

$$d_i = \left[\frac{C_i Q_i^{r_M} \sum_{i=1}^m l_i \left(\frac{n_i}{n_i \cdot b_i \cdot C_i} \cdot \frac{r_M \cdot n_i}{m} \cdot Q_i \right)^{\frac{m}{n_i+m}}}{\left(\frac{n_i}{n_i \cdot b_i \cdot C_i} \cdot \frac{r_M \cdot n_i}{m} \cdot Q_i \right)^{\frac{m}{n_i+m}} (H_z - H_o)} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (1)$$

gdzie:

i — indeks przewodu,
 z — indeks ciągu przewodów,
 d_i — średnica przewodu i ,
 C_i, r_M, m — czynnik zależny od chropowatości rurociągu i wykładniki potęgowe we wzorze Manninga.

$$I_i = C_i Q_i^{r_M} d_i^{-m} \quad (1a)$$

I_i — spadek hydrauliczny,
 Q_i — obliczeniowe natężenie przepływu w przewodzie i ,
 b_{a_i}, b_i, n_i — czynniki funkcji aproksymującej koszt a_i budowy 1 m przewodu o średnicy d_i

$$a_i = b_{a_i} + b_i \cdot d_i^{n_i} \quad (1b)$$

H_o — napór w węźle końcowym układu,
 H_z — napór w węźle początkowym ciągu z ,
 l_i — długość rurociągu.

Dla rozwiązania zadania poszukiwania optymalnych średnic rurociągów za pomocą wzoru (1), układ tranzytowy (który jest układem rozgałęzionych rurociągów) został sztucznie podzielony na ciągi szeregowo połączonych przewodów od poszczególnych pompowni do węzła końcowego. Początkowo każdy z ciągów wymiarowany jest oddzielnie, a następnie prowadzona jest korekta średnic rurociągów wspólnych w układzie oraz pozostałych. Obliczeniowe natężenia przepływów w poszczególnych przewodach ustalane są z zasady ciągłości przepływu, wykorzystując założone wydajności poszczególnych pompowni. Wydajność ta jest równa iloczynowi maksymalnego godzinowego natężenia dopływu ścieków ze zlewni do zbiornika wyrównawczego i współczynnika bezpieczeństwa $w \geq 1,0$. Napory rozporządzalne dla poszczególnych ciągów wyznaczane są jako różnice naporów wytworzonych przez pompę, odpowiadających założonym wydajnościom Q_{obl} i geometrycznych wysokości podnoszenia ścieków.

Metoda mnożników Lagrange'a [3] stosowana dla wyznaczenia optymalnych średnic dla założonego zestawu pomp, pozwala je obliczać równocześnie we wszystkich rurociągach układu. Zadanie wymiarowania układu tą metodą polega na wyznaczeniu spadków hydraulicznych w poszczególnych przewodach, które minimalizują koszt układu:

$$KB = \sum_{i=1}^{N_u} \left(b_{a_i} + b_i C_i \frac{n_i}{m} \cdot Q_i \frac{r_M \cdot n_i}{m} \cdot I_i \frac{n_i}{m} \right) I_i \quad (2)$$

oraz spełniają układ równań liniowych:

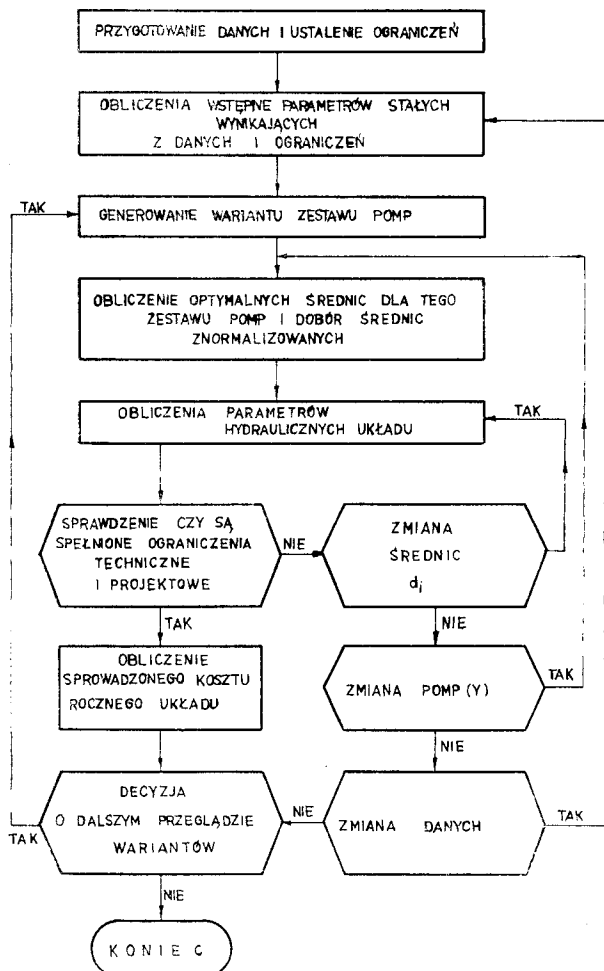
$$\sum_{i \in z} I_i I_i - \Delta H_z = 0 \quad \text{dla } z=1, 2, \dots, N_z \quad (3)$$

gdzie:

KB — koszt budowy układu,
 $\Delta H_z = H_z - H_o$ — rozporządzalny napór ciągu z ,
 N_z — liczba ciągów przewodów równa liczbie pompowni w układzie.

Układ równań dla wyznaczenia spadków hydraulicznych w przewodach jest układem równań nieliniowych i rozwiązuje się go metodą kolejnych przybliżeń. Znając spadki energetyczne w przewodach $\Delta H_i = I_i \cdot l_i$, można dla założonych obliczeniowych natężeń przepływów wyznaczyć średnice poszczególnych rurociągów d_i . Niezależnie od metody optymalnego doboru średnic, ogólny algorytm (rys. 3) dla wymiarowania optymalnego tranzytowego układu ciśnieniowego jest identyczny.

Przed przystąpieniem do obliczeń przy użyciu mikrokomputera konieczne jest odpowiednie odwzorowanie elementów układu i przygotowanie danych. W programie obliczeniowym rurociągi i pompy zostały odwzorowane za po-



Rys. 3. Ogólny algorytm optymalnego wymiarowania tranzytowego układu ciśnieniowego.

mocą łuków. Zbiorniki wyrównawcze, miejsca połączeń rurociągów z różnych pompowni oraz wylot z ostatniego rurociągu zostały odwzorowane za pomocą węzłów. Dla zrealizowania obliczeń konieczne są następujące dane:

- wartości stanów dopływu ścieków z poszczególnych zlewni (q_{ik}) do zbiorników wyrównawczych w pompowni i czasy ich trwania w roku (t_{ik}),
- rzędne poziomów zwierciadeł ścieków (H_i) w zbiornikach wyrównawczych: minimalna ($H_{i \min}$) i maksymalna ($H_{i \max}$),
- rzędna osi wylotu rurociągu w węźle końcowym układu,
- rzędne wszystkich pozostałych węzłów układu,
- zestaw produkowanych średnic rurociągów oraz odpowiadające im wskaźnikowe koszty wykonania 1 mb rurociągu w określonych warunkach gruntowych,
- wartość minimalnej średnicy możliwej do zastosowania w danych warunkach,
- minimalne pojemności zbiorników przy pompowniach ($V_{i \min}$) wynikające ze względów konstrukcyjnych,
- minimalne czasy trwania cyklu pracy pomp w pompowniach (T),
- maksymalne dopuszczalne prędkości w rurociągach ($V_{\max}$),
- maksymalne i minimalne dopuszczalne wysokości ciśnień w węzłach układu ($p_{\min}/\gamma$ i $p_{\max}/\gamma$),
- współczynniki ekonomiczne charakterystyczne dla inwestycji tego typu: stopa procentowa (r), stawka amortyzacyjna (s), współczynnik uwzględniający nakłady na remonty bieżące (β),
- cena energii elektrycznej,
- współczynnik chropowatości (n) i współczynniki potęgowe (r_M) i (m) do wzoru Manninga,
- długość (l), chropowatość bezwzględna ścian (K) oraz współczynniki oporów lokalnych poszczególnych rurociągów,
- współczynnik $w \geq 1$ pozwalający ustawić obliczeniową wydajność pompy (Q_{obl}) w zależności od maksymalnego dopływu ścieków ($g_{i \max}$),

oraz bank pomp wybranych spośród pomp produkowanych możliwych do wykorzystania przy rozwiązywaniu problemu wymiarowania danego układu. Dla każdego typu pompy znane muszą być współrzędne charakterystyki $\Delta H_i = f(Q_i)$ w zakresie zalecanej sprawności, wydajności $Q_{i \text{ nom}}$ oraz wysokości podnoszenia $\Delta H_{i \text{ nom}}$, odpowiadające największej wartości współczynnika sprawności η_{nom} .

Dysponując bankiem pomp, Q_{obl} i wysokością geometryczną podnoszenia, można wstępnie dobrać pompy dla poszczególnych pompowni w różnych wariantach. W następnym kroku dla poszczególnych wariantów pomp poszukuje się (wykorzystując jedną z metod doboru średnic optymalnych) optymalnych średnic wszystkich rurociągów. Tak uzyskane rozwiązanie układu

podlega ocenie pod kątem spełnienia wszystkich ograniczeń. W tym celu wykonuje się obliczenia hydrauliczne uwzględniając współpracę wszystkich elementów układu, tzn. dobranych pomp i wymiarowanych rurociągów dla charakterystycznych stanów ścieków w zbiornikach wyrównawczych pompowni. Obliczenia te wykonywane są metodą kolejnych przybliżeń przez równoważenie energii w ciągach przewodów, wykorzystując podstawowe zależności dla wyznaczania strat energetycznych w rurociągach [8]. Na podstawie uzyskanych wyników obliczeń hydraulicznych sprawdza się:

- czy wydajności pomp mieszczą się w zakresie zalecanej sprawności,
- czy prędkości w rurociągach nie przekraczają prędkości maksymalnej dopuszczalnej ($V_{\max}$),
- czy wysokości ciśnień w węzłach układu są mniejsze od maksymalnych dopuszczalnych $p_{\max}/\gamma$ i większe od minimalnych dopuszczalnych $p_{\min}/\gamma$,
- czy największe wydajności pomp (przy $H_{i \max}$) są większe od maksymalnego dopływu ścieków ($q_{i \max}$).

Jeżeli wszystkie ograniczenia są spełnione, to rozwiązanie należy uznać za dopuszczalne, w przeciwnym przypadku należy ocenić w jakim stopniu ograniczenia nie są spełnione i podjąć decyzję o zmianie średnicy d_i w jednym lub kilku przewodach, powtórnie wykonać obliczenia hydrauliczne oraz dokonać oceny spełnienia ograniczenia lub przystąpić do analizy nowego zestawu pomp.

Dla wariantów dopuszczalnych wyznaczany jest sprowadzony roczny koszt inwestycyjny i eksploatacyjny układu, z uwzględnieniem zmienności natężeń dopływu ścieków do poszczególnych pompowni.

$$K_r = A \cdot a_i \cdot l_i + 3600 \delta \cdot \gamma \sum_{i \in P}$$

$$\sum_K \frac{(Q_{i \text{ sr}} Q_{i \text{ k}} - Q_{i \text{ k}}^2)}{V_i} \Delta H_{\text{sr}} \frac{t_k}{\eta_{i \text{ sr}}} \quad (4)$$

gdzie:

- A — współczynnik ekonomiczny wynikający z przepisów dotyczących oceny efektywności inwestycji,
- a_i — koszt budowy 1 mb rurociągu o średnicy d_i ,
- δ — koszt energii,
- γ — ciężar właściwy ścieków,
- $Q_{i \text{ sr}}$ — średnia wydajność pomp,
- $Q_{i \text{ k}}$ — natężenie dopływu ścieków do zbiornika przy pompowni o czasie trwania t_k [h],
- V_i — obliczona pojemność zbiornika, zależna od wydajności pomp i maksymalnego dopływu do niego ścieków,
- ΔH_{sr} — średnia wysokość podnoszenia pomp,
- k — indeks stanów dopływów ścieków $k=1, 2, \dots, N_{wz}$,

Σ — suma algebraiczna obliczona tylko dla $\sum_{i \in P}$ pomp układu.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskuje się zestaw rozwiązań dopuszczalnych z obliczonymi sprowadzonymi rocznymi kosztami budowy i eksploatacji, z których projektant może wybrać jedno do realizacji.

Dla każdego rozwiązania dopuszczalnego, oprócz sprowadzonego kosztu, uzyskuje się następujące informacje:

- zestaw typów pomp dla poszczególnych pompowni układu,
- wymiary optymalne średnic dla wszystkich rurociągów układu,
- wyniki obliczeń hydraulicznych: natężenia przepływów Q_i i odpowiadające im różnice naporów ΔH_i we wszystkich elementach, tzn. w rurociągach i pompach, przebieg linii energii i wysokości ciśnień we wszystkich węzłach, wartości prędkości, niezbędne pojemności zbiorników wyrównawczych pompowni oraz informacje o spełnieniu ograniczeń.

W czasie realizacji obliczeń projektant może kontrolować przebieg wymiarowania i ingerować przez zmianę różnych parametrów.

Wnioski

1. Wykorzystując przedstawiony algorytm optymalnego wymiarowania tranzytowych układów ciśnieniowych zostały opracowane dwa programy na mikrokomputer. Dla doboru optymalnych średnic w jednym wykorzystano metodę wzorów analitycznych, a w drugim metodę Lagrange'a. Stosując oba programy dla rozwiązania tego samego zadania uzyskuje się identyczne wyniki. Zatem metody wzajemnie się weryfikują.

2. Opracowany algorytm dotyczy optymalnego wymiarowania tranzytowego układu ciśnieniowego dla zadanej lokalizacji pompowni, rzutu ścieków i zadanych tras przewodów. Dzięki szybkiemu uzyskiwaniu rozwiązań ten sam algorytm może być również stosowany do poszukiwania optymalnych tras przewodów przez przegląd innych możliwych ich przebiegów.

LITERATURA

1. H. BYLKA: Podstawy projektowania optymalnych układów pompowych współpracujących z przewodem magistralnym. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, 1978.
2. E. HARASYMOWICZ, W. NIEDZIELSKI, M. SOWIŃSKI: Metody analizy hydraulicznej i optymalizacji elementów układu wiejskiej kanalizacji grupowej. Etap II Programu Resortowego R.VI.6, Poznań, 1984.
3. E. HARASYMOWICZ, J. KACZMAREK, W. NIEDZIELSKI: Algorytmy i programy obliczeń hydraulicznych i optymalizacji elementów wiejskiej kanalizacji grupowej. Etap III Programu Resortowego R.VI.6, 1985.
4. E. HARASYMOWICZ, J. KACZMAREK, W. NIEDZIELSKI: Opracowanie metod projektowania optymalnych układów grawitacyjno-ciśnieniowej kanalizacji grupowej na terenach wiejskich. Etap I w CPBR-10.8.5.1.A.40, Poznań 1987.
5. H. BYLKA, J. CIESIELSKI, E. HARASYMOWICZ: Dobór optymalnych średnic przewodów oraz parametrów zasilania sieci wodociągowej dla rozwijającej się w czasie aglomeracji miejsko-przemysłowej. Temat PR.01.06.03. Zadanie 06.03.02.02., Poznań 1983.
6. H. BYLKA, J. KACZMAREK, H. MAJCHEREK: Algorytmy i programy obliczeniowe zadań analizy hydraulicznej, technologicznej i ekonomicznej. Etap III Programu Resortowego II.6, Poznań, 1985.
7. Zasady oceny ekonomicznej efektywności inwestycji gospodarki komunalnej. Min. Adm. Gosp. Teren. i Ochrony Środowiska, Warszawa 1977.
8. PN-77/M-34034: Rurociągi, Zasady obliczeń strat ciśnienia.

Artykuł został przygotowany w ramach pracy CPBR nr 10.8.5.1. „Zaopatrzenie wsi w wodę”, koordynowanej przez IMUZ Falenty.

OPTIMUM DESIGN OF PRESSURE-PIPED GROUP SEWERS

An algorithm has been established for the optimum dimensioning of a transit pressure-pipe system (which is to work in a rural group sewer) on a microcomputer. The optimum solution to the problem may be found by the appropriate choice of pumps and pipe diameters when the location of the pumping station, the points of sewage discharge and the route of the pipeline are known. While constructing the

algorithm, pumps were selected by the method of variant analysis, and pipe diameters were chosen by the following two methods: in terms of analytical formulae (which had been derived for a set of in-series connected pipes) and in terms of the modified Lagrange multiplier procedure, with the annual agglomerated cost as the criterion for the assessment and choice of the appropriate variant. The microcomputer programme developed via this algorithm makes it possible to follow the course of the dimensioning procedure, as well as any intervention by the designer during execution of the calculation process.