cdot L}, \quad \text{zł}/(\text{GJ} \cdot \text{km})$$

gdzie:

- I - bezpośrednie nakłady inwestycyjne, zł,
- z - współczynnik zamrożenia nakładów, -,
- r - stopa dyskontowa, 1/a,
- s - średnia stawka amortyzacji, 1/a,
- B - nakłady na tworzenie środków obrotowych, zł,
- K_b - roczne koszty bieżące eksploatacyjne, zł/a,
- K_{qm} - roczne koszty strat ciepła i wody sieciowej, zł/a,
- A_{cu} - ciepło grzejne przesłane w ciągu roku magistralą, GJ/a,
- L - długość magistrali, bez uwzględnienia kompensacji, km.

Na roczne koszty bieżące (K_b) składają się:

$$K_b = K_r + K_o + K_a + K_e$$

gdzie:

- K_r - roczne koszty remontów kapitalnych i bieżących, zł/a,
- K_o - roczne koszty osobowe, zł/a,
- K_a - roczne koszty ogólnozakładowe, administracyjne, zł/a,
- K_e - roczne koszty pracy pompowania wody sieciowej, zł/a.

Na roczne koszty strat (K_{qm}) składają się:

$$K_{qm} = K_{qp} + K_{qu} + K_{wu}$$

gdzie:

K_{qp} - roczne koszty strat ciepła na skutek przepływu ciepła do otoczenia, zł/a,

K_{qu} - roczne koszty strat ciepła wskutek ubytku wody sieciowej, zł/a,

K_{wu} - roczne koszty uzupełnienia strat wody sieciowej, zł/a.

Niżej zostanie przedstawiony wzór na koszt przesyłu (k_p) w postaci jawnej w funkcji zmiennych decyzyjnych dla znanych zmiennych parametrycznych.

Zmiennymi decyzyjnymi są:

- średnica nominalna rurociągu (d), m; w wyrażeniu na k_p występują również: średnica wewnętrzna (d_w) i średnica zewnętrzna (d_z) - obie te średnice są jednoznacznie związane ze średnicą nominalną:

$$d_w = f_w(d), \text{ m}; \quad d_z = f_z(d), \text{ m}$$

- grubość izolacji termicznej na rurociągu zasilającym (g_z), m,
- grubość izolacji termicznej na rurociągu powrotnym (g_p), m.

Zmiennymi parametrycznymi nazwano:

- maksymalną przesyłaną moc cieplowniczą (Q_{max}), kW,
- obliczeniową temperaturę wody sieciowej na zasilaniu (t_{01}), °C,
- obliczeniową temperaturę wody sieciowej na powrocie (t_{02}), °C.

Pozostałe wielkości występujące we wzorze na k_p są liczbami, albo wielkościami stałymi lub wielkościami zależnymi bądź to od zmiennych parametrycznych, bądź od zmiennych decyzyjnych. Ich znaczenie zostanie podane dalej.

$$k_p = \frac{10^3}{t_a} \int_0^{Q_{max}} Q \cdot \tau \cdot d\tau \left\{ \left[0,1654 \cdot I_r(d) + 0,1654 \cdot I_b(d) + \right. \right. \\ \left. \left. + 0,2730 \cdot \mathcal{F} \cdot \left[(d_z \cdot g_z + 2g_z^2) \cdot k_v(g_z) + (d_z \cdot g_p + 2g_p^2) \cdot k_v(g_p) + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + (d_z + 2g_z) \cdot k_s + (d_z + 2g_p) \cdot k_s \right] \right\} \cdot \left[0,5 \cdot n + \xi(d, n) \right] \cdot \\ \cdot \left[0,8850 + 0,7670 \cdot 10^{-3} \cdot t_{01} \right] + 139,4 \cdot n^{0,5} +$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1 + d_w}{d_w^{5,25}} \cdot \frac{k_e}{n^2} \left[0,2961 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{(1-\alpha)^3 (Q_{max} + Q_w)^3 \cdot \tau_1 \cdot (v_{z1}^2 + v_{p1}^2)}{(h_{01} - h_{02})^3} + \right. \\
 & + 0,3172 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{(1-\alpha)^3 \cdot Q_{max}^3 \cdot \tau_2 \cdot (v_{z2}^2 + v_{p2}^2)}{(h_{01} - h_{02})^3} + \\
 & + 0,3416 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\alpha^3 \cdot Q_{max}^3 \cdot \tau_3 \cdot (v_{z3}^2 + v_{p3}^2)}{(h_{11} - h_{12})^3} + \\
 & + n \cdot d_w^2 \cdot \tau_e \left[1,964 \cdot 10^{-6} \cdot k_w \cdot \frac{p_{nz} \cdot h_{sz} \cdot p_{np} \cdot h_{sp}}{p_{nz} + p_{np}} + 7,854 \cdot 10^{-3} \right] + \\
 & + 5,654 \cdot 10^{-6} \cdot \tau_e \cdot n \cdot k_w \left[\frac{\Delta t_{sz}}{\frac{1}{\alpha_p \cdot (d_z + 2g_z)} + \frac{2,857 \cdot 10^3 \cdot \ln\left(1 + \frac{2g_z}{d_z}\right)}{220 + t_{sz} + t_o}} + \right. \\
 & \left. + \frac{\Delta t_{sp}}{\frac{1}{\alpha_p (d_z + 2g_p)} + \frac{2,857 \cdot 10^3 \ln\left(1 + \frac{2g_p}{d_w}\right)}{220 + t_{sp} + t_o}} \right] \text{ z}\text{\AA}/(\text{GJ}\cdot\text{km})
 \end{aligned}$$

Występujące we wzorze współczynniki liczbowe są określone w wyniku przyjęcia założeń co do wartości stopy dyskontowej (0,08); stawek amortyzacyjnych dla rurociągów i izolacji (0,04, 0,14); współczynnika zamrożenia (1,08); współczynnika remontów i kosztów administracyjnych (0,035, 0,6); jednostkowych rocznych kosztów osobowych (61 · 10³ zł/(osoby · a)); współczynnika zatrudnienia (2 osoby/km); współczynnika na środki obrotowe (0,01); bezwzględnej chropowatości rurociągu (0,35 · 10⁻³ m); sprawności pomp i silników (0,7, 0,65, 0,6, 0,96); współczynnika godzinowego ubytku wody sieciowej (0,025); jednostkowego kosztu przygotowania wody uzupełniającej (4 · 10⁻³ zł/kg) oraz innych liczb uwzględniających przeliczniki jednostek.

Stałe, niezależne od zmiennych parametrycznych (t₀₁, t₀₂, Q_{max}) są podane niżej w kolejności występowania we wzorze na koszt pompowania:

k_s = 120 zł/m² - jednostkowy powierzchniowy koszt izolacji,

k_e = 258,3 zł/GJ - jednostkowy koszt energii elektrycznej zużytej na pompowanie.

$\tau_1 = 2686 \text{ h/a}$ - czas pracy magistrali w zakresie temperatur od -20°C do $+2^\circ\text{C}$,

$\tau_2 = 2134 \text{ h/a}$ - czas pracy magistrali w zakresie temperatur od $+2^\circ\text{C}$ do $+12^\circ\text{C}$,

$\tau_3 = \tau - \tau_1 - \tau_2 - \tau_r = 3740 \text{ h/a}$ - czas pracy magistrali w okresie letnim,

$\tau = 8760 \text{ h/a}$ - liczba godzin w roku,

$\tau_r = 200 \text{ h/a}$ - czas remontu sieci, przeprowadzony w okresie letnim;

$\tau_e = \tau - \tau_r = 8560 \text{ h/a}$ - czas pracy magistrali w ciągu roku;

$\alpha_p = 11,6 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ - współczynnik przejmowania ciepła od zewnętrznej powierzchni izolacji;

$\tau_o = \frac{1}{\tau_e} \int_0^{\tau_e} t(\tau) d\tau$ - średnia w okresie eksploatacji temperatura otoczenia;

$t(\tau)$ - zadany rozkład temperatur otoczenia w funkcji czasu;

τ - czas;

Q_w - maksymalna moc potrzebna na wentylację szybów kopalnianych, kW;

α_f - współczynnik skojarzenia, --;

n - liczba rurociągów w magistrali, --.

Stałe, zależne od zmiennych parametrycznych (t_{01} , t_{02} , Q_{\max}) są opisane niżej w kolejności ich występowania we wzorze na k_p :

$k_w = k_w(t_{01}, t_{02}, Q_{\max})$ - koszt wytwarzania energii cieplnej w EC, zł/GJ.
Funkcja k_w określona wg własnych obliczeń.

$h_{01} = h(t_{01}, p_1)$ - obliczeniowa entalpia wody sieciowej na wyjściu z EC.
Funkcje h - przyjęta funkcja termodynamiczna.

p_1 - ciśnienie wody sieciowej na wyjściu z EC dla $t_z = -20^\circ\text{C}$, bar;

$h_{02} = h(t_{02}, p_2)$ - jak wyżej, dotyczy wejścia do EC.

$h_{11} = h(t_{01}, t_{11}, p_{11})$ - średnia entalpia wody sieciowej latem na wyjściu z EC, kJ/kg. Funkcja h - jak wyżej.

$t_{11} = \frac{1}{\tau_3} \int_0^{\tau_3} t_z(t_{01}, \tau) d\tau$ - średnia w okresie letnim temperatura wody sieciowej na zasilaniu, $^\circ\text{C}$;

$t_z(t_{01}, \tau)$ - określony rozkład temperatur wody sieciowej na zasilaniu;

$p_{11} = p(\Delta p_{11}, p_{\min}, \Delta p_d)$ - średnie ciśnienie wody sieciowej na zasilaniu, bar;

$\Delta p_{11} = p(d_w, t_{O1}, t_{O2}, Q_{max})$ - spadek ciśnienia w magistrali latem, bar;

p_{min} - minimalne ciśnienie w.s. w magistrali, bar;

Δp_d - dyspozycyjny spadek ciśnienia, bar;

$h_{12} = h(t_{O2}, t_{12}, p_{12})$ - średnia entalpia wody sieciowej latem na wejściu do EC, kJ/kg. Wyjaśnienia jak wyżej, ale dla wody sieciowej na powrocie;

$h_{sz} = h(t_{O1}, t_{sz}, p_{sz})$ - średnia entalpia wody sieciowej zasilającej w okresie pracy magistrali, kJ/kg. Funkcja h - jak wyżej.

$t_{sz} = \frac{1}{\tau_e} \int_0^{\tau_e} t_z(t_{O1}, \tau) d\tau$ - średnia temperatura wody sieciowej zasilającej w okresie pracy magistrali, °C;

$p_{sz} = p(\Delta p, p_{min}, \Delta p_d)$ - średnie ciśnienie wody sieciowej na zasilaniu w okresie pracy magistrali, bar; Δp - średni spadek ciśnienia w magistrali, bar;

$h_{sp} = h(t_{O2}, t_{sp}, p_{sp})$ - średnia entalpia wody sieciowej powrotnej w okresie pracy magistrali, kJ/kg.

Wyjaśnienia jak wyżej, ale dla wody sieciowej na powrocie, przy czym:

$t_{sp} = \frac{1}{\tau_e} \int_0^{\tau_e} t_p(t_{O2}, \tau) d\tau$;

$p_{sp} = p(\Delta p, p_{min})$;

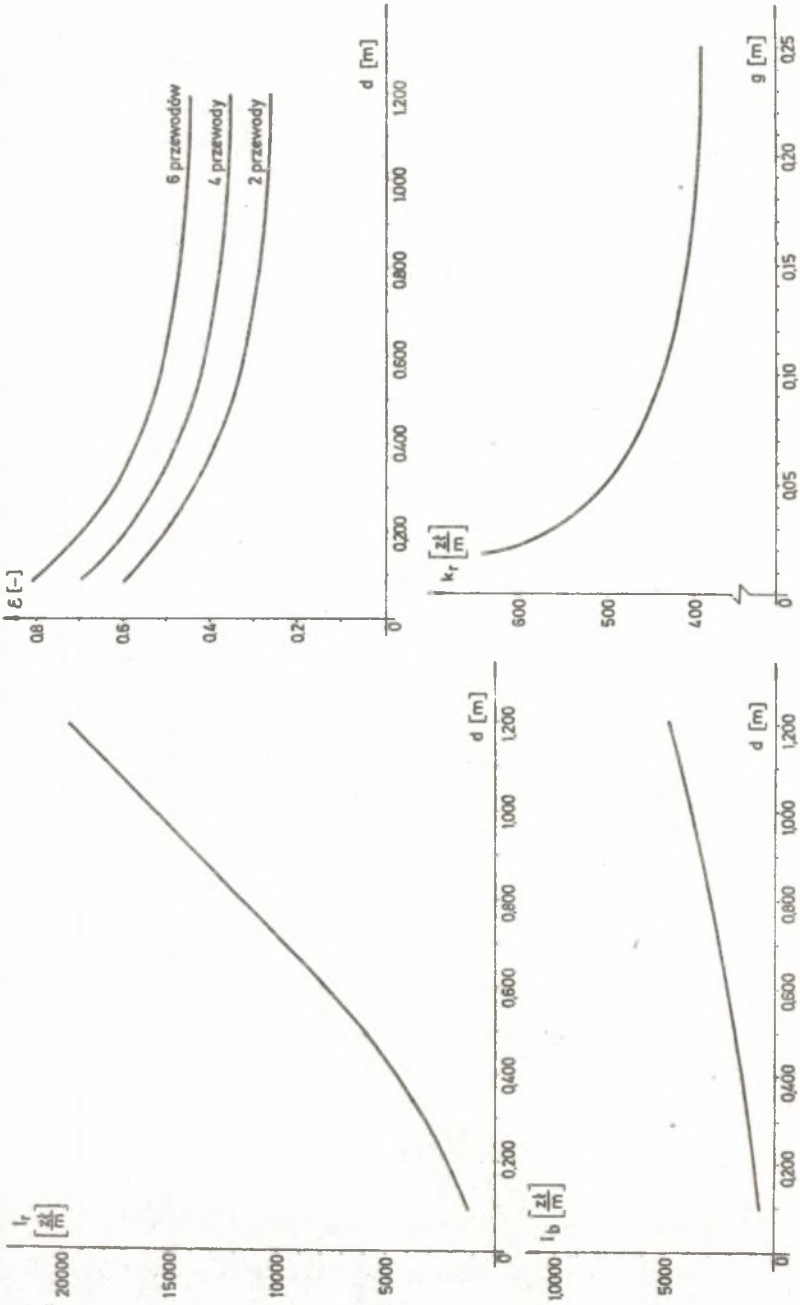
$\Delta t_{sz} = \frac{1}{\tau_e} \int_0^{\tau_e} [t_z(t_{O1}, \tau) - t(\tau)] d\tau$ - średnia różnica temperatur między wodą zasilającą a otoczeniem w okresie pracy magistrali, °C;

$t_{sp} = \frac{1}{\tau_e} \int_0^{\tau_e} [t_p(t_{O2}, \tau) - t(\tau)] d\tau$ - średnia różnica temperatur między wodą powrotną a otoczeniem w okresie pracy magistrali, °C;

$p_{nz} = p(\Delta p, p_{min}, \Delta p_d, p_a)$ - średnie nadciśnienie wody sieciowej zasilającej w okresie pracy magistrali, bar;

p_a - ciśnienie atmosferyczne, bar;

$p_{np} = p(\Delta p, p_{min}, p_e)$ - średnie nadciśnienie wody sieciowej powrotnej w okresie pracy magistrali, bar;



Rys. 3

$v_{ab} = v(t_{01}, t_{02}, t_{sab}, p_{sab})$ - średnia objętość właściwa wody w magistrali m^3/kg . Funkcja v - funkcja termodynamiczna,

gdzie:

$$a = \begin{cases} z & \text{- na zasilaniu} \\ p & \text{- na powrocie} \end{cases}$$

$$b = \begin{cases} 1 & \text{- w zakresie temperatur zewnętrznych od } -20^{\circ}\text{C do } +2^{\circ}\text{C} \\ 2 & \text{- w zakresie temperatur zewnętrznych od } +2^{\circ}\text{C do } +12^{\circ}\text{C} \\ 3 & \text{- w zakresie temperatur zewnętrznych większych pd } +12^{\circ}\text{C} \end{cases}$$

$$t_{sab} = \frac{1}{\tau_b} \int_0^{\tau_b} t_a(t_{01}, t_{02}, \tau) d\tau - \text{średnia temperatura wody sieciowej "a" w zakresie "b", }^{\circ}\text{C};$$

$p_{sab} = p(\Delta p_{ab}, p_{min}, \Delta p_d)$ - średnie ciśnienie wody sieciowej "a" w zakresie "b", bar;

$\Delta p_{ab} = p(d_w, t_{01}, t_{02}, Q_{max})$ - spadek ciśnienia w magistrali w okresie "b" na przewodzie "a";

$Q(Q_{max}, \tau)$ - określony rozkład mocy ciepłowniczej przesyłanej magistralą.

We wzorze na koszt przesyłu występują funkcje zależne od zmiennych decyzyjnych (d , g_z , g_p). Mają one postać wykresów uzyskanych w oparciu w rzeczywiste koszty budowy sieci (wg cen z r. 1976). Są to:

$I_b(d)$ - nakłady bezpośrednie na podpory i roboty budowlane, zł/m,

$I_r(d)$ - nakłady bezpośrednie na rurociągi, armaturę i zabezpieczenie antykorozyjne, zł/m,

$k_v(g)$ - jednostkowy objętościowy koszt izolacji termicznej, zł/ m^3 . Opracowany w oparciu o cennik izolacji termicznych.

$\epsilon(d, n)$ - współczynnik wzrostu nakładów bezpośrednich z tytułu kosztów dodatkowych. Na koszty dodatkowe składają się koszty studiów, dokumentacji i przygotowania inwestycji; koszty wyposażenia sieci, dróg stałych, małej architektury; koszty obiektów tymczasowych, koszty nadzoru, obsługi inwestorskiej, szkolenia i rozruchu oraz rezerwa na roboty i wydatki nieprzewidziane (rys. 3).

5. Rozwiązanie problemu optymalizacyjnego

Na wybór metody rozwiązania zadania optymalizacyjnego mają wpływ cechy funkcji kryterium, a także to, jakim narzędziem do obliczeń numerycznych dysponujemy.

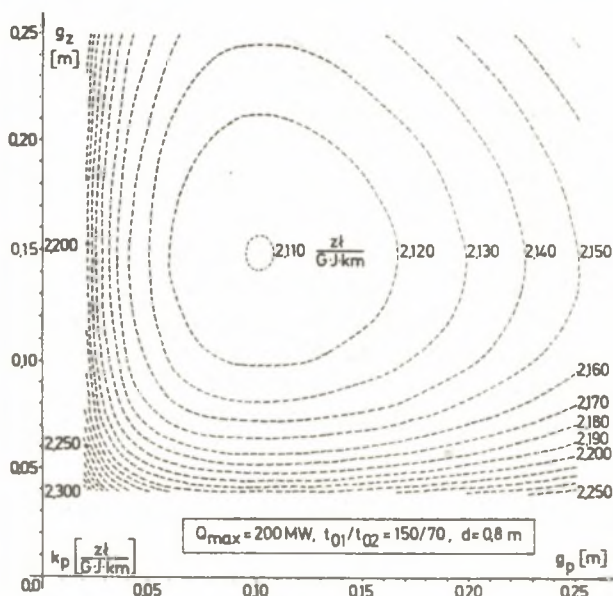
Funkcja kryterium jest wypukła względem każdej ze zmiennych decyzyjnych (d , g_z , g_p) oraz addytywna względem zmiennych g_z i g_p . Kilka składowych

funkcji ma postać wykreślną lub stabelaryzowaną, a same zmienne decyzyjne są dyskretne i określone jako elementy znanych zbiorów.

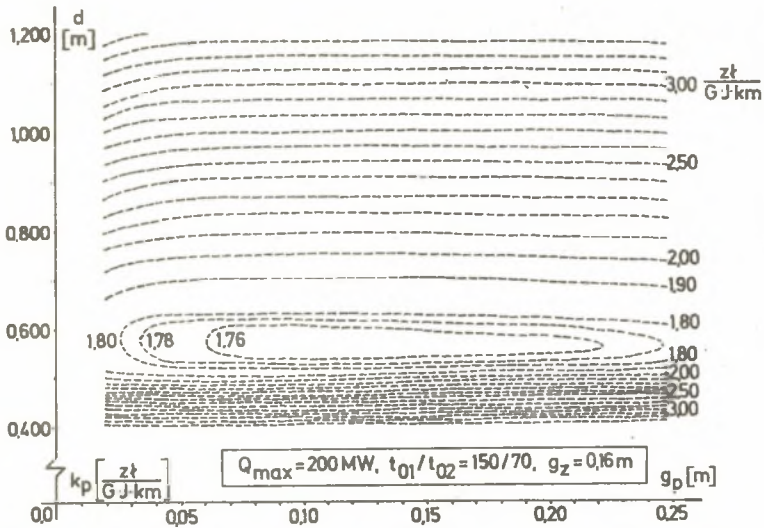
Do obliczeń użyto maszyny cyfrowej CDC 6316 w systemie CYBER-73 model 7216. Pamięć operacyjna dostępna dla użytkownika wynosi 32 K słów 60-bitowych. Szybkość działań procesora jest rzędu miliona instrukcji na sekundę.

Wybrana metoda rozwiązania jest zmodyfikowana metodą Gaussa-Seidla. Bardzo efektywnie wykorzystuje ona addytywność funkcji kryterium względem dwóch grubości izolacji. Modyfikacja polegała na wykorzystaniu wypukłości funkcji dla ustalenia kierunku poruszania się na początku obliczeń i określenia momentu zakończenia poszukiwania rozwiązania wzdłuż współrzędnych d , g_z i g_p . Duża szybkość obliczeń maszyny cyfrowej pozwoliła zaniedbać szukania wielkości kolejnych kroków wzdłuż współrzędnych, kolejne wartości zmiennych przyjmowano zgodnie z ich kolejnością występowania w zbiorach D i G .

Addytywność funkcji kryterium względem g_z i g_p oraz jej wypukłość względem wszystkich zmiennych decyzyjnych jest widoczna na rys. 4 i 5. Na rys. 4 przedstawiono linie o stałej wartości funkcji celu dla zmieniających się grubości izolacji g_z i g_p przy stałej dowolnej wartości średnicy ($k_p = f(g_z, g_p)$, $d = \text{const}$). Na rys. 5 natomiast pokazano linie o stałej wartości k_p dla pewnej ustalonej wartości grubości izolacji termicznej na zasilaniu, a zmieniających się wartościach średnic i grubości



Rys. 4. Linie stałej wartości kosztu przesyłu ciepła (k_p) w funkcji grubości izolacji na rurociągu zasilającym (g_z) i powrotnym (g_p)



Rys. 5. Linie stałej wartości kosztu przesyłu ciepła (k_p) w funkcji średnicy rurociągu (d) i grubości izolacji na rurociągu powrotnym (g_p)

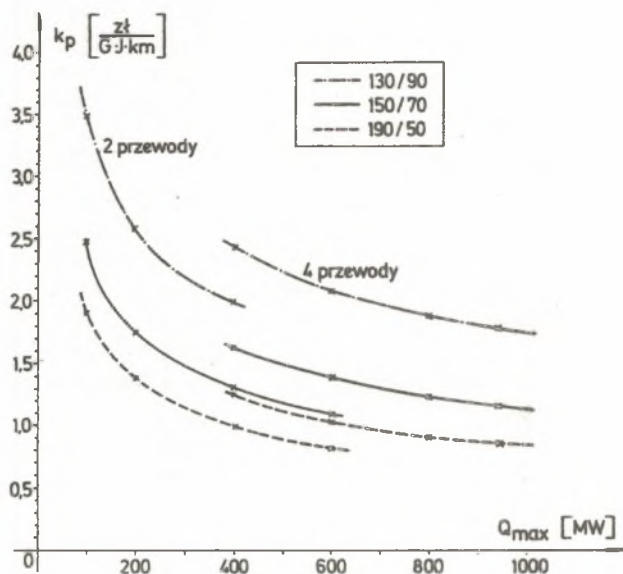
izolacji na powrocie ($k_p = f(d, g_p)$, $g_z = \text{const}$). Rysunki te są pewnymi przekrojami przestrzeni czterowymiarowej: 3 wymiary - to 3 zmienne decyzyjne, a czwarty wymiar to funkcja kryterium. Pozwalają one uzmysłowić charakter przebiegu zmian wartości funkcji celu przy zmianie poszczególnych zmiennych decyzyjnych. Charakter zmian wartości k_p w funkcji średnicy i grubości izolacji na zasilaniu, przy stałej wartości grubości izolacji na powrocie ($k_p = f(d, g_z)$, ($g_p = \text{const}$), jest podobny do wykresu $k_p = f(d, g_p)$, $g_z = \text{const}$. (rys. 5).

Obliczenia przeprowadzono za pomocą programu WARI wykorzystującego podprogramy obliczające spadki ciśnień na rurociągach, prędkości wody, nakłady inwestycyjne, nakłady na środki obrotowe, roczne koszty remontów bieżących i kapitałnych, osobowe, administracyjne, pompowania, strat ciepła na skutek przewodzenia i ubytku wody sieciowej, uzupełniania strat wody sieciowej.

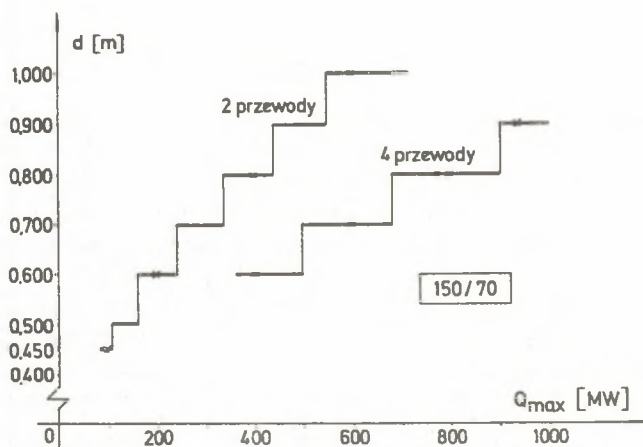
Czas obliczeń dla określonych wartości temperatur wody sieciowej i mocy ciepłowniczej wahał się od 4 do 7 sekund, a koszt obliczeń od 70 do 200 zł w zależności od użytego priorytetu programu.

6. Wyniki

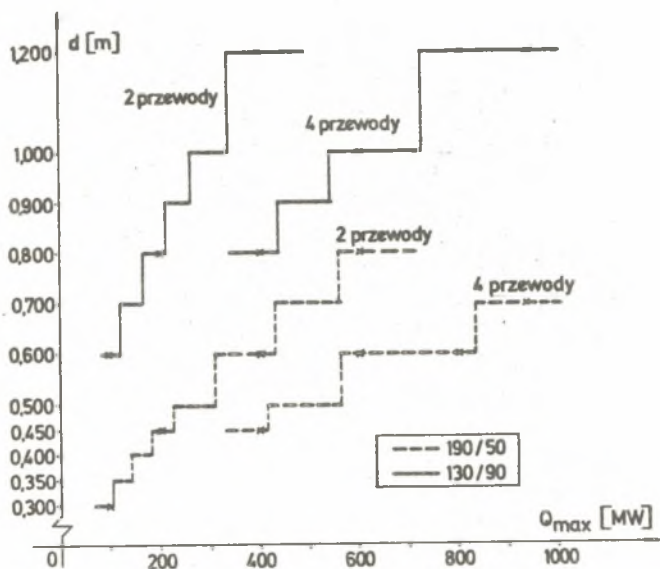
Przedstawiono je w postaci graficznej na rys. 6, 7, 8, 9, 10, 11. Pokazaliśmy koszt przesyłu ciepła i optymalne wartości zmiennych decyzyj-



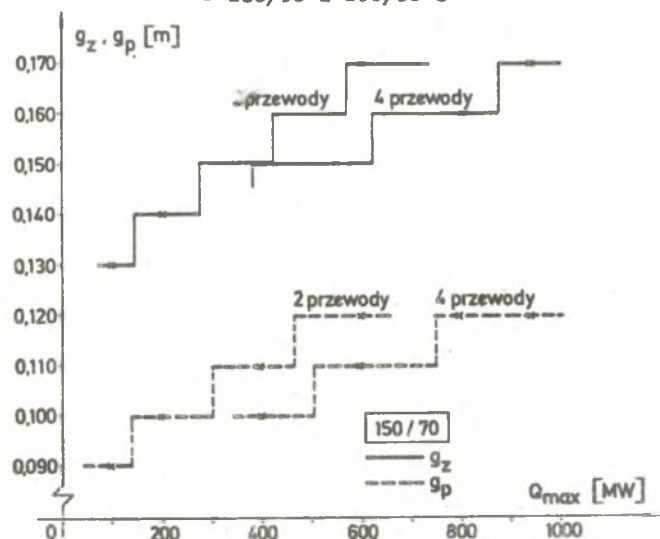
Rys. 6. Zależność kosztu przesyłu ciepła (k_p) od maksymalnej mocy ciepłowniczej (Q_{max}) dla różnych temperatur obliczeniowych wody sieciowej (t_{01}/t_{02})



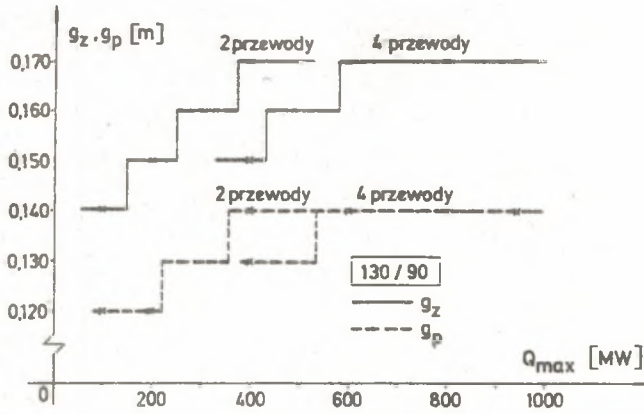
Rys. 7. Optymalna średnica magistrali ciepłowniczej (d) w funkcji maksymalnej mocy ciepłowniczej (Q_{max}), dla temperatur obliczeniowych $t_{01}/t_{02} = 150/70^{\circ}\text{C}$



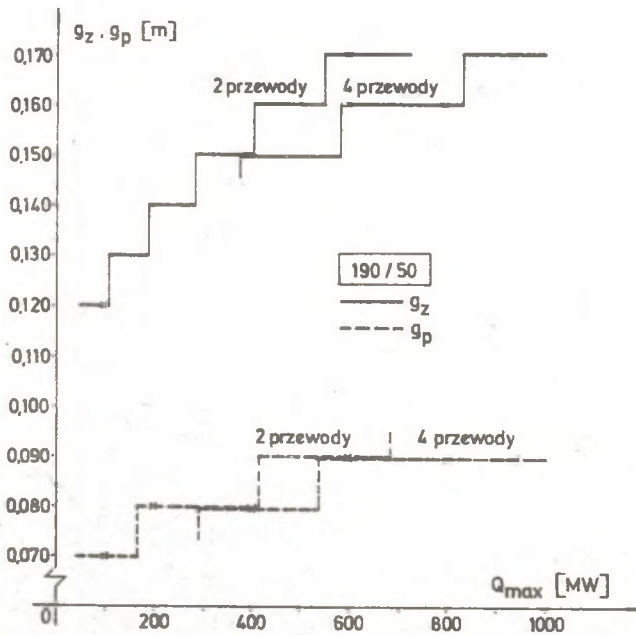
Rys. 8. Optymalna średnica magistrali ciepłowniczej (d) w funkcji maksymalnej mocy ciepłowniczej (Q_{max}), dla temperatur obliczeniowych $t_{01}/t_{02} = 130/90$ i $190/50^{\circ}\text{C}$



Rys. 9. Optymalna grubość izolacji termicznej na rurociągu zasilającym (g_z) i powrotnym (g_p) w funkcji maksymalnej mocy ciepłowniczej (Q_{max}), dla $t_{01}/t_{02} = 150/70^{\circ}\text{C}$



Rys. 10. Optymalna grubość izolacji termicznej na rurociągu zasilającym (g_z) i powrotnym (g_p) w funkcji maksymalnej mocy cieplowniczej (Q_{max}), dla $t_{01}/t_{02} = 130/90^\circ\text{C}$



Rys. 11. Optymalna grubość izolacji termicznej na rurociągu zasilającym (g_z) i powrotnym (g_p) w funkcji maksymalnej mocy cieplowniczej (Q_{max}), dla $t_{01}/t_{02} = 190/50^\circ\text{C}$

nych: średnicy rurociągu (d) oraz grubości izolacji termicznej na przewodzie zasilającym (g_z) i powrotnym (g_p); w zależności od zmiennych parametrycznych: maksymalnej mocy ciepłowniczej (Q_{\max}) oraz obliczeniowych temperatur wody sieciowej na zasilaniu (t_{01}) i na powrocie (t_{02}).

Wartość mocy przesyłanej zmienia się od 100 do 1000 MW przy stałej mocy ciepłowniczej EC, równej 2000 MW. Dla zakresu mocy Q_{\max} od 100 do 600 MW podano wyniki dla magistrali dwuprzewodowej, a od 400 do 1000 MW dla magistrali czteroprzewodowej.

Wykresy podano dla różnych wartości t_{01}/t_{02} , a mianowicie: $130^{\circ}\text{C}/90^{\circ}\text{C}$, $150^{\circ}\text{C}/70^{\circ}\text{C}$ i $190^{\circ}\text{C}/50^{\circ}\text{C}$. Wariant $130^{\circ}\text{C}/90^{\circ}\text{C}$ charakteryzuje się największymi wartościami minimalnego kosztu przesyłu ciepła magistralą, a wariant $190^{\circ}\text{C}/50^{\circ}\text{C}$ najmniejszymi z możliwych w rozpatrywanym zakresie zmian temperatur t_{01} (od 130 do 190°C) i t_{02} (od 50 do 90°C). Wariant $150^{\circ}\text{C}/70^{\circ}\text{C}$ reprezentuje temperatury obecnie stosowane w ciepłownictwie.

Wyniki przedstawione na ryc. 2, 3, 4 i 5 opisują charakter hiperpowierzchni $k_p = f(d, g_z, g_p)$ oraz zmiany w kierunku zwiększania się lub zmniejszania części składowych k_p przy zmianie d lub g .

Widoczna niesymetryczność hiperpowierzchni względem punktu optymalnego wskazuje, że najbliższe temu punktowi znormalizowane wartości zmiennych decyzyjnych nie muszą być najlepsze. Problem ten dotyczy najczęściej stosowanej i opisywanej w literaturze metody optymalizacji w oparciu o model ze zmiennymi ciągłymi.

Hiperpowierzchnia jest bardziej płaska w kierunku wartości większych od optymalnych. Przyjęcie wartości średnicy czy grubości izolacji za dużych spowoduje mniejszy wzrost kosztu przesyłu ciepła niż wtedy, gdy przyjmie się te wartości za małe (o taką samą wielkość). Informacja ta ma istotne znaczenie przy niepewnych założeniach co do przesyłanej mocy ciepłowniczej.

Wpływ niewłaściwie dobranej średnicy na koszt przesyłu ciepła jest kilkakrotnie (cztero-, pięciokrotnie) większy niż wpływ niewłaściwie dobranych grubości izolacji termicznych.

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛОВОЙ МАГИСТРАЛИ В ЛЮБЛИНСКОМ УГОЛЬНОМ БАССЕЙНЕ

Резюме

В статье представлен вопрос оптимизации конструкции тепловой магистрали при предложенных максимальных тепловых мощностях и температурах нагревательной воды.

OPTIMIZATION OF DESIGN OF HEAT MAIN CONDUITS
IN LUBLIN COAL BASIN

S u m m a r y

The problem of optimization of heat main conduits design for assumed intervals of boths maximal heat powers and network water temperatures has been discussed.

The form of applied unit transmission cost function regarded as a criterion has been given.