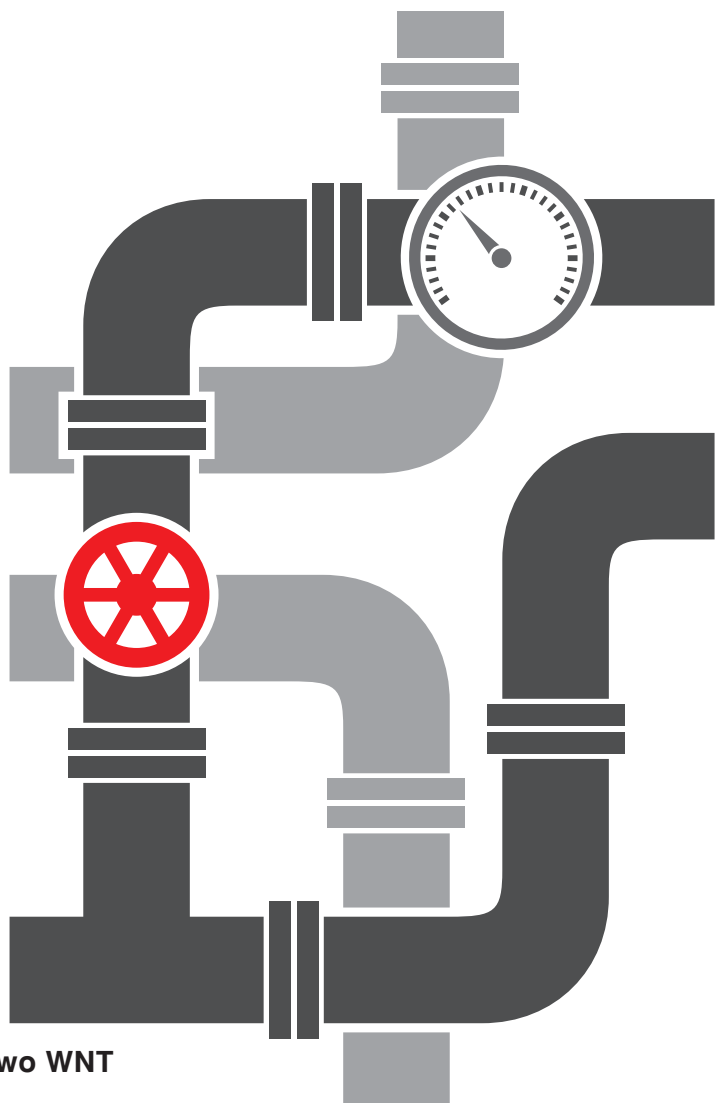


Czesław Grabarczyk

HYDRAULIKA

URZĄDZEŃ WODOCIĄGOWYCH

1 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

1 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 Szelaq*

Korekta: *Małgorzata Janus, 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 978-83-01-19385-0 tom 1

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	9
1. WPROWADZENIE	13
Bibliografia	22
Załączniki	25
2. PODSTAWY OBLICZANIA PRZEPŁYWÓW W PRZEWODACH	27
2.1. Podstawowe zależności obliczeniowe	27
2.2. Opory hydrauliczne	31
2.3. Lokalne straty hydrauliczne. Współczynnik przepływu K_v	32
2.4. Liniowe opory hydrauliczne	36
2.5. Przegląd wzorów empirycznych dla współczynnika liniowych oporów	38
2.6. Chropowatość zastępcza	41
2.7. Sformułowanie zadań obliczeniowych	41
2.8. Metoda obliczania przepływów turbulentnych w rurociągach długich	43
2.9. Kryteria określania stref przepływu	47
2.10. Metoda rozwiązywania zadań dla V strefy przepływu	51
2.11. Jawne wzory aproksymacyjne dla współczynnika λ	53
2.12. Metody obliczania przepływów turbulentnych w rurociągach krótkich	55
2.13. Iteracyjne metody obliczeń hydraulicznych	60
2.14. Charakterystyki sprawności hydraulicznej przewodu	66
2.15. Wzrost oporności hydraulicznej eksploatowanych rurociągów	68
2.16. Wpływ zmian temperatury cieczy na spadek ciśnienia wzdłuż rurociągu	75
2.17. Przepływ cieczy w przewodach o przekroju niekołowym	76
Bibliografia	77
3. CHARAKTERYSTYKI HYDRAULICZNE OPORÓW LOKALNYCH	82
3.1. Elementy instalacji hydraulicznych	82
3.2. Podstawowe pojęcia i klasyfikacja armatury	83
3.3. Charakterystyki hydrauliczne armatury	88
3.4. Zawory odcinające i regulacyjne	89
3.5. Zawory zwrotne	104
3.6. Zawory czerpalne – hydranty	113
3.7. Zawory bezpieczeństwa	116
3.8. Analiza porównawcza i kryteria oceny armatury	116
Bibliografia	118

4.	METODY OBLICZANIA UKŁADÓW PRZEWODÓW	124
4.1.	Wstępne uwagi ogólne	124
4.2.	Charakterystyki wpływów wody z układu przewodów	124
4.3.	Ogólne sformułowanie zadań obliczeniowych	126
4.4.	Podstawowe równania układów złożonych	127
4.5.	Opory hydrauliczne trójników	128
4.6.	Ogólne określenie metod rozwiązywania zadań	132
4.7.	Przewody połączone szeregowo	134
4.8.	Przewody połączone równolegle	135
4.9.	Rozgałęzione układy przewodów z końcowymi rozbiorami	139
4.10.	Pierścieniowy układ przewodów	152
4.11.	Przewody ze skupionymi rozbiorami wody	158
4.12.	Rozgałęziona sieć wodociągowa	164
4.13.	Obliczanie lokalizacji wycieku wody z rurociągu	166
4.13.1.	Wprowadzenie	166
4.13.2.	Budowa modelu matematycznego wycieku	175
4.13.3.	Równania wyjściowe	176
4.14.	Uwagi końcowe	180
	Bibliografia	180
5.	PODSTAWY HYDRAULICZNE UKŁADÓW POMPOWYCH	184
5.1.	Przegląd podstawowych pojęć i rodzajów pomp wirowych	184
5.2.	Podstawowe wyposażenie instalacji układu pompowego	187
5.3.	Charakterystyki pomp	189
5.4.	Analityczna postać charakterystyk pomp	193
5.5.	Hydrauliczne warunki przepływów w układach pomp	194
5.6.	Modyfikacje podstawowego układu pompowego	199
5.7.	Kawitacja w pompach wirowych	203
5.8.	Regulacja układów pompowych	209
	Bibliografia	217
6.	ZŁOŻONE UKŁADY POMPOWE	219
6.1.	Podstawowe pojęcia i klasyfikacje	219
6.2.	Równolegle połączone układy pompowe	221
6.3.	Współdziałanie pompowni znacznie oddalonych	233
6.4.	Szeregowo połączone układy pompowe	238
6.5.	Magistrala wodociągowa z pompowniami lokalnego podwyższania ciśnienia ..	246
6.6.	Magistrala układu pompowo-zbiornikowego ze stabilizowanymi rozbiorami ...	249
6.7.	Dostarczanie wody do kilku zbiorników górnych	253
	Bibliografia	259
7.	UKŁADY POMPOWO-HYDROFOROWE	261
7.1.	Rodzaje urządzeń naporowo-regulacyjnych w systemach wodociągowych	261
7.2.	Podstawowe pojęcia	263
7.3.	Budowa i zasada działania układu pompowo-hydroforowego	264
7.4.	Hydrauliczne warunki działania układu	268

7.5.	Dobór agregatu pompowego	272
7.6.	Graniczne wartości nadciśnienia powietrza w hydroforze	274
7.7.	Objętość hydroforu	276
7.8.	Układy hydroforowe z kilkoma pompami	282
7.9.	Objętość hydroforu układów wielopompowych	291
7.10.	Ogólny algorytm projektowania układu pompowo-hydroforowego	296
	Bibliografia	299
8.	POMPOWE UJĘCIA WÓD PODZIEMNYCH	301
8.1.	Wprowadzenie	301
8.2.	Podstawowe pojęcia	302
8.3.	Studnie wiercone – budowa i wyposażenie	307
8.4.	Hydraulika układu studni	313
8.5.	Obliczenia hydrogeologiczne studni	315
8.6.	Charakterystyka studni	319
8.7.	Wysokość strat hydraulicznych h_s opływu silnika	321
8.8.	Dopuszczalna prędkość dopływu wody do filtra	322
8.9.	Hydrauliczne warunki działania pompy głębinowej	325
8.10.	Hydraulika układu pompowego ujęcia wody z kilku studni	327
8.10.1.	Sformułowanie zagadnienia	327
8.10.2.	Równania warunków przepływu w instalacji	330
8.10.3.	Obliczenia parametrów hydraulicznych pomp	331
	Bibliografia	337
9.	LEWAROWE UJĘCIA WÓD PODZIEMNYCH	345
9.1.	Wprowadzenie	345
9.1.1.	Definicje podstawowych pojęć	345
9.1.2.	Ogólne zasady działania i przegląd zjawisk fizycznych	345
9.1.3.	Klasyfikacja lewarów	348
9.1.4.	Zastosowania w technice wodociągowej	348
9.1.5.	Zarys historii rozwoju techniki lewarowej	350
9.2.	Lewary klasyczne Herona	352
9.2.1.	Hydrauliczne warunki działania prostego lewara	352
9.2.2.	Wydajność pomp próżniowych do uruchamiania przepływu przez lewar	361
9.2.3.	Wydzielanie się gazów w lewarach	371
9.2.4.	Wpływ wydzielonych gazów na opory hydrauliczne w lewarach	382
9.2.5.	Techniczne metody usuwania powietrza z lewarów w warunkach eksploatacji	396
9.3.	Współdziałanie rzędu studni ze złożonym lewarem	402
9.3.1.	Przedmiot, cel i zakres rozważań	402
9.3.2.	Budowa układu lewarowego ujęcia wody z rzędu studni	402
9.3.3.	Wzajemne oddziaływanie studni na siebie	407
9.3.4.	Matematyczny opis warunków działania lewara	412
9.3.5.	Ogólne sformułowania zagadnień obliczeniowych	415
9.3.6.	Rozwiązania zadania projektowego (I rodzaju)	416
9.3.7.	Różniczna metoda rozwiązywania zadania II rodzaju	417
9.3.8.	Iteracyjna metoda rozwiązywania zadania II rodzaju	421

9.3.9. Badania symulacyjne własności hydraulicznych układu	428
9.4. Lewary Steinwendera	438
9.4.1. Wprowadzenie	438
9.4.2. Zwężki Venturiego i strumienice	439
9.4.3. Zastosowania strumienic w technice wodociągowej	449
9.4.4. Lewar Lindleya ze strumienicą w głowicy	460
9.4.5. Lewary z głowicą Steinwendera	464
9.4.6. Lewary z głowicą Steinwendera ze strumienicą	494
Bibliografia	506
ZAŁĄCZNIKI	510
SKOROWIDZ	515
SPIS TREŚCI TOMU 2	519

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 – energia jednostkowa, gęstość energii; J/m^3
 E – energia strumienia; J
 F – siła; N
 \mathbf{F} – wymiar wielkości siły, np. $[R] = \mathbf{F}$
 g – przyspieszenie grawitacyjne; m/s^2
 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); m^3/s
 n – częstotliwość obrotów (szybkość obrotowa), np. wirnika pompy, s^{-1}
 N – moc; W ; liczba określonych elementów składowych; np. N_s – liczba studni
 p – ciśnienie bezwzględne; $Pa = N/m^2$
 P – moc; $J/s = W$
 q_f – natężenie skupionego rozbioru; m^3/s
 Q – objętościowe¹⁾ natężenie przepływu, wydajność, definiowane ilorazem różnicowym $\Delta V/\Delta t$; m^3/s
 Q_c – wymagana całkowita wydajność ujęcia wody

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 .

- 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
 Re – liczba Reynoldsa
 R_h – promień hydrauliczny strumienia; m
 s – głębokość leja depresji studni; m
 s_{zi} – depresja hydrogeologiczna (zewnętrzna) i -tej studni, określana różnicą ($z_o - z_{zi}$)
 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 – oporność przewodu o długości l , określona wzorem (2.89); s^2/m^5
 S_k – oporność k -tego przewodu o długości L_k
 S_{fi} – oporność filtra i -tej studni; występująca w zależności $\Delta s_i = S_{fi} Q_i^2$
 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, m^3 ; np. V_u – pojemność użytkowa (regulacyjna) zbiornika
 w – prędkość średnia w przekroju poprzecznym strumienia, definiowany jako Q/A ; m/s
 z – rzędna
 z_j – rzędna j -tego węzła
 z_o – rzędna statycznego zwierciadła wód gruntowych
 z_z – rzędna zwierciadła wody w zbiorniku
 z_{di} – rzędna dynamicznego zwierciadła wody w i -tej studni
 β – bezwymiarowy współczynnik w metodzie Krotowa; współczynnik ściśliwości cieczy
 ε – chropowatość względna ścian rury, definiowana wzorem $\varepsilon = k/D$
 δ – mała dopuszczalna wartość odchyłki R
 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 – poprawka określonej wielkości w metodzie iteracyjnej
 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

- σ – naprężenia normalne; N/m^2
 τ – naprężenia styczne; N/m^2
 ζ – współczynnik lokalnych oporów hydraulicznych

Wskaźniki dolne

- a – wielkość absolutna, bezwzględna; np. p_a
 b – barometryczny, atmosferyczny, np. p_b
 c – wielkość ciężarowa; wielkość całkowita
 d – wielkość odnosząca się do zwierciadła dolnego, np. z_d ; wielkość dynamiczna, np. z_d
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
 h – wielkość pozioma (horyzontalna), np. F_h
 k – indeks oznaczający parametr końcowy
 l – wielkość liniowa
 m – wielkość masowa, np. Q_m ; wielkość miejscowa (= lokalna); manometryczne ciśnienie (nadciśnienie), np. p_m
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 odnosząca się do stabilizowanego rozbioru wody z q_r
 s – wielkość odnosząca się do króćca ssawnego pompy, np. H_s ; wielkość stracona, np. h_s
sr – wielkość średnia, np. w_{sr}, p_{sr}
sz – wielkości odnoszące się do studni zbiorczej, np. z_{sz}
 t – wielkość odnosząca się do króćca tłocznego pompy, np. H_t
 u – indeks oznaczający tzw. wielkość użyteczną, np. H_u, V_u
 v – wielkość pionowa (wertkalna), np. F_v
 podciśnienie (ciśnienie wakuometryczne), np. p_v
 w – wielkość odnosząca się do wody (fazy ciągłej)
 z – wielkość odnosząca się do wielkości zastępczej, np. l_z – określonej wzorem (2.55)
 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
- \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

1

WPROWADZENIE

*Naukowcy badają to, co istnieje, natomiast inżynierowie **tworzą** to, czego jeszcze nigdy nie było.*

Theodore von Kármán¹⁾

Jeżeli inżynierowie nie będą ludźmi o wysokiej kulturze, to nie będą mieli wpływu na otaczający ich świat.

Janusz Tymowski²⁾

*... każdy człowiek miał i ma w istocie jednego nauczyciela: **samego siebie**.
Każdy tylko to umie, co posiadał pracą, co przeorał własnym wysiłkiem.*

Władysław Natanson³⁾

Określenie podstawowych pojęć

Tytuł książki składa się z trzech terminów technicznych, które wymagają zdefiniowania, gdyż to one określają *przedmiot i zakres książki*.

Urządzenie techniczne jest ogólną nazwą dowolnego obiektu, którym może być maszyna, aparat, przyrząd, konstrukcja, budowla, instalacja hydrauliczna, dowolnie złożony układ wodociagowy itp. Szczególnym przypadkiem urządzenia jest **instalacja hydrauliczna**, definiowana jako zespół złożony z przewodów (np. rur, armatury) i osprzętu (aparatury kontrolno-pomiarowej, urządzeń automatycznego sterowania).

Wodociąg jest to zespół połączonych i wzajemnie oddziałujących na siebie⁴⁾ budowli i przepływowych urządzeń, przeznaczony do zbiorowego i ciągłego zaopatrywania odbiorców w wodę:

- o jakości zgodnej z obowiązującymi przepisami,
- o odpowiedniej ilości,
- pod odpowiednim ciśnieniem,

¹⁾ Theodore von Kármán (1881–1963), światowej sławy uczony amerykański (pochodzenia węgierskiego) w zakresie hydro- i aerodynamiki.

²⁾ Janusz Tymowski (1902–1992), wybitny inżynier mechanik, profesor Politechniki Warszawskiej.

³⁾ Władysław Natanson (1864–1937), profesor fizyki, rektor Uniwersytetu Jagiellońskiego.

⁴⁾ W technice zespół dowolnych urządzeń połączonych i wzajemnie oddziałujących na siebie jest nazywany *systemem*.

przeznaczonej do spożywania przez ludność, do hodowli zwierząt oraz dla różnorodnych zakładów przemysłowych, m.in. przetwórstwa rolno-spożywczego. Wodociąg składa się z urządzeń do:

- *ujmowania wody* – powierzchniowej (z rzek, jezior) i podziemnej (ze źródeł górskich i studni);
- *podnoszenia wody*, takich jak pompy, pompownie, strumienice;
- *uzdatniania wody*, takich jak osadniki, filtry wodociągowe [8] i różnorodne reaktory technologiczne; urządzenia te służą do realizacji procesów fizyczno-chemicznych usuwania z wody substancji niedopuszczalnych lub obniżenia ich stężeń do granic dopuszczalnych;
- *gromadzenia wody* surowej i uzdatnionej, w warunkach nierównomiernego rozbioru wody przez użytkowników, w zbiornikach (terenowych lub wieżowych);
- *doprowadzania wody* do urządzeń czerpalnych u odbiorców, rozgałęzionymi i pierścieniowymi sieciami rurociągów, wyposażonymi w odpowiednią armaturę zaporową, zabezpieczającą i regulacyjną.

Ze względu na zasięg terytorialny zaopatrywania w wodę wyróżnia się *wodociągi miejskie* (aglomeracji miejsko-przemysłowych) oraz *wodociągi osiedli niezurbanizowanych* (wiejskie, gminne i regionalne).

Z przedstawionej definicji wynika, że celem każdego układu wodociągowego jest *ciągłe dostarczanie* wody o odpowiedniej jakości i w odpowiedniej ilości oraz pod odpowiednim ciśnieniem. Tak określony cel wyznacza trzy podstawowe warunki, jakie musi spełniać układ wodociągowy. Przy czym każdy układ wodociągowy jest poddawany oddziaływaniom zewnętrznym, polegającym np. na stochastycznie zmiennym w czasie rozbiorem wody, losowo występujących gwałtownych wyciekach wody na skutek uszkodzenia przewodów rurowych. Ponadto, na układ wodociągowy nakłada się dodatkowy warunek, polegający na tym, że działanie całego układu hydraulicznego powinno charakteryzować się zminimalizowaną jednostkową energochłonnością, wyrażoną w $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ wody.

Spełnienie pierwszego warunku podstawowego wymaga opracowania technologii uzdatniania wody, odpowiedniej dla własności wody surowej. Pozostałe warunki wymagają:

- wnikliwych obliczeń hydraulicznych projektowanego układu, jako podstawy wymiarowania urządzeń i właściwego doboru agregatów pompowych;
- opracowania algorytmów odpowiedniej regulacji i automatycznego sterowania pracą całego układu wodociągowego.

Współcześnie urządzenia wodociągowe – które mają cechy wielkich systemów – wyposaża się w urządzenia automatycznego sterowania i regulacji, umożliwiające samoczynne działanie w warunkach zmiennego rozbioru wody. Zadaniem ludzkiej obsługi eksploatacyjnej jest tylko nadzór i konserwacja urządzeń technicznych.