

Modelowanie numeryczne transportu chłodu w sieci centralnej klimatyzacji kopalni głębinowej

Marek Skowroński, Waldemar Sradomski, Paweł Borkowski

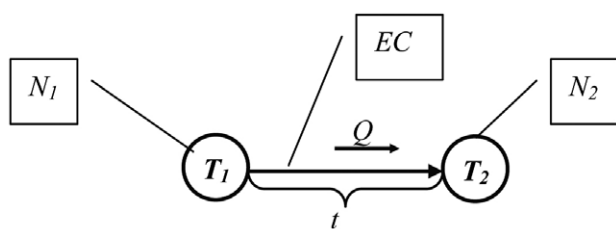
Rozległe sieci hydrauliczne stosowane są do transportu ciepła lub chłodu w układach ciepłowniczych lub klimatyzacyjnych. W pracy przedstawiono sposób matematycznego opisu sieci hydraulicznych i cieplnych tworzących rozległe sieci hydrauliczne. Przedstawiono podstawowe funkcje opisujące straty hydrauliczne i wymianę ciepła między cieczą w rurociągach i otoczeniem.

1. Metody opisu transportu ciepła, z wykorzystaniem cieczy nośnej, w złożonych i rozległych układach hydraulicznych

Przykładami takich układów są rozległe sieci ciepłownicze, współpracujące z zawodowymi ciepłowniami i elektrociepłowniami, oraz sieci klimatyzacji centralnej kopalń podziemnych.

Do transportu ciepła w tych układach jako nośnik energii cieplnej, wykorzystywana jest woda. Sieci ciepłownicze i klimatyzacyjne są układami zamkniętymi, w których krąży woda uzdatniona, o ściśle kontrolowanych parametrach fizykochemicznych.

Do opisu topologii sieci stosujemy teorię grafów. Podstawowym elementem sieci jest graf skierowany elementu cieplnego EC, przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Graf skierowany reprezentujący element cieplny, gdzie:

N_1 – węzeł początkowy;

N_2 – węzeł końcowy;

EC – element cieplny;

Q – przepływ przez element;

t – funkcja temperatury elementu cieplnego;

T_1 – temperatura w węźle początkowym;

T_2 – temperatura w węźle końcowym

W modelach matematycznych wirtualne obiekty – elementy cieplne EC – reprezentują zarówno właściwości hydrauliczne, jak i cieplne rzeczywistych elementów składowych sieci. Za pomocą tych obiektów możliwe jest opisanie wszystkich obiektów rzeczywistych, występujących w sieciach transportu ciepła, takich jak:

Streszczenie: Głębokie kopalnie wymagają sprawnej instalacji klimatyzacji, dlatego że temperatura skał na głębokości 1000 m jest powyżej 36°C. Klimatyzacja centralna kopalni składa się z umieszczonej na powierzchni stacji wytwarzającej wodę lodową, która następnie transportowana jest do wyrobisk. W czasie transportu wody lodowej następuje podgrzanie czynnika chłodzącego poprzez wymianę z otoczeniem i w wyniku strat przepływu. W artykule przedstawiono opis algorytmu określania temperatury wody lodowej w układzie pompowym klimatyzacji centralnej.

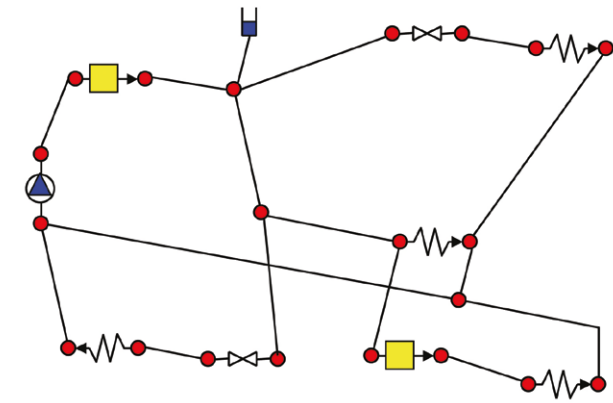
Abstract: Deep mines require efficient air conditioning installation, due to high temperature of rocks, which exceeds 36°C at the depth of 1000 metres. Central air conditioning of the mine consists of an ice water producing station placed on the surface, which is then transported to a working/pit. When transporting the ice water heating the cooling agent takes place due to the exchanges with the surrounding and as a result of some flow loss. In the article the algorithm was presented of the establishing ice water in the pumping system of the central air conditioning.

- źródła energii cieplnej: kotły, urządzenia klimatyzacyjne itp.;
- odbiorniki ciepła: wymienniki ciepła, chłodnice i nagrzewnice wentylatorowe itp.;
- rurociągi izolowane i nieizolowane wraz z wymianą ciepła z otoczeniem oraz procesami skraplania;
- zawory regulacyjne: dławiące, redukcyjne, maksymalne, stałego ciśnienia;
- pompy.






Rozległy układ pompowy, służący do transportu ciepła, składa się z następujących elementów – zgrupowanych w postaci list lub zbiorów:

- (ZC_i) – zbiór źródeł ciepła;
- (OC_i) – zbiór odbiorników ciepła;
- (R_i) – zbiór rurociągów;
- (P_i) – zbiór pomp;
- (Z_i) – zbiór zaworów regulacyjnych.

Elementy cieplne rozpięte są między węzłami, tworzącymi zbiór (W_i) . Ze względów obliczeniowych, co odpowiada także



Elementy cieplne tworzące układ transportu:

-  – źródło ciepła
-  – odbiornik ciepła
-  – pompa
-  – zawór
-  – rurociąg

Rys. 2. Abstrakcyjny model transportu ciepła

rzeczywistości, w zbiorze węzłów konieczne jest wyróżnienie co najmniej jednego węzła o ustalonych parametrach hydrauliczno-cieplnych. Zwykle węzeł ten (lub węzły) nazywany jest rezerwuarem i odpowiada on fizycznie istniejącemu zbiornikowi w układzie.

Model powiązań elementów w układzie transportu ciepła przedstawiono na rys. 2.

W sieciach ciepłowniczych źródłami są ciepłownie i elektrociepłownie zawodowe, a odbiornikami węzły cieplne i nagrzewnice wentylatorowe. W układach tych nośnikiem energii cieplnej jest gorąca woda. Ponieważ temperatura tej wody jest zwykle znacznie wyższa niż temperatura otoczenia, w rurociągach tranzytowych występują istotne straty przewodzenia od cieczy nośnej na zewnątrz, co powoduje obniżanie temperatury wody. Straty w pompach pracujących w układzie zwiększają lokalnie energię cieczy w miejscach ich zainstalowania, a straty hydrauliczne, występujące podczas przepływu, są rozproszone i zwiększają temperaturę cieczy w rurociągach w całym układzie.

W przypadku sieci klimatyzacyjnych źródłami chłodu są stacje klimatyzacyjne, wykorzystujące: chłodnie kominowe, wieże *free-cooling* lub stacjonarne urządzenia chłodnicze. W układach tych nośnikiem chłodu jest woda lodowa, której temperatura początkowa wynosi zwykle 1,5°C. Temperatura wody lodowej jest niższa od temperatury otoczenia i w tym przypadku podczas transportu występują straty chłodu, wynikające z przewodzenia ciepła z zewnątrz, od otoczenia do rurociągu, co powoduje wzrost temperatury wody i obniża jej walory chłodnicze. Dodatkowo temperatura wody wzrasta na skutek strat hydraulicznych. W układach tych stacje pompowe posadowione są na rurociągach powrotnych, co powoduje, że ich straty wewnętrzne w niewielkim stopniu oddziałują na bilans cieplny układu.

2. Opis matematyczny sieci dalekiego zasięgu

W rozpatrywanym modelu bierzemy pod uwagę obliczenia stacjonarne i nie uwzględniamy, w jednym kroku obliczeniowym, zmian parametrów pracy elementów cieplnych, spowodowanych np. zmianą prędkości obrotowej pomp, zmianą temperatury otoczenia i innych. Dla każdego połączenia cieplnego zdefiniowane są: funkcja przepływu i funkcja temperatury.

Jednoparametrowa funkcja przepływu $h(Q)$, niezależnie od typu elementu, opisuje różnicę wysokości energii hydraulicznej w węzłach elementu przepływowego.

$$h_{ij} = h(Q_{ij}) \quad (1)$$

Wartości funkcji przepływu są wyznaczane: dla rurociągów – na podstawie strat liniowych i miejscowych, dla pomp na podstawie charakterystyk energetycznych, dla zaworów na podstawie charakterystyk regulacyjnych.

Dwuparametrową funkcję temperatury $t(P_c, Q)$ możemy zapisać wzorem:

$$t_{ij} = f(P_c, Q) \quad (2)$$

Wartości przepływów w elementach cieplnych są określone w modułach obliczeń hydraulicznych. Na podstawie znanej wartości przepływu – Q , przy założeniu stałej wartości gęstości – ρ i ciepła właściwego – c_p , funkcja temperatury przyjmuje postać:

$$t_{ij} = \frac{P_{c_{ij}}}{Q_{ij} \cdot \rho \cdot c_p} \quad (3)$$

gdzie:

Q – przepływ;

ρ – gęstość;

c_p – ciepło właściwe;

P_c – strumień ciepła (moc cieplna).

Model elementu cieplnego, o ustalonej wartości mocy cieplnej P_c , przedstawiono na rys. 3.

Zgodnie z przyjętym założeniem transportu ustalonego, moc – P_c , gęstość – ρ i ciepło właściwe – c_p mają wartości stałe. Z analizy wzoru (3) wynika, że funkcja temperatury elementu cieplnego ma postać hiperboli, pokazanej na rys. 4.

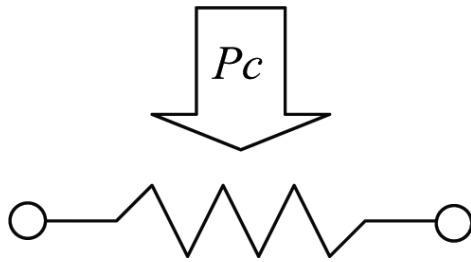
W transporcie ciepła szczególną rolę odgrywają rurociągi. Funkcja temperatury dla rurociągu opisana jest równaniem (4).

$$t_{ij} = \frac{1}{Q \cdot \rho \cdot c_p} (P_w + P_z) \quad (4)$$

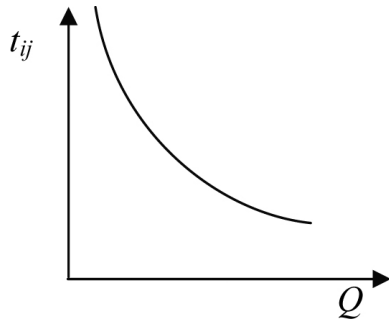
gdzie:

P_w – moc cieplna wynikająca z procesów wewnętrznych, np. oporów przepływu;

P_z – moc cieplna wynikająca z wymiany z otoczeniem.



Rys. 3. Schemat funkcjonalny elementu cieplnego



Rys. 4. Funkcja temperatury elementu cieplnego

Straty hydrauliczne w rurociągach całkowicie zamieniają się w ciepło, co można zapisać wzorem (5).

$$P_w = Q \cdot \Delta p = Q \cdot \Delta h \cdot \rho \cdot g \quad (5)$$

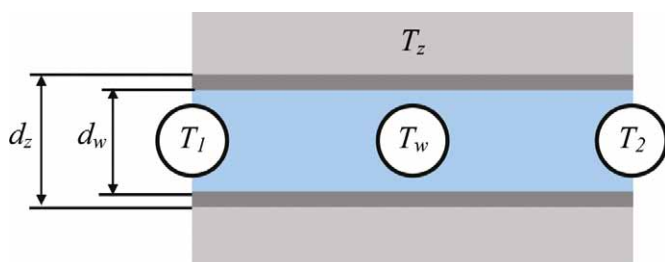
Opory przepływu w rurociągu opisuje wzór Darcy-Weisbacha. Na tej podstawie moc potrzebną do transportu cieczy nośnej określa wzór (6).

$$P_w = Q \cdot \rho \cdot g \cdot \left(\zeta + \lambda \frac{l}{d} \right) \frac{v^2}{2 \cdot g} = \left(\zeta + \lambda \frac{l}{d} \right) \cdot \frac{8 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot d^4} \cdot Q^3 \quad (6)$$

Jak wynika ze wzoru (6), moc cieplna strat wewnętrznych wzrasta z trzecią potęgą przepływu.

Podstawowy schemat obliczeniowy wymiany ciepła między cieczą nośną a otoczeniem pokazano na rys. 5.

Zmiany temperatury cieczy, między węzłami N_1 i N_2 połączeń cieplnych, są małe w porównaniu z różnicą temperatury wewnętrznej T_w i zewnętrznej T_z . Z wystarczającą dokładnością



Rys. 5. Schemat wymiany ciepła z otoczeniem w rurociągu

możemy przyjąć temperaturę cieczy T_w jako średnią wartość temperatur w węzłach końcowych elementu, wzór (7).

$$T_w = (T_1 + T_2) / 2 \quad (7)$$

Podstawowy wzór na moc cieplną wymiany z otoczeniem przez rurociąg opisują wzory (8) i (9).

$$P_z = \pi \cdot L \cdot k \cdot (T_z - T_w) \quad (8)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_w \cdot d_w} + \frac{\ln\left(\frac{d_z}{d_w}\right)}{2\lambda} + \frac{1}{\alpha_z \cdot d_z}} \quad (9)$$

gdzie:

L – długość rury;

k – współczynnik przenikania;

T_z – temperatura zewnętrzna;

T_w – temperatura wewnętrzna;

α_z – współczynnik wnikania ciepła na zewnątrz;

α_w – współczynnik wnikania ciepła wewnątrz;

λ – współczynnik przewodzenia;

d_z – średnica zewnętrzna;

d_w – średnica wewnętrzna.

W ogólnym przypadku wzór na moc cieplną zewnętrzną jest złożoną funkcją wielu zmiennych.

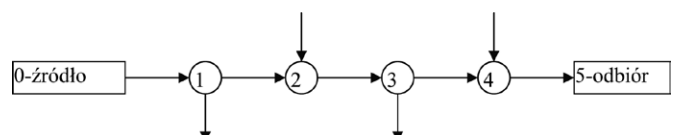
3. Analiza profilu temperatur sieci ciepłowniczej

W przypadku, gdy mamy do czynienia z siecią, w której występują źródła dominujące i odbiory strategiczne ciepła, stosowana jest pogłębiona analiza profilu transportu ciepła. W analizie tej, oprócz sprawności i wskaźników strat transportu, kluczowe znaczenie ma temperatura czynnika (cieczy nośnej) w końcowym węźle odbiornika.

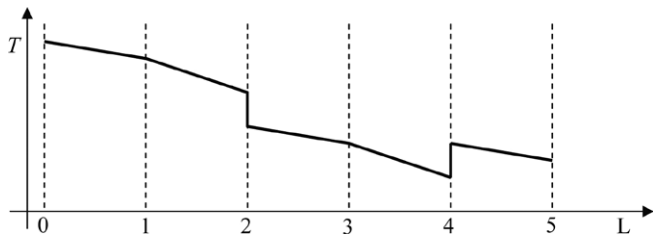
Przykład transportu po wybranej ścieżce przedstawiono na rys. 6.

Odpiły z węzła, jak to ma miejsce w węzłach 1 i 3, powodują zwiększenie prędkości transportu w połączeniach poprzedzających, odpowiednio: 01 – dla węzła 1 i 01, 12, 23 dla odpiły z węzła 3.

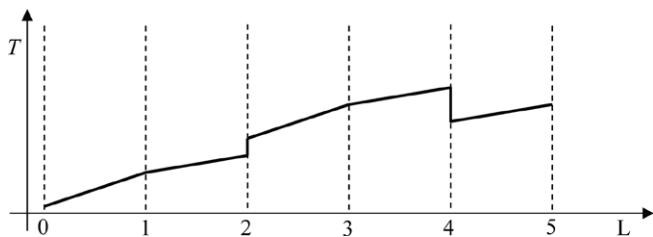
Dopływy do węzłów, jak to ma miejsce w węzłach 2 i 4, powodują skokową zmianę temperatury cieczy nośnej w węźle.



Rys. 6. Ścieżka transportu ciepła wydzielona ze złożonej pierścieniowej sieci pompowej



Rys. 7. Profil temperatur wybranej ścieżki zasilającej w sieci ciepłowniczej



Rys. 8. Profil temperatur wybranej ścieżki zasilającej w sieci klimatyzacyjnej

Przykładowy przebieg profilu temperatury w sieci ciepłej i sieci klimatyzacyjnej przedstawiono na rys. 7 i 8.

4. Wybór ścieżki analizy

Transport w sieciach pierścieniowych może się odbywać różnymi drogami.

Wybór ścieżki do analizy jest określany arbitralnie przez projektanta lub automatycznie, według określonego kryterium transportu.

Automatyczny wybór ścieżki analiz przepływowo-ciepłnych jest uzasadniony w przypadku rozległych sieci o zmiennej strukturze, odznaczających się dużą liczbą węzłów i połączeń.

W takich przypadkach pracochłonność, a zatem i czas wyboru przez operatora reprezentatywnej ścieżki transportu, wraz z pozyskiwaniem danych do analizy, jest wyjątkowo długi.

Dysponując modelem sieci zapisanym w postaci grafu, do automatycznego wyszukiwania ścieżek transportu możemy wykorzystać algorytm Dijkstry.

Do analiz stosujemy kilka termodynamicznych kryteriów wyszukiwania profilu ścieżki transportu ciepła, dla poszczególnych elementów ciepłych:

- maksymalnego przepływu Q ;
- minimalnej długości rurociągu;
- maksymalnego strumienia ciepła $Q(T-T_0)$;
- minimalnych strat hydraulicznych Δh ;
- minimalnych strat ciepłych ΔP_c .

Na podstawie wybranego kryterium dla wszystkich połączeń określana jest wartość ich wag.

7. Podsumowanie

Możliwość automatycznego wyszukiwania ścieżki pozwala na znaczne skrócenie czasu analizy sieci. Jest to szczególnie ważne w przypadku, gdy sieć jest systemem o szybko zmieniających się parametrach i topologii, np. w systemach klimatyzacyjnych kopalni podziemnych.

Literatura

- [1] SKOWROŃSKI M.: *Układy pompowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2009.
- [2] SKOWROŃSKI M.: *HydroNet aplikacja własna*, 2010.

✉ Marek Skowroński - Politechnika Wroclawska
Waldemar Sradomski - Politechnika Wroclawska
Paweł Borkowski - KGHM OZG Rudna

artykuł recenzowany