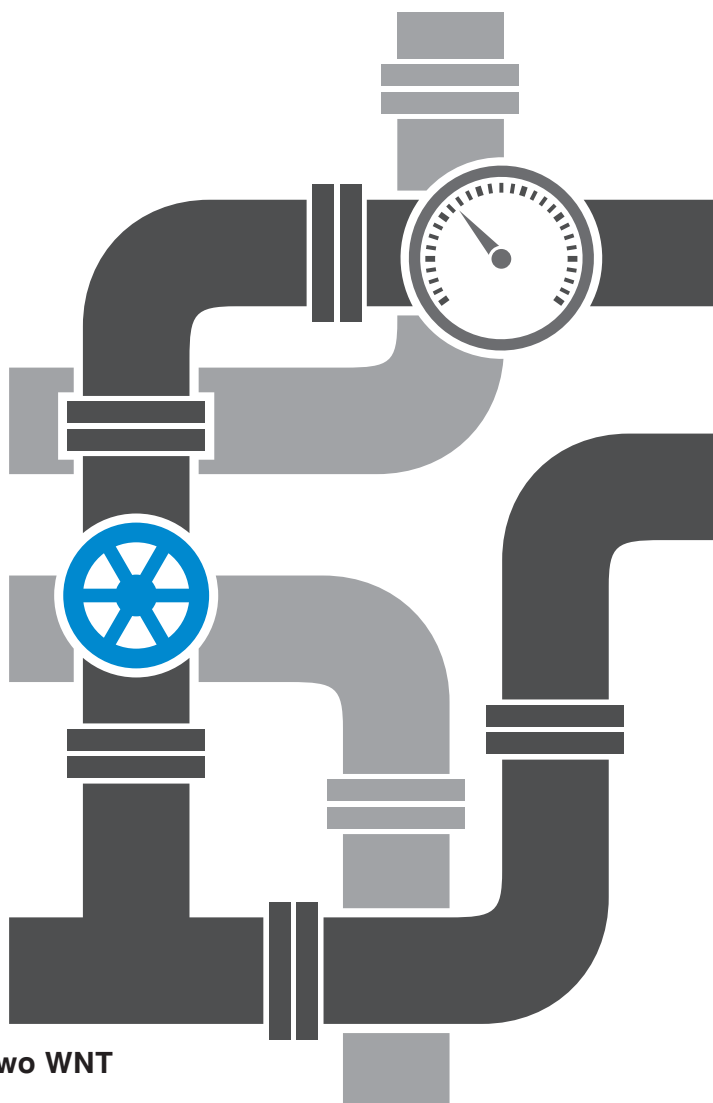


Czesław Grabarczyk

HYDRAULIKA

URZĄDZEŃ WODOCIĄGOWYCH

2 tom



Wydawnictwo WNT

HYDRAULIKA

URZĄDZEŃ

WODOCIĄGOWYCH

*Książkę tę dedykuję Słuchaczom moich wykładów,
które prowadziłem w okresie 50 lat
na Politechnice Warszawskiej, Politechnice Poznańskiej
i w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego.*

Czesław Grabarczyk

HYDRAULIKA

URZĄDZEŃ

WODOCIĄGOWYCH

2^{tom}



Wydawnictwo WNT

Opiniodawcy:

prof. dr hab. inż. Karol Kuś

prof. zw. dr hab. inż. Jan Pawelek

Redaktor: *Ewa Kiliś*

Projekt okładki i stron tytułowych: *Anna Gogolewska*

Ilustracja na okładce: ©*Tribalium/shutterstock*

Redaktor techniczny: *Anna Szeląg*

Korekta: *Halina Stykowska*

Skład i łamanie: *AnnGraf*

Wydawca: *Adam Filutowski*

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo

Więcej na www.legalnakultura.pl

Polska Izba Książki

Copyright © by Wydawnictwo WNT

Warszawa 2015

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA

Warszawa 2017

ISBN 978-83-01-19384-3 całość

ISBN 978-83-01-19386-7 tom 2

Wydanie I – 1 dodruk (PWN)

Warszawa 2017

Wydawnictwo Naukowe PWN SA

02-460 Warszawa, ul. Gottlieba Daimlera 2

tel. 22 69 54 321, faks 22 69 54 288

infolinia 801 33 33 88

e-mail: pwn@pwn.com.pl; reklama@pwn.pl

www.pwn.pl

Druk i oprawa: OSDW Azymut Sp. z o.o.

SPIS TREŚCI

ZESTAWIENIE NAJCZĘŚCIEJ STOSOWANYCH SYMBOLI	7
1. PODSTAWY OBLICZANIA PIERŚCIENIOWYCH SIECI WODOCIĄGOWYCH...	15
1.1. Podstawowe pojęcia i klasyfikacje	15
1.2. Założenia upraszczające do metod obliczeniowych	19
1.3. Związek między liczbą elementów sieci pierścieniowych	20
1.4. Podstawowe równania układu sieciowego	22
1.5. Sformułowanie zadań hydraulicznego obliczania sieci wodociągowych	28
1.6. Analiza liczby rozporządzalnych równań	30
1.7. Opis topologiczny układów hydraulicznych. Zastosowanie teorii grafów	34
1.7.1. Wprowadzenie	34
1.7.2. Podstawowe definicje i twierdzenia teorii grafów	37
1.7.3. Metody odwzorowywania geometrycznej budowy sieci	42
1.7.4. Macierzowe odwzorowania grafu	43
1.7.5. Odwzorowanie grafu zbiorami incydencji	51
1.8. Wprowadzenie do budowy algorytmów obliczeń	54
1.8.1. Ogólne pojęcia i zasady. Schematy blokowe algorytmów	54
1.8.2. Algorytmy obliczenia przepływów w przewodach	60
Bibliografia	66
2. METODY OBLICZANIA SIECI PIERŚCIENIOWYCH	67
2.1. Wprowadzenie	67
2.2. Metody zakładające wstępne spełnienie I prawa Kirchhoffa	68
2.2.1. Metody poprawiania Q_k w przewodach sieci	68
2.2.2. Metoda poprawiania spadków naporów ΔH_k w przewodach	101
2.3. Metody zakładające wstępne spełnienie II prawa Kirchhoffa	106
2.3.1. Metody poprawiania naporów H_j w węzłach	107
2.3.2. Metoda poprawiania spadków naporów ΔH_k w przewodach	118
2.4. Powiązania między metodami i analiza porównawcza	124
2.5. Energochłonność sieci pierścieniowej	127
Bibliografia	129
3. METODY OBLICZANIA POMPOWNI WODOCIĄGOWYCH	134
3.1. Wprowadzenie	134
3.2. Metody obliczania układu pompowego	135
3.2.1. Budowa modelu	135
3.2.2. Ocena opisu matematycznego pompowni	143
3.2.3. Sformułowanie zadań hydraulicznego obliczania pompowni	144

3.2.4.	Metody rozwiązywania zadań	145
3.2.5.	Wnioski i uwagi końcowe	165
3.3.	Współdziałanie kilku pompowni	166
3.3.1.	Zagadnienia łączenia układów wodociągowych	166
3.3.2.	Analiza współdziałania jednej pompowni z rozgałęzioną siecią	167
3.3.3.	Sformułowanie zadań obliczeniowych	169
3.3.4.	Współdziałanie kilku pompowni z rozgałęzioną siecią	170
3.3.5.	Uwagi końcowe	185
	Bibliografia	186
4.	WSPÓLDZIAŁANIE ZBIORNIKA Z UKŁADEM WODOCIĄGOWYM	187
4.1.	Wprowadzenie	187
4.1.1.	Wstępne określenie przedmiotu rozważań	187
4.1.2.	Budowa i ogólne zasady działania układów wodociągowych	188
4.1.3.	Zbiorniki w układach wodociągowych	192
4.1.4.	Zakres rozważań i sformułowanie zagadnień	198
4.2.	Warunki współdziałania elementów składowych układu	201
4.2.1.	Współdziałanie zbiornika wieżowego z siecią	201
4.2.2.	Współdziałanie pompowni z siecią ze zbiornikiem końcowym	205
4.2.3.	Określenie wydajności pompowni sieci ze zbiornikiem końcowym	206
4.3.	Analiza warunków działania wybranych układów	212
4.3.1.	Wstępne uwagi ogólne	212
4.3.2.	Układ z początkowym zbiornikiem sieciowym	215
4.3.3.	Układ ze zbiornikiem końcowym	217
4.3.4.	Układ bez zbiornika wieżowego	219
4.3.5.	Warunki działania układu podczas gaszenia pożaru	221
4.3.6.	Wyznaczanie pojemności użytkowej zbiornika górnego	223
4.3.7.	Uogólniony model obliczeniowy układu wodociągowego	229
4.4.	Wpływ rozbioru wody na wielkość zbiornika	232
4.4.1.	Zapotrzebowanie na wodę w miastach i osiedlach	232
4.4.2.	Wyznaczanie objętości użytkowej zbiorników	243
4.4.3.	Uwagi i wnioski końcowe	251
	Bibliografia	252
5.	UDERZENIA HYDRAULICZNE	255
5.1.	Wstępne określenie zjawiska	255
5.2.	Techniczne warunki wywołujące zjawisko	256
5.3.	Opis uderzenia hydraulicznego w przewodzie tłocznym pompy	256
5.4.	Mechanizm uderzenia hydraulicznego	258
5.5.	Zależności obliczeniowe dla wielkości uderzenia hydraulicznego	260
5.6.	Metody tłumienia uderzeń hydraulicznych	268
5.7.	Układ równań przebiegu uderzenia hydraulicznego	283
5.8.	Przegląd metod analizy przebiegu uderzenia hydraulicznego	293
5.9.	Metoda charakterystyk analizy uderzenia hydraulicznego	295
5.9.1.	Określenie rodzaju układu równań Allievięgo–Streetera	295
5.9.2.	Sformułowanie zagadnienia Cauchy'ego	296

5.9.3. Wyprowadzenie metody charakterystyk przez zamianę zmiennych niezależnych	297
5.9.4. Wyznaczanie charakterystyk	302
5.10. Zastosowanie metody charakterystyk do rozwiązywania układu równań uderzeń hydraulicznych	303
5.11. Kryterium stabilności metody charakterystyk	312
5.12. Warunki graniczne uderzenia hydraulicznego	312
5.13. Uwagi końcowe	314
Bibliografia	315
6. REGULACJA UKŁADÓW WODOCIĄGOWYCH	322
6.1. Wprowadzenie	322
6.2. Zastosowania zaworów regulacyjnych w technice wodociągowej	326
6.3. Zawór główny	327
6.4. Ogólny opis budowy i wyposażenia instalacji sterującej	332
6.5. Przegląd rodzajów zaworów sterujących i ich zastosowań	333
6.5.1. Zawór ZSA do redukcji ciśnienia wylotowego	334
6.5.2. Zawór ZSB do regulacji natężenia przepływu	335
6.5.3. Zawór ZSC do regulacji spadkiem ciśnienia	335
6.5.4. Zawór ZSD do zmniejszania ciśnienia wlotowego	336
6.5.5. Zawór ZSE do regulacji różnicy ciśnień	337
6.5.6. Uwagi uzupełniające	338
6.6. Zawór redukujący ciśnienie wylotowe	339
6.7. Zawór regulacji natężenia przepływu	340
6.8. Uwagi ogólne dotyczące instalacji sterujących	343
6.9. Wnioski i uwagi końcowe	345
Bibliografia	346
7. POWIETRZE W PRZEWODACH WODOCIĄGOWYCH	348
7.1. Zagadnienia występowania powietrza w przewodach	348
7.2. Zadania zaworów odpowietrzająco-napowietrzających	350
7.3. Przegląd konstrukcji zaworów i zasad ich działania	351
7.4. Ogólne sformułowanie zagadnień obliczeniowych	357
7.5. Zagadnienia prędkości samoodpowietrzania	359
7.6. Analiza porównawcza stanu wiedzy	359
7.7. Dotychczasowe zasady określania prędkości samoodpowietrzania	362
7.8. Eksperymentalna weryfikacja prędkości samoodpowietrzania	364
7.8.1. Budowa instalacji eksperymentalnej i metodyka badań	364
7.8.2. Warunki podobieństwa modelowania	365
7.8.3. Wyniki badań	368
7.8.4. Wnioski końcowe	369
Bibliografia	370
SKOROWIDZ	373
SPIS TREŚCI TOMU 1	377

ZESTAWIENIE NAJCZĘŚCIEJ STOSOWANYCH SYMBOLI

- A – pole powierzchni (np. przekroju czynnego); m^2
 c – ciepło właściwe (pojemność ciepła właściwego), np. c_p, c_v ; $J/(kg \cdot K)$
 C – oporność jednostkowa (lub właściwa), tzn. przypadająca na jednostkę długości; s^2/m^6 ; stężenie (koncentracja) gazu w wodzie, wyróżnia się C_m, C_v
 d, D – średnica rury; m
 e – krawędź (łuk) grafu, np. krawędź k -ta, przy czym krawędzie mogą być oznaczane numerami wężła początkowego i końcowego, np. $e_k = [i, j]$; energia jednostkowa, gęstość energii; J/m^3 ; grubość ściany rury; m
 E – zbiór krawędzi grafu, tzn. $E = \{e_1, e_2, \dots, e_{N_k}\} = \{e_k\}$; współczynnik sprężystości liniowej (moduł Younga); energia strumienia; J
 F – siła; N
 \mathbf{F} – wymiar wielkości siły, np. $[R] = \mathbf{F}$
 g – przyspieszenie grawitacyjne; m/s^2
 G – siła ciężkości; N
 h – wysokość strat hydraulicznych; m
 H – napór hydrauliczny; m ; wysokość, np. ssania, tłoczenia, podnoszenia (pompowania)
 H_u – użyteczna wysokość podnoszenia pompy
 k – chropowatość bezwzględna wewnętrznych ścian rurociągu; m ; współczynnik filtracji; m/s
 K_v – współczynnik przepływu armatury; m^3/s
 l – długość geometryczna; m
 L – długość obliczeniowa, określona wzorem $L = l + l_2$
 \mathbf{L} – wymiar wielkości liniowej, np. $[l] = \mathbf{L}$
 m – miąższość złoża wodonośnego; m
 M – moduł przepływu (przepływność jednostkowa), określony wzorem (2.92) tom 1 tej książki; m^3/s
 n – częstotliwość obrotów (szybkość obrotowa), np. wirnika pompy; s^{-1}
 N – moc; W ; liczba określonych elementów składowych
 N_c – liczba cykli w grafie lub pierścieni w sieci; liczba cykli w grafie lub pierścieni obliczeniowych sieci
 N_d – współczynnik dobowej nierównomierności
 N_g – współczynnik godzinowej nierównomierności
 N_k – liczba krawędzi w grafie lub przewodów rurowych
 N_r – liczba węzłów rozbiórki wody z sieci

- N_s – liczba studni
 N_w – liczba węzłów w grafie lub w sieci
 N_z – liczba węzłów zasilania sieci, współczynniki nierównomierności rozbioru wody
 p – ciśnienie bezwzględne; Pa = N/m²
 P – moc; J/s = W; zbiór cykli w grafie (pierścieni w sieci), tzn. $P = \{P_c\}$
 q_j – natężenie skupionego rozbioru (–) lub zasilania (+) w sprowadzone do j -tego węzła sieci; m³/s
 Q – objętościowe¹⁾ natężenie przepływu, wydajność, definiowane ilorazem różnicowym $\Delta V/\Delta t$; m³/s
 Q_c – wymagana całkowita wydajność ujęcia wody
 Q_i – wydajność i -tej studni lub natężenie przepływu w i -tym przewodzie
 Q_j – wydajności j -tych studni
 Q_k – natężenie przepływu w k -tym przewodzie
 r – promień studni
 R – punkt roboczy pompy; zasięg leja depresji studni; m; residuum równania lub odchyłka od spełnienia określonego równania
 R_c – odchyłka względem II prawa Kirchhoffa, tzn. sumy spadków naporów ΔH_k w c -tym pierścieniu
 R_h – promień hydrauliczny strumienia; m
 R_i – względny rozbiór wody w i -tej godzinie
 R_j – odchyłka względem równania I prawa Kirchhoffa, tzn. sumy strumieni Q_k j -tego węzła
 Re – liczba Reynoldsa
 s – głębokość leja depresji studni; m
 s_i – depresja hydrauliczna i -tej studni, określana różnicą $(z_o - z_{di}) = s_{zi} + \Delta s_i$, wyznaczana empirycznie w procesie próbnego pompowania studni, wyrażana wzorem $s_i = S_i Q_i^2$
 s_{zi} – depresja hydrogeologiczna (zewnętrzna) i -tej studni, określana różnicą $(z_o - z_{zi})$
 S – oporność przewodu o długości l , określona wzorem (2.89), tom I tej książki; s²/m⁵
 S_{fi} – oporność filtra i -tej studni; występująca w zależności $\Delta s_i = S_{fi} Q_i^2$
 S_k – oporność k -tego przewodu o długości L_k
 t – czas; s
 T – siła styczna; siła tarcia; N
 \mathbf{T} – wymiar czasu, np. $[t] = \mathbf{T}$
 U – obwód zwilżony przekroju poprzecznego; m
 V – objętość; m³
 V_u – pojemność użytkowa (regulacyjna) zbiornika
 w – prędkość średnia w przekroju poprzecznym strumienia, definiowana jako Q/A ; m/s

¹⁾ W przypadku cieczy nieściśliwej ($\rho = \text{idem}$) iloczyn $\rho Q = Q_m$ określa *masowe natężenie przepływu* interpretowane jako $\Delta m/\Delta t$; kg/s.

- W – zbiór węzłów grafu lub sieci, tzn. $W = \{W_1, W_2, \dots, W_{Nw}\}$
 X, Y – bezwymiarowe parametry metody graficzno-analitycznej, określone wzorami (2.37) i (2.38), tom 1 tej książki
 z – rzędna
 z_{di} – rzędna dynamicznego zwierciadła wody w i -tej studni
 z_j – rzędna j -tego węzła
 z_o – rzędna statycznego zwierciadła wód gruntowych
 z_z – rzędna zwierciadła wody w zbiorniku
 β – bezwymiarowy współczynnik w metodzie Krotowa; współczynnik ściśliwości cieczy
 ε – chropowatość względna ścian rury, definiowana wzorem $\varepsilon = k/D$; mała dopuszczalna wartość odchyłki R_c lub R_j
 ε_c – sumy spadków naporów w przewodach pierścieni, wspólne dla wszystkich pierścieni; m
 ε_j – sumy strumieni w przewodach połączonych z węzłem, wspólne dla wszystkich węzłów; m^3/s
 δ_{ij} – tzw. symbol (delta) Kroneckera, definiowany jako funkcja dwóch całkowitoliczbowych wskaźników, określony równaniami

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{gdy } i = j \\ 0 & \text{gdy } i \neq j \end{cases}$$
- δ, Δ – poprawka określonej wielkości w metodzie iteracyjnej
 δQ_c – poprawka wspólna cyrkulująca dla wszystkich Q_k w c -tym cyklu (pierścieniu)
 δQ_{co} – poprawka własna rozpatrywanego c -tego pierścienia, określona wzorem Crosa-Łobaczewa
 δH_j – poprawka naporu w j -tym węźle
 δQ_k – poprawka natężenia przepływu w k -tym przewodzie
 $\delta Q_{kc}^{(n)}$ – n -ta poprawka dla c -tego cyklu (pierścienia), do którego należy k -ty przewód
 δQ_s – poprawka cyrkulująca w s -tym cyklu, graniczącym z rozpatrywanym c -tym cyklem (pierścieniem)
 δQ_{sc} – poprawka wtórna rozpatrywanego c -tego pierścienia, wynikająca z oddziaływania wszystkich s -tych pierścieni sąsiednich na poprawkę rozpatrywanego c -tego pierścienia
 γ – ciężar właściwy; N/m^3
 λ – współczynnik liniowych oporów hydraulicznych
 μ – dynamiczny współczynnik lepkości; $N \cdot s/m^2 = kg/(m \cdot s)$
 ν – kinematyczny współczynnik lepkości; m^2/s
 ρ – gęstość masy; kg/m^3
 η – współczynnik sprawności pompy (sprawność całkowita), definiowany wzorem (5.4), tom 1 tej książki
 σ – naprężenia normalne; N/m^2
 τ – naprężenia styczne; N/m^2
 ζ – współczynnik lokalnych oporów hydraulicznych

Wskaźniki dolne

- a – wielkość absolutna, bezwzględna; wielkość odnosząca się do czasu trwania awarii, np. V_a, p_a
- b – barometryczny, atmosferyczny, np. p_b
- c – wielkość ciężarowa; wielkość całkowita; numer cyklu grafu lub pierścienia w sieci, $c = 1, 2, 3, \dots, N_c$
- d – wielkość odnosząca się do zwierciadła dolnego, np. z_d ; wielkość dynamiczna
- dop – wielkość dopuszczalna
- f – wielkość odnosząca się do tarcia, np. E_f, F_f ; wielkość odnosząca się do filtrowania lub filtra, np. h_f, k_f, l_f
- g – wielkość geometryczna, np. H_g ; wielkość odnosząca się do zwierciadła górnego, np. z_g ; wielkość odnosząca się do gazu (fazy rozproszonej)
- h – wielkość pozioma (horyzontalna), np. F_h
- i – numer godziny w dobie, np. $i = 1, 2, \dots, 24$
- i, j – numery węzłów, np. $i = 1, 2, 3, \dots, N_w$; np. mogą określać numery węzła początkowego i końcowego krawędzi grafu
- k – parametr końcowy; numer krawędzi grafu lub przewodu sieci, np. $k = 1, 2, 3, \dots, N_k$, np. $e_k, \Delta H_k$
- kj – k -ty przewód incydentny z j -tym węzłem
- k, ij – k -ty przewód łączący sąsiedni i -ty węzeł z rozpatrywanym j -tym węzłem
- l – wielkość liniowa
- m – wielkość masowa, np. Q_m ; wielkość miejscowa (= lokalna); manometryczne ciśnienie (nadciśnienie), np. p_m ; maksymalna wartość z dwóch wskaźników i oraz j , $m = \max(i, j)$
- max – wielkość maksymalna
- min – wielkość minimalna
- n – wielkość normalna (prostopadła); wielkość odpowiadająca warunkom normalnym
- o – wielkość początkowa; wielkość spoczynkowa (hydrostatyczna)
- p – wielkość odnosząca się do pomp/pompowania, np. Q_p
- poz – wielkość odnosząca się do pożaru, np. V_{poz}, Q_{poz}
- r – wielkość rzeczywista (realna); wielkość zredukowana, np. p_r, t_r ; wielkość odnosząca się stabilizowanego rozbioru wody z j -tych węzłów, np. $Q_r \equiv \Sigma q_j$
- s – wielkość odnosząca się do króćca ssawnego pompy, np. H_s ; wielkość stracona, np. h_s ; numer sąsiedniego cyklu graniczącego z rozpatrywanym c -tym cyklem, $s = 1, 2, \dots, N_s$
- sr – wielkość średnia, np. w_{sr}, p_{sr}
- sz – wielkość odnosząca się do studni zbiorczej, np. z_{sz}
- t – wielkość odnosząca się do króćca tłocznego pompy, np. H_t ; wielkość styczna (= tangencjalna) lub odnosząca się do tarcia
- u – wielkość użyteczna, np. H_u, V_u
- v – wielkość pionowa (wertykalna), np. F_v ; podciśnienie (ciśnienie wakuometryczne), np. p_v

- w – wielkość odnosząca się do wody (fazy ciągłej); wielkość odnosząca się do węzłów sieci, np. N_w
- z – wielkość odnosząca się do wielkości zastępczej, np. l_z – określonej wzorem (2.71), tom 1 tej książki
- ∞ – parametr przepływu niezakłóconego
- 1 – wielkość na początku, np. w przekroju początkowym rurociągu
- 2 – wielkość na końcu, np. w przekroju końcowym rurociągu

Wskaźnik górny

- (n) – numer kroku (cyklu) iteracyjnego

Ważniejsze symbole matematyczne, logiczne i skróty

- $|a|$ – wartość bezwzględna wielkości a
- $[a]$ – wymiar wielkości a
- $\{a_i\}$ – zbiór wielkości a_i
- Δx – skończony przyrost, spadek lub różnica wielkości x , np. ΔH_k – spadek naporu hydraulicznego w k -tym przewodzie, wyrażany wzorem $\Delta H_k = S_k Q_k^2$
- dx – różniczka x , nieskończenie mała zmiana wielkości x
- ∞ – w nieskończoności
- $a \rightarrow b$ – wielkość a dąży do wielkości b
- \equiv – identyczny, tożsamy; równy na mocy definicji (z definicji)
- \wedge – koniunkcja (i), znak koniunkcji; np. $a \wedge b$, tzn. a i b
- \in – znak przynależności, np. $a \in A$, tzn. element a należy do zbioru A
- \div – znak oznaczający „od... do... włącznie”
- \approx – równe w przybliżeniu, znak równości przybliżonej
- const – wielkość stała (w czasie)
- idem – wielkość jednakowa, taka sama (wszędzie)
- var – wielkość zmienna
- dim – wymiar
- sgn x – funkcja definiująca znak (signum) liczby rzeczywistej, określona równaniami

$$\text{sgn } x = \begin{cases} +1 & \text{dla } x > 0 \\ 0 & \text{dla } x = 0 \\ -1 & \text{dla } x < 0 \end{cases}$$
- sgn _{j} (Q_k) – funkcja przyjmująca wartość:
 - +1 gdy przepływ Q_k w k -tym przewodzie związanym z j -tym węzłem odbywa się zgodnie (+) z przyjętą umową dotyczącą I prawa Kirchhoffa, lub
 - 1 gdy odbywa się przeciwnie (-) względem przyjętej umowy
- sgn _{c} (Q_k) – funkcja przyjmująca wartość:
 - +1 gdy przepływ Q_k w k -tym przewodzie wchodzącym w skład c -tego pierścienia odbywa się zgodnie (+) z przyjętą umową dotyczącą II prawa Kirchhoffa, lub
 - 1 gdy odbywa się przeciwnie (-) względem przyjętej umowy

- $\text{sgn}(\delta Q_{kc})$ – funkcja przyjmująca wartość:
- +1 gdy poprawka przepływu Q_{kc} w k -tym przewodzie wchodzącym w skład c -tego pierścienia odbywa się zgodnie (+) z przyjętą umową dotyczącą II prawa Kirchhoffa, lub
 - 1 gdy odbywa się przeciwnie (-) względem przyjętej umowy
- Σ_c – operator sumy spadków naporów hydraulicznych ΔH_k dla wszystkich k -tych przewodów wchodzących w skład c -tego pierścienia sieci
- Σ_j – operator sumy przepływów Q_k we wszystkich k -tych przewodach związanych z j -tym węzłem sieci
- Σ_k – operator sumy par poprawek dla pierścieni, których wspólną granicą jest k -ty przewód; jeżeli k -ty przewód jest granicznym przewodem tylko jednego pierścienia, to w sumie Σ_k znika druga poprawka
- Σ_{sc} – operator sumy dla k -tych przewodów wchodzących w skład wszystkich s -tych pierścieni, ale tylko granicznych przewodów względem rozpatrywanego c -tego pierścienia
- Γ_{sc} – współczynnik oddziaływania poszczególnych s -tych sąsiednich pierścieni na rozpatrywany c -ty pierścień
- Γ_{kc} – współczynnik rozdziału niewyrównanych spadków naporu dla k -tych przewodów w c -tym pierścieniu

1

PODSTAWY OBLICZANIA PIERŚCIENIOWYCH SIECI WODOCIĄGOWYCH

1.1. Podstawowe pojęcia i klasyfikacje

Ogólne pojęcie *system wodociągowy* jest rozumiane jako układ urządzeń technicznych wzajemnie oddziałujących na siebie, którego celem jest ciągle dostarczanie wody:

- 1) spełniającej odpowiednie kryteria jakościowe,
- 2) w odpowiedniej ilości, określanej odpowiednimi normami i wskaźnikami zapotrzebowania,
- 3) pod odpowiednim ciśnieniem, warunkującym wypływ wody z zaworów czerpalnych z wymaganym natężeniem strumienia,

przeznaczonej dla ludności miast i osiedli niezurbanizowanych oraz zakładów produkcyjnych, w tym także hodowlanych.

Głównymi częściami składowymi każdego systemu wodociągowego są: ujęcie wody, stacja uzdatniania wody, zbiorniki wyrównawczo-zapaso-owe, różnorodnie pompy oraz zewnętrzna sieć wodociągowa. Ze względu na *hydrauliczne warunki pracy* rozróżnia się *systemy wodociągowe*:

- *grawitacyjne*, w których dzięki odpowiedniemu wysokościowemu usytuowaniu kolejnych urządzeń systemu – od ujęcia do sieci zewnętrznej – woda przepływa grawitacyjnie i jest zapewnione wymagane ciśnienie we wszystkich węzłach poboru wody z sieci;
- *jednostopniowego pompowania*, w których dostawa wody do sieci przez urządzenia uzdatniania wody jest realizowana przez jednokrotne pompowanie wody na ujęciu, zapewniające wymagany rozkład ciśnienia w sieci;
- *dwustopniowego pompowania*, w których dostawa wody do sieci zewnętrznej jest realizowana przez dwukrotne pompowanie wody na ujęciu wody (przez urządzenia uzdatniania do zbiornika wyrównawczo-zapaso-owego) oraz ze zbiornika do sieci;
- *grawitacyjno-pompowe*, w których woda grawitacyjnie spływa z ujęcia przez urządzenia uzdatniania wody do zbiornika wyrównawczo-zapaso-owego, natomiast ze zbiornika do sieci zewnętrznej woda jest przepompowywana pod odpowiednim ciśnieniem; lub odwrotnie
- *pompowo-grawitacyjne*, w których woda jest przepompowywana z ujęcia przez urządzenia uzdatniania do zbiornika wyrównawczo-zapaso-owego, np. wieżowego, natomiast ze zbiornika do sieci zewnętrznej spływa grawitacyjnie pod odpowiednim ciśnieniem.

Ze względu na *strukturę zabudowy* terytorium zaopatrywanego w wodę rozróżnia się *wodociągi*:

- *lokalne*, w których woda jest doprowadzana do jednej jednostki osadniczej (niezurbanizowane osiedle lub wieś) albo do jednego przemysłowego zakładu produkcyjnego;
- *grupowe*, zaopatrujące w wodę co najmniej dwie jednostki osadnicze lub jedną jednostkę osadniczą i co najmniej jeden przemysłowy zakład produkcyjny – poza jednostką osadniczą;
- *komunalne*, zaopatrujące w wodę duże miasta, rozumiane jako *zurbanizowane aglomeracje* miejsko-przemysłowe, racjonalnie zabudowane i wyposażone w pełną *infrastrukturę*¹⁾ techniczną, zapewniającą zdrowotne (higieniczne) warunki życia, pracy i wypoczynku ludności.

Wodociągi lokalne i grupowe w zależności *od zakresów ciśnień w sieci* dzieli się na:

- *jednostrefowe*, gdy obszar zaopatrywania w wodę jest wyposażony w jedną sieć wodociągową, w której występuje jeden zakres wymaganego ciśnienia;
- *wielostrefowe*, gdy obszar zaopatrywania w wodę jest podzielony co najmniej na dwie strefy, charakteryzujące się zróżnicowaną wysokością zabudowy lub zróżnicowanym topograficznym usytuowaniem, przy czym każda ze stref jest wyposażona w odrębną sieć wodociągową z różnymi zakresami wymaganego ciśnienia.

Częścią składową każdego wodociągu jest *zewnętrzna sieć wodociągowa*, definiowana jako układ połączonych przewodów wodociągowych znajdujących się poza budynkami odbiorców. Połączenie co najmniej dwóch przewodów tworzy *węzeł sieci*.

Przewód wodociągowy jest to rurociąg wyposażony w różnorodne urządzenia pomocnicze, m.in. armaturę, przeznaczony do hydraulicznego transportu wody do odbiorców. Ze względu na *hydrauliczne warunki transportu wody* rozróżnia się:

- *przewody ciśnieniowe*, w których przepływający strumień całkowicie wypełnia rurociąg; przy czym mogą to być przewody ciśnieniowe:
 - *tłoczne*, gdy przepływ wody odbywa się pod wpływem nadciśnienia wytworzonego przez pompy,
 - *grawitacyjne*, gdy przepływ wody dopływającej z wyżej położonego źródła odbywa się pod wpływem siły grawitacyjnej;
- *przewody grawitacyjne bezciśnieniowe*, w których przepływ wody odbywa się ze swobodnym zwierciadłem pod wpływem siły grawitacyjnej.

Ze względu na *przeznaczenie* rozróżnia się *przewody*:

- *tranzytowe* (przesyłowe) – są to przewody bez odgałęzień, przeznaczone wyłącznie do transportu wody na dużą odległość i łączące źródło wody ze zbiornikiem początkowym lub magistralą wodociągową;

¹⁾ Podstawowe urządzenia technicznego wyposażenia aglomeracji, m.in. urządzenia wodociągowe i kanalizacyjne (dla ścieków sanitarno-bytowych i deszczowych).

- *magistralne* (tzw. magistrale wodociągowe) – doprowadzające wodę od stacji wodociągowej do przewodów rozdzielczych;
- *rozdzielcze* – doprowadzające wodę od przewodu magistralnego do przyłączy domowych i innych urządzeń czerpalnych (np. hydrantów, zdrojów);
- *przyłącza domowe* – przewody z wodomierzem i armaturą odcinającą, łączące zewnętrzną sieć rozdzielczą z wewnętrzną instalacją obiektu zasilanego w wodę.

Oznacza to, że przewody tranzytowe i magistralne charakteryzuje spełnienie warunku ciągłości przepływu, tzn. $Q = Aw = \text{idem}$ na całej długości przewodu. Natomiast przewody rozdzielcze są przewodami wydatkującymi wodę w miejscach podłączenia przewodów przyłączy domowych; warunek ciągłości przepływu jest spełniony tylko na odcinkach pomiędzy kolejnymi przyłączami.

Ze względu na *strukturę geometryczną* sieci wodociągowe dzielą się na:

- *rozgałęzione*, czyli nieprzelotowe (ślepe), w których przewody tworzą gałęzie doprowadzające wodę do odbiorców z jednej strony; sieci rozgałęzione charakteryzują się tym, że dla dwóch dowolnie przyjętych węzłów istnieje tylko jeden ciąg przewodów łączących, tzn. jedna trasa przepływu wody pomiędzy tymi węzłami;
- *pierścieniowe*, czyli zamknięte, w których przewody tworzą *zamknięte obwody* doprowadzające wodę do odbiorców z dwóch stron; sieć pierścieniowa charakteryzuje się tym, że dla dwóch dowolnie przyjętych węzłów istnieją co najmniej dwie trasy przepływu pomiędzy tymi węzłami;
- *pierścieniowo-rozgałęzione*, które charakteryzują się tym, że w części centralnej znajduje się sieć pierścieniowa, natomiast na jej obrzeżach występują dowolnie rozległe sieci rozgałęzione.

Pierścieniową sieć wodociągową otrzymuje się z sieci rozgałęzionej przez połączenie końców gałęzi dodatkowymi przewodami. Zamykanie pierścieni w sieci wykonuje się w celu zwiększenia niezawodności i nieprzerwanego dostarczania wody do odbiorców, gdyż w sieci pierścieniowej do każdego węzła rozbioru woda może być doprowadzana co najmniej dwoma przewodami. Przy czym zarówno sieci rozgałęzione, jak i pierścieniowe mogą być zbudowane z przewodów tranzytowych, magistralnych i rozdzielczych.

Sieci wodociągowe najczęściej są wyposażone w różnorodne pomocnicze urządzenia techniczne i obiekty inżynierskie, konieczne do prawidłowego działania sieci i jej obsługi eksploatacyjnej. W szczególności mogą występować następujące *obiekty inżynierskie sieci*:

- *komory wodociągowe* – kubaturowe obiekty inżynierskie na przewodzie wodociągowym przeznaczone do zainstalowania różnorodnej armatury, np. wodomierzy, zaworów odpowietrzających, zaworów odwadniających, zaworów odcinających, automatycznych zaworów regulacyjnych;
- *sieciowe zbiorniki wodociągowe* – kubaturowe obiekty inżynierskie wyposażone w odpowiednie urządzenia instalacyjno-armaturowe, przeznaczone do współpracy z siecią wodociągową do okresowego gromadzenia wody

dostarczanej przez pompownię z ujęcia lub stacji uzdatniania wody, a następnie odprowadzania jej do sieci;

- *pompownie sieciowe* – obiekty inżynierskie wyposażone w odpowiednie agregaty pompowe do włączania wody do sieci; rozróżnia się pompownie *początkowe* oraz pompownie *strefowe*, przeznaczone do przetłaczania wody z sieci niższego ciśnienia do sieci ciśnienia wyższego.

Podział klasyfikacyjny *sieciowych zbiorników wodociągowych*:

- w zależności od *usytuowania względem terenu* rozróżnia się zbiorniki:
 - *terenowe*, posadzone bezpośrednio na powierzchni terenu lub nieco zagłębione względem powierzchni terenu;
 - *wieżowe*, umieszczone nad terenem na specjalnej konstrukcji nośnej;
- w zależności od *lokalizacji względem sieci wodociągowej* mamy zbiorniki:
 - *początkowe*, usytuowane przed siecią;
 - *pośrednie*, usytuowane wewnątrz sieci;
 - *końcowe*, usytuowane na końcu sieci;
- w zależności od *sposobu podłączenia do sieci* rozróżnia się zbiorniki:
 - a) połączone z siecią dwoma przewodami: zasilającym – z wylotem na wysokości zwierciadła, i opróżniającym – z wlotem na wysokości dna zbiornika;
 - b) połączone z siecią jednym przewodem zasilająco-oprózniająco – połączonym ze zbiornikiem na wysokości dna;
 - c) połączone jednym przewodem zasilająco-oprózniająco, przy czym wylot wody z pionu do zbiornika znajduje się na wysokości górnego położenia zwierciadła wody, natomiast ze zbiornika woda jest wyprowadzana rurą, zaopatrzoną w zawór zwrotny (blokujący dopływ wody do zbiornika), łączącą dno zbiornika z przewodem.

W przypadku (a) pobór wody odbywa się z natężeniem odpowiadającym aktualnym sumarycznym rozbiorem wody z sieci; natomiast pompy zasilające zbiornik w tym przypadku pracują przy prawie stałym naporze, zależnym od aktualnej wysokości zwierciadła wody w zbiorniku. Praca pomp jest sterowana wyłącznikami pływakowymi usytuowanymi na wysokości z_{max} i z_{min} , ograniczającymi obliczoną pojemność użytkową zbiornika V_u . Wzajemne usytuowanie względem siebie wlotu i wylotu wody powinno być tak dobrane, aby został wymuszony ruch wody w zbiorniku, minimalizujący tzw. martwe przestrzenie.

W przypadku (b), gdy wydajność pomp Q_p jest większa od aktualnego sumarycznego rozbioru wody z sieci Σq_i , wówczas różnica ($Q_p - \Sigma q_i$) jest wprowadzana do zbiornika, i odwrotnie, gdy $Q_p < \Sigma q_i$, różnica ($\Sigma q_i - Q_p$) jest wyprowadzana ze zbiornika. Podobnie jak w przypadku (a), praca pomp jest sterowana pływakami usytuowanymi na rzędnych z_{max} i z_{min} , ograniczającymi obliczoną pojemność użytkową zbiornika V_u . Natomiast w tym przypadku tworzą się tzw. *martwe przestrzenie*, charakteryzujące się zanikającym ruchem wody.

W przypadku (c), w stosunku do przypadku (b), różnica polega tylko na tym, że ze względu na różne usytuowanie wlotu wody do zbiornika i wylotu,

wewnątrz zbiornika jest wymuszony ruch wody, natomiast hydrauliczne warunki współdziałania zbiornika z magistralnym przewodem tłocznym, doprowadzającym wodę z pompowni do sieci, są takie same.

Cel każdego systemu wodociągowego, określony na początku, wyznaczają **trzy podstawowe warunki**, jakie musi spełniać układ wodociągowy. Przy czym układ wodociągowy jest poddawany *oddziaływaniom zewnętrznym*, które polegają na stochastycznie zmiennym w czasie rozbiórce wody, losowo występującymi gwałtownymi wyciekami wody na skutek uszkodzenia rurociągów itd. Na układ wodociągowy nakłada się też **dodatkowy warunek**, polegający na tym, że działanie całego układu hydraulicznego powinno charakteryzować się zminimalizowaną jednostkową energochłonnością, wyrażoną w $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ włączanej wody do sieci.

Biorąc pod uwagę budowę i zasady działania systemu wodociągowego, należy podkreślić, że jest to układ wewnętrznie skoordynowany, składający się z licznych i różnorodnych urządzeń współdziałających i ściśle na siebie oddziałujących.

Spełnienie pierwszego warunku podstawowego wymaga opracowania technologii uzdatniania wody, odpowiedniej dla własności danej wody surowej. Natomiast, aby spełnić pozostałe dwa warunki, należy:

- ustalić trafne prognozy charakterystycznych rozbiórów wody,
- wykonać wnikliwe obliczenia hydrauliczne projektowanego systemu wodociągowego, będące podstawą wymiarowania urządzeń i prawidłowego doboru agregatów pompowych,
- opracować algorytmy odpowiedniej regulacji i automatycznego sterowania pracą całego systemu wodociągowego.

Wyżej podane pozostałe warunki wymagają przeprowadzenia rachunku optymalizacyjnego według różnych kryteriów, a w szczególności minimalizacji:

- jednostkowej energochłonności, co ma wpływ na zmniejszenie kosztów eksploatacji,
- kapitałochłonności, co ma wpływ na obniżenie inwestycyjnych kosztów budowy.

Główny przedmiot poniższych rozważań będzie zawężony do poszukiwania metod hydraulicznego obliczania sieci wodociągowych.

1.2. Założenia upraszczające do metod obliczeniowych

W celu opracowania odpowiednich metod upraszczających procedury obliczeniowe przyjmuje się następujące założenia, które wyznaczają zakresy ich stosowalności:

- 1) sieci są zbudowane z hydraulicznie długich przewodów rurowych, tzn. lokalne opory są pomijalnie małe w porównaniu z liniowymi oporami hydraulicznymi;