

Stefan Bednarczyk

Przepływy nieustalone

w kanałach i rurociągach
siłowni wodnych

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Dariusz Mikielwicz

RECENZENT

Wojciech Majewski

REDAKCJA JĘZYKOWA

Agnieszka Frankiewicz

SKŁAD I PROJEKT OKŁADKI

Ireneusz Jelonek

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
<https://www.sklep.pg.edu.pl>

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakikolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej,
Gdańsk 2020

ISBN 978-83-7348-799-4

Spis treści

WYKAZ PODSTAWOWYCH OZNACZEŃ	7
WPROWADZENIE	11
1. POWSTAWANIE I ROZPRZESTRZENIANIE SIĘ PRZEPŁYWU NIEUSTALONEGO WYWOŁANEGO PRZEZ URZĄDZENIA HYDROMECHANICZNE SIŁOWNI WODNYCH	13
1.1. Urządzenia hydromechaniczne siłowni wodnej wywołujące przepływy nieustalone	13
1.2. Mechanizm powstawania i rozprzestrzeniania się przepływu nieustalonego	17
1.3. Rodzaje uderzenia hydraulicznego	18
1.4. Rodzaje fal translacyjnych	20
1.5. Masowy przepływ oscylacyjny	23
1.6. Obszar występowania przepływów nieustalonych	23
1.7. Rodzaje zmian obciążenia maszyn siłowni wodnej wywołujące ekstremalne przepływy nieustalone	25
1.7.1. Ekstremalne zdarzenia w siłowniach wodnych wywołujące stany nieustalone	25
1.7.2. Rozruch maszyny hydraulicznej do pracy roboczej	26
1.7.3. Stany nieustalone wywołane przez nagłe i całkowite zatrzymanie pracy turbinowej	27
1.7.4. Stany nieustalone wywołane przez nagłe i całkowite zatrzymanie pracy pompowej	28
1.8. Sterowanie procesem powstawania przepływu nieustalonego	29
2. PRAWA I ZASADY STOSOWANE DO OPISU MATEMATYCZNEGO PRZEPŁYWU NIEUSTALONEGO JEDNOKIERUNKOWEGO	31
2.1. Rodzaje praw stosowanych do opisu przepływu nieustalonego w korytach otwartych i rurociągach ciśnieniowych	31
2.2. Równanie zachowania ciągłości przepływu	32
2.3. Dynamiczne równanie przepływu wolnozmiennego	36
2.3.1. Dynamiczne równanie przepływu wyprowadzone z drugiej zasady dynamiki Newtona	36
2.3.2. Dynamiczne równanie przepływu wolnozmiennego wyprowadzone z zasady zachowania energii	40
2.4. Równania przepływu sfalowanego	41
3. MODELE MATEMATYCZNE PRZEPŁYWU NIEUSTALONEGO WOLNOZMIENNEGO W KANAŁACH OTWARTYCH	45
3.1. Przepływ nieustalony wolnozmienny opisany matematycznie przez de Saint-Venanta	45
3.1.1. Wprowadzenie	45
3.1.2. Podstawowe założenia modelu de Saint-Venanta	45
3.1.3. Równania de Saint-Venanta	46

3.2. Metoda stanów chwilowych	47
3.3. Metoda objętości skończonych	48
3.4. Metoda różnic skończonych	50
3.5. Metoda elementów skończonych	52
3.6. Metoda charakterystyk	53
3.6.1. Podstawy metody charakterystyk	53
3.6.2. Równania zmian głębokości i prędkości przepływu na drodze rozprzestrzeniania się zaburzenia	54
3.6.3. Szczególne formuły opisujące przepływ nieustalony na drodze rozprzestrzeniania się zaburzeń	58
3.6.4. Zasady prowadzenia obliczeń przepływu nieustalonego wolnozmiennego w kanałach otwartych.....	60
4. KSZTAŁT I WIELKOŚĆ FAL TRANSLACYJNYCH	63
4.1. Podstawowe modele fal translacyjnych	63
4.2. Podstawowe założenia i zakres opisu matematycznego dodatnich fal translacyjnych	64
4.3. Wpływ strat hydraulicznych na kształt i charakterystyczne wielkości oscylacji w kanale przekroju prostokątnego	66
4.3.1. Równanie profilu oscylacji falowych	66
4.3.2. Charakterystyczne wysokości oscylacji	69
4.3.3. Prędkość propagacji fali z wykształconymi oscylacjami	72
4.3.4. Ocena uzyskanych wyników rozważań teoretycznych	74
4.4. Charakterystyczne wielkości czoła dodatniej fali translacyjnej z oscylacjami w kanale o przekroju trapezowym	75
4.4.1. Równanie profilu czoła fali	75
4.4.2. Stabilność oscylacji	80
4.4.3. Maksymalna i średnia wysokość pierwszej oscylacji	85
4.4.4. Prędkość propagacji fali z wykształconymi oscylacjami	89
4.5. Charakterystyczne wielkości czoła dodatniej fali translacyjnej z oscylacjami w kanale o przekroju parabolicznym	90
4.5.1. Równanie profilu czoła fali	90
4.5.2. Granica stabilności czoła fali translacyjnej w kanałach o przekroju parabolicznym	94
4.5.3. Charakterystyczne wielkości czoła stabilnej fali	96
4.6. Fale dodatnie bez oscylacji	98
4.6.1. Podstawowe przypadki powstawania i rozprzestrzeniania się dodatnich fal bez oscylacji	98
4.6.2. Prędkość propagacji dodatnich fal bez oscylacji w kanałach o przekroju trapezowym	99
4.6.3. Prędkość propagacji dodatnich fal bez oscylacji w korytach o przekroju parabolicznym	101
4.7. Wielkości i kształt fal ujemnych	102
4.7.1. Podstawowe założenia opisu matematycznego fal ujemnych	102
4.7.2. Zmiana natężenia przepływu w funkcji wysokości fali w kanale o przekroju parabolicznym	103
4.8. Zmiana natężenia przepływu i wysokości fali na długości kanału	104

5. UDERZENIA HYDRAULICZNE WYWOŁYWANE PRZEZ TURBINY, POMPY I ZAMKNIĘCIA	107
5.1. Rys historyczny powstawania modeli matematycznych uderzenia hydraulicznego w przewodach ciśnieniowych	107
5.2. Opis matematyczny przepływu nieustalonego w przewodach ciśnieniowych metodą charakterystyk	110
5.2.1. Równania pochodnych lokalnych prędkości przepływu i ciśnienia w miejscu zaistnienia zaburzenia	110
5.2.2. Równania różniczkowe zmiany ciśnienia i natężenia przepływu na drodze rozprzestrzeniającego się zaburzenia	113
5.3. Prędkość propagacji zaburzeń przepływu w rurociągach i sztolniach energetycznych	115
5.3.1. Założenia i uproszczenia	115
5.3.2. Ogólna formuła opisująca prędkość propagacji zaburzeń przepływu	116
5.3.3. Prędkość głosu w wodzie	116
5.3.4. Prędkość propagacji zaburzeń w rurociągu stalowym o powłoce cienkościennej	117
5.3.5. Prędkość propagacji zaburzeń w rurociągu żelbetowym	120
5.3.6. Prędkość propagacji zaburzeń w sztolni o przekroju okrągłym o obudowie betonowej żelbetowej i opancerzonej	121
5.4. Wyznaczanie uderzenia hydraulicznego i biegu nieustalonego maszyny hydroenergetycznej metodą charakterystyk	123
5.4.1. Podstawowe zasady obliczeń metodą charakterystyk	123
5.4.2. Charakterystyka uniwersalna jako podstawa wyznaczania wielkości uderzenia hydraulicznego i prędkości rozbiegowej maszyny hydroenergetycznej	124
5.4.3. Obliczeniowa siatka charakterystyk	128
5.4.4. Zasady wyznaczania uderzenia hydraulicznego i zmian prędkości obrotowej maszyny hydroenergetycznej	131
5.4.5. Zasady wyznaczania natężenia przepływu i uderzenia hydraulicznego w pośrednich złączach segmentów rurociągu	133
5.4.6. Równania przepływu nieustalonego na połączeniu rurociągu ze zbiornikiem	135
5.5. Uderzenia hydrauliczne w przesyłowych instalacjach pompowych	135
5.5.1. Typowe instalacje pompowe dalekiego zasięgu	135
5.5.2. Charakterystyki eksploatacyjne pomp wirowych	136
5.5.3. Proste uderzenie hydrauliczne w instalacji przesyłowej dalekiego zasięgu	139
5.5.4. Uderzenie hydrauliczne w pompowej instalacji przesyłowej o ograniczonej długości rurociągu	141
5.6. Zmiana wielkości uderzenia hydraulicznego na długości rurociągu przesyłowego	144
5.6.1. Powstawanie fal uderzenia hydraulicznego	144
5.6.2. Hipotezy	144
5.6.3. Równania przepływu nieustalonego na czole fali uderzenia hydraulicznego	145

5.6.4. Równania przepływu nieustalonego występującego bezpośrednio za czołem fali uderzenia hydraulicznego	147
6. MASOWY PRZEPŁYW OSCYLACYJNY W KOMORACH WYRÓWNAWCZYCH	150
6.1. Podstawowe funkcje komory wyrównawczej	150
6.2. Konstrukcje komór wyrównawczych	151
6.3. Podstawowe hipotezy dotyczące obliczeń stanów nieustalonych w komorze wyrównawczej	152
6.4. Podstawowe prawa przepływu nieustalonego pomiędzy derywacją a komorą wyrównawczą oraz zakres ich zastosowań	152
6.5. Ekstremalne zmiany poziomów wody w prostej komorze wyrównawczej	154
6.6. Ekstremalne poziomy wody w dławkowej komorze wyrównawczej	157
6.6.1. Nagłe i całkowite zatrzymanie przepływu przechodzącego przez maszynę hydrauliczną	157
6.6.2. Nagły wzrost natężenia przepływu z wartości Q_r do wartości Q	158
6.7. Ekstremalne poziomy wody w komorze różnicowej	159
6.7.1. Nagłe i całkowite zatrzymanie przepływu przechodzącego przez maszynę hydrauliczną	159
6.7.2. Nagłe zwiększenie natężenia przepływu z wartości Q_r do Q	161
6.8. Potrzebna powierzchnia przekroju poprzecznego komory wyrównawczej przy pracy elektrowni na sieć wydzieloną	162
7. UZUPEŁNIENIA	164
7.1. Opory tarcia hydraulicznego w kanałach i rurociągach	164
7.1.1. Straty hydrauliczne wywołane przez opory tarcia	164
7.1.2. Czynniki decydujące o wielkości współczynnika tarcia	164
7.1.3. Opory tarcia w korytach otwartych	166
7.1.4. Opór tarcia burzliwego w rurociągach ciśnieniowych	168
7.2. Hydrauliczne opory tarcia przepływu nieustalonego	171
7.2.1. Wprowadzenie	171
7.2.2. Formuły empiryczne opisujące współczynnik oporów tarcia przepływu nieustalonego	172
7.3. Lokalne straty hydrauliczne	173
7.4. Dobór optymalnego kształtu trapezowego przekroju poprzecznego kanału otwartego	178
7.4.1. Cel i zakres metody	178
7.4.2. Wpływ kształtu na wielkość czynnego trapezowego przekroju poprzecznego kanału	179
7.5. Transformacja przekroju trapezowego w przekrój paraboliczny	180
LITERATURA	183
O AUTORZE	187

WYKAZ PODSTAWOWYCH OZNACZEŃ

A	– powierzchnia czynnego przekroju poprzecznego kanału, rurociągu, sztolni, galerii [m^2]
B	– szerokość zwierciadła wody w przekroju poprzecznym kanału [m]
B_o	– szerokość w dnie przekroju poprzecznego kanału [m]
C	– stała całkowania [–]
C_h	– współczynnik prędkości przepływu ze wzoru Chezy’ego [$m^{0,5}/s$]
D	– średnica wlotowa wirnika turbiny [m]
E	– energia [$J = \text{kgm}^2/s^2$]
E_k	– energia kinetyczna [$J = \text{kgm}^2/s^2$]
F	– siła [$N = \text{kgm}/s^2$]
Fr	– liczba Froude’a [–]
G	– siła ciężkości [$N = \text{kgm}/s^2$]
H	– spadek, głębokość wody w kanale, wysokość linii energii [m]
I_o	– spadek dna kanału (–) albo spadek linii ciśnień w rurociągu (–)
I_s	– spadek linii strat hydraulicznych (–)
J	– moment bezwładności mas wirujących [kgm^2]
K_o	– moduł sprężystości materiału powłoki rurociągu, sztolni [$\text{Pa} = \text{kg}/\text{ms}^2$]
L	– długość całkowita przewodu prowadzącego wodę [m]
M	– moment bezwładności [kgm^2/s^2]
M_h	– moment hydrauliczny [kgm^2/s^2]
M_n	– moment napędu [kgm^2/s^2]
M_o	– moment obrotowy maszyny [kgm^2/s^2]
O	– obwód zwilżony [m]
P	– moc [$W = \text{kgm}^2/s^3$]
Q	– natężenie przepływu [m^3/s]
R	– siła oporów przepływu [$N = \text{kgm}/s^2$]
Re	– liczba Reynoldsa [–]
R_h	– promień hydrauliczny [m]
Ri	– niezmiennik Riemanna [m]
T	– okres przebiegu zaburzeń, fal [s]
T_m	– czas pełnego manewru otwarcia, zamknięcia urządzenia sterującego przepływem (kierownicy) [s]

T_i	– stała czasowa inercji wody zawartej w przewodzie [s]
U	– funkcja zmiennej ζ, z
W	– względne natężenie przepływu [m^3/s], masy płynnej (wydatek masowy) [kg/s]
V	– objętość [m^3]
a	– przeswit pomiędzy łopatkami kierownicy, miara otwarcia kierownicy [mm]
b	– grubość laminarnej warstwy przyściennej [m]
c	– prędkość rozprzestrzeniania się zaburzenia fali [m/s]
d	– średnica przewodu ciśnieniowego (rurociągu, sztolni, galerii) [m]
e	– szorstkość bezwzględna [m, mm]
e_o	– grubość powłoki przewodu [m]
f	– funkcja
g	– przyspieszenie grawitacyjne [m/s^2]
h	– przyrost głębokości, wysokość fali, wielkość uderzenia hydraulicznego [m]
h_s	– strata hydrauliczna [m]
i	– liczba porządkowa charakterystyki prostej [–]
j	– liczba porządkowa charakterystyki wstecznej [–]
k	– kolejny numer, współczynnik [–]
l	– długość odcinka przewodu [m]
m	– masa [kg] lub
m	– współczynnik pochylenia skarpy kanału [–]
n	– prędkość obrotowa maszyny [obr/min]
$1/n$	– współczynnik prędkości do wzoru Manninga [$\text{m}^{1/3}/\text{s}$]
n_s	– wyróżnik szybkobieżności [obr/min]
r	– promień okręgu [m]
u	– prędkość przepływu [m/s]
w	– prędkość względna przepływu [m/s]
z	– współczynnik kształtu kanału trapezowego [–]
Θ	– funkcja $H = f(Q)$ – charakterystyka pompy
K	– stała Karmana [–]
Σ	– suma
M	– ilość ruchu [m^3]
Φ	– liczba przepływu falowego [–]
Ω	– natężenie przepływu względnego [m^3/s]
α	– współczynnik energii kinetycznej (de Saint-Venanta) [–]
β	– wskaźnik szerokości kanału przekroju parabolicznego [–]

γ	– ciężar właściwy [N/m ³]
δ	– współczynnik odkształcenia powłoki rurociągu [–]
$\varepsilon = H_{s,r}/H$	– współczynnik kształtu przekroju parabolicznego [–]
$\varepsilon = e/d$	– szorstkość względna [–]
ζ	– głębokość względna [–]
η	– współczynnik sprawności maszyny hydraulicznej [–]
χ	– względna współrzędna długości przewodu, kanału [–]
μ	– współczynnik wydatku przelewu, otworu [–]
μ_z	– wskaźnik zbrojenia rurociągu żelbetowego, sztolni [–]
ν	– kinematyczny współczynnik lepkości [m ² /s]
ν_z, ν_b, ν_s	– liczby Poissona, odpowiednio: stali, betonu, górotworu [–]
ξ	– współczynnik strat hydraulicznych [–]
ρ	– masa właściwa (gęstość) [kg/m ³]
φ	– współczynnik prędkości przepływu [–]
ω	– prędkość kątowna [1/s]

Uwaga: opisy sporadycznych oznaczeń lokalnych znajdują się bezpośrednio w tekście.

WPROWADZENIE

Wśród wielu zjawisk hydraulicznych występujących w budownictwie wodnym, a w szczególności w siłowniach wodnych, szczególnie istotne są niestalone przepływy wód wywołane przez urządzenia mechaniczne i maszyny hydrauliczne. Powstają w korycie otwartym lub w zamkniętym przewodzie ciśnieniowym, w którym natężenie przepływu Q zmienia się w czasie i na długości. Bywają spowodowane zewnętrznymi czynnikami naturalnymi albo celowym działaniem, polegającym na sterowaniu mocą lub przepływem.

Zależnie od szybkości zmian natężenia przepływu oraz rodzaju przewodu może powstać przepływ falowy lub niestalony wolnozmienny albo oba te zjawiska równocześnie. Fala powoduje zawsze niejako skokową zmianę natężenia przepływu, a przepływ wolnozmienny – zmianę ciągłą i relatywnie powolną, ale znacznie szybszą niż tempo zasadniczego przepływu wód. Opory ruchu oraz wszelkiego rodzaju przeszkody powodują, że fale oddalające się od źródła generacji zmniejszają swe rozmiary, a za falą powstaje przepływ niestalony wolnozmienny. W kanale otwartym rozprzestrzeniająca się fala nosi nazwę translacyjnej (rozdział pierwszy). Są cztery rodzaje takich fal. Każdy przepływ niestalony wywołujący gwałtowny wzrost lub spadek ciśnienia rozprzestrzeniającego się w przewodzie ciśnieniowym nosi nazwę uderzenia hydraulicznego. Uderzenie proste wywołuje falę ciśnienia, a złożone – przepływ niestalony wolnozmienny. Zjawiska te niekiedy zbyt intensywnie oddziałują na maszynę hydrauliczną i urządzenie sterujące, a przed wszystkim na przewód (kanał, rurociąg) prowadzący wodę roboczą. Te okoliczności skłoniły autora do matematycznego opisanie w niniejszym podręczniku wyżej wymienionych rodzajów przepływów niestalonych wywołanych przez maszyny hydrauliczne i opracowania modeli matematycznych pozwalających względnie dokładnie i właściwie wyznaczyć wartości powstającego przepływu niestalonego. Podręcznik ten jest przeznaczony przede wszystkim dla studentów i słuchaczy studiów podyplomowych i doktoranckich, obeznanych już z podstawowymi prawami hydrauliki. Może też być pomocny inżynierom zajmującym się projektowaniem i eksploatacją obiektów hydroenergetycznych, oddzielnych urządzeń i budowli hydrotechnicznych.

Przedstawione w podręczniku opisy mają głównie charakter teoretycznych rozważań, wywodów i analiz umożliwiających tworzenie racjonalnych modeli obliczeniowych. Bazą prezentowanych modeli matematycznych są podstawowe równania jednorodnej płynnej masy wody, energii i ilości ruchu oraz fundamentalne prawa przepływu podane przez Eulera (rozdział drugi).

W rozdziale trzecim, w p. 3.6, przedstawiono teorię charakterystyk zaadaptowaną do przepływu niestalonego wolnozmiennego. Ta matematyczna teoria, mająca szerokie zastosowanie w odniesieniu do zjawisk fizycznych, została opracowana i upubliczniona przez znamienitych matematyków (patrz wykaz literatury). Jej istotną cechą jest to, że zachodzące zmiany natężenia przepływu Q i jego pochodnych u , H są opisywane

matematycznie na drodze rozprzestrzeniania się każdego dowolnie wybranego naturalnego lub wirtualnego zaburzenia. W celu wykazania wyjątkowych zalet i możliwości szerokiego zastosowania tej teorii w p. 3.2, 3.3, 3.4 i 3.5 przedstawiono inne metody wyznaczania wartości przepływu nieustalonego wolnozmiennego, opisanego przez de Saint-Venanta.

W rozdziale czwartym omówiono kształt i wielkość dodatniej i ujemnej fali translacyjnej w przekroju poprzecznym prostokątnym, trapezowym i parabolicznym kanału otwartego. Falę dodatnią opisuje się w ruchomym układzie współrzędnych x, z poruszającym się z prędkością bezwzględną c . Wielkości tej fali są funkcją liczby względnego przepływu falowego Φ_0 .

Rozdział piąty omawia charakterystyczne uderzenia hydrauliczne, jakie wywołuje urządzenie sterujące i bieg nieustalony maszyny hydroenergetycznej oraz pompa przesyłowa. Prezentowane metody obliczeń uderzenia hydraulicznego zmiennego w czasie i na długości rurociągu $h = f(x, t)$ oraz biegu nieustalonego maszyny hydraulicznej $n = f(t)$ uwzględniają dość powszechnie spotykane właściwości konstrukcyjne rurociągu i ruchowe maszyn w postaci charakterystyk uniwersalnych.

W rozdziale szóstym opisano masowy przepływ oscylacyjny w komorach wyrównawczych. Rozpatruje się tu trzy typy komór wyrównawczych: prostą, dławikową i różnicową. Zmiany poziomu wody w komorze prostej zostały opisane na bazie drugiej zasady dynamiki Newtona, natomiast ekstremalne stany w komorze dławikowej i różnicowej – za pomocą formuł empirycznych.

Istotną cechą zawartych w podręczniku modeli opisujących zmiany wielkości hydraulicznych w przewodach prowadzących wodę roboczą i biegu nieustalonego maszyn hydraulicznych jest to, że uwzględniają one czynnik opisujący straty hydrauliczne na tarcie i zmiany prędkości przepływu powstające w przepływie nieustalonym. Formuły opisujące te straty przedstawiono w rozdziale siódmym, uzupełniającym prezentowane modele matematyczne.