

W książce można znaleźć treści, których trudno szukać w innych podręcznikach akademickich – liczne informacje natury praktycznej i dygresje, niezwykle cenne z punktu widzenia studenta inżynierii środowiska. Autorzy nawiązują z czytelnikiem swoisty dialog – podsuwają pomysły i sugerują ogólny przebieg pracy w laboratorium, ale nie zamykają ich w ściśle określonych ramach, ucząc samodzielności i pobudzając kreatywność. Pokazują, że praca w laboratorium może być swoistą „zabawą w eksperymentowanie”. Koncepcję, styl i język książki oceniam bardzo wysoko.

dr hab. inż. Katarzyna Weinerowska-Bords, prof. PG  
(z recenzji wydawniczej)



dr hab. inż. Łukasz Amanowicz – adiunkt Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Poznańskiej. Zajmuje się energooszczędnością w budownictwie, systemami HVAC oraz ich współpracą z OZE. Autor publikacji w recenzowanych czasopismach naukowych. Współautor podręczników akademickich. Członek PZITS. Opiekun Koła Naukowego Inżynierii Środowiska PP.



dr inż. Tomasz Schiller – adiunkt Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Poznańskiej. Zajmuje się zastosowaniem układów pompowych w wodociągach i kanalizacji, metodami zagospodarowania wody opadowej oraz racjonalnym kształtowaniem infrastruktury wodociągowo-kanalizacyjnej w przestrzeni miejskiej. Kierownik studiów podyplomowych.



Ł. Amanowicz, T. Schiller  
MECHANIKA PŁYNÓW W INŻYNIERII ŚRODOWISKA



Łukasz Amanowicz, Tomasz Schiller

# MECHANIKA PŁYNÓW W INŻYNIERII ŚRODOWISKA

## Wybrane zagadnienia w eksperymentach



Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej



Łukasz Amanowicz, Tomasz Schiller

# MECHANIKA PŁYNÓW W INŻYNIERII ŚRODOWISKA

Wybrane zagadnienia  
w eksperymentach



Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej

Łukasz Amanowicz, Tomasz Schiller

# **MECHANIKA PŁYNÓW W INŻYNIERII ŚRODOWISKA**

**Wybrane zagadnienia  
w eksperymentach**



Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej  
Poznań 2022

Recenzja

dr hab. inż. Katarzyna Weinerowska-Bords, prof. PG

Projekt okładki

Anna Rymarczyk

Zdjęcie na okładce

Unsplash

Redakcja

Katarzyna Muzia

Skład i łamanie

Eugeniusz Strykowski

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich.

Copyright © by Politechnika Poznańska, Poznań 2022

ISBN 978-83-7775-669-0

Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej

ul. Piotrowo 5

61-138 Poznań

tel. 61 665 3516

e-mail: [office\\_ed@put.poznan.pl](mailto:office_ed@put.poznan.pl)

[wydawnictwo.put.poznan.pl](http://wydawnictwo.put.poznan.pl)

Druk i oprawa

Zakład Poligraficzny A. Frąckowiak

tel. 502 604 192

e-mail: [biuro@afdruk.pl](mailto:biuro@afdruk.pl)

[www.afdruk.pl](http://www.afdruk.pl)

# SPIS TREŚCI

<b>Przedmowa</b> .....	9
<b>1. Wprowadzenie</b> .....	11
1.1. W jaki sposób czytać tę książkę? .....	11
1.2. Przed przystąpieniem do badań .....	13
1.3. Pomiar fizyczny, wielkość fizyczna, wartość .....	14
1.4. Ocena niepewności pomiarów .....	15
1.4.1. Podstawy matematyczne .....	15
1.4.2. Wartość prawdziwa a niepewność bezwzględna .....	17
1.4.3. Niepewności i ich rodzaje .....	17
1.4.4. Analiza niepewności przypadkowych (typu A) .....	21
1.4.5. Analiza niepewności pomiarów pośrednich (złożonych) .....	26
1.4.6. Przykład 1 .....	28
1.4.7. Przykład 2 .....	34
1.5. Prezentacja wyników pomiarów .....	37
1.5.1. Uwagi wstępne .....	37
1.5.2. Formatowanie sprawozdania – wymagania .....	37
1.5.3. Zaokrąglanie wyników pomiarów .....	38
1.5.4. Graficzna prezentacja wyników pomiarów .....	42
1.6. Wybrane podstawy z teorii mechaniki płynów .....	49
1.6.1. Równanie ciągłości przepływu .....	49
1.6.2. Równanie Bernoulliego .....	53
1.6.3. Straty ciśnienia a straty energii .....	64
<b>2. Przyrządy pomiarowe</b> .....	73
2.1. Na co zwrócić uwagę? .....	73
2.2. Przyrządy do pomiaru wielkości liniowych .....	74
2.2.1. Linijki, taśmy, metrówki .....	74
2.2.2. Suwmiarka .....	75
2.3. Przyrządy do pomiaru temperatury .....	77
2.3.1. Termometr rozszerzalnościowy cieczowy .....	78
2.3.2. Termometr elektryczny oporowy (rezystancyjny) .....	80
2.3.3. Termopara .....	81
2.3.4. Inne rodzaje termometrów .....	82
2.4. Przyrządy do pomiaru ciśnienia .....	83
2.4.1. Manometry cieczowe, piezometr .....	83
2.4.2. Manometr cieczowy dwuramienny (U-rurka) .....	90
2.4.3. Manometr jednoramienny i z rurką pochyłą .....	98
2.4.4. Barometr rtęciowy .....	100
2.4.5. Czynniki wpływające na pomiar za pomocą manometrów cieczowych ..	101
2.4.6. Manometr sprężysty z rurką lub przeponą sprężystą .....	102
2.4.7. Pomiar ciśnienia w przewodach – uwagi praktyczne .....	105
2.4.8. Manometry elektroniczne .....	107
2.4.9. Inne przyrządy do pomiaru ciśnienia .....	109

2.5. Przyrządy do pomiaru masy .....	111
2.6. Przyrządy do pomiaru przepływu i prędkości płynu .....	112
2.6.1. Wodomierze .....	112
2.6.2. Parametry wpływające na pomiar wodomierzem .....	115
2.6.3. Rurka Prandtla, rurka Pitota, listwy i pierścienie spiętrzające .....	118
2.6.4. Termoanemometr .....	129
2.6.5. Zwężki pomiarowe: kryzy, dysze, zwężki Venturiego .....	132
2.6.6. Przelew pomiarowy o ostrej krawędzi .....	149
2.6.7. Rotometr .....	159
2.6.8. Anemometr skrzydełkowy .....	163
<b>3. Eksperymenty .....</b>	<b>165</b>
3.1. Uwagi ogólne .....	165
3.1.1. Króćce pomiarowe .....	165
3.1.2. Pomiar ciśnienia – ale jakiego? .....	167
3.1.3. Profil prędkości płynu w przewodzie. Odcinki rozbiegowe .....	169
3.2. Doświadczenie Reynoldsa – przepływ laminarny, turbulentny, przejściowy ..	174
3.2.1. Wprowadzenie. Liczba Reynoldsa .....	174
3.2.2. Cel ćwiczenia .....	179
3.2.3. Stanowisko pomiarowe i przebieg ćwiczenia .....	179
3.2.4. Opracowanie wyników .....	180
3.3. Pomiar poziomu cieczy w zbiorniku. Lewar. Wykorzystanie wiedzy o pod- i nadciśnieniu .....	180
3.3.1. Wprowadzenie .....	180
3.3.2. Podstawy teoretyczne działania lewara .....	182
3.3.3. Cel ćwiczenia .....	185
3.3.4. Stanowisko pomiarowe .....	186
3.3.5. Opracowanie wyników .....	188
3.4. Pomiar natężenia przepływu wody w przewodzie pod ciśnieniem .....	189
3.4.1. Wprowadzenie .....	189
3.4.2. Cel ćwiczenia .....	189
3.4.3. Stanowisko pomiarowe i przebieg ćwiczenia .....	190
3.4.4. Wyznaczanie współczynnika przepływu zwężki .....	198
3.4.5. Wyznaczanie współczynnika przepływu dla rurki Pitota .....	200
3.4.6. Koszt pomiaru – strata ciśnienia urządzenia pomiarowego .....	201
3.5. Pomiar strumienia powietrza i rozkład ciśnienia wzdłuż drogi przepływu ...	204
3.5.1. Wprowadzenie .....	204
3.5.2. Cel ćwiczenia .....	205
3.5.3. W którą stronę płynie powietrze? .....	205
3.5.4. Stanowisko pomiarowe i przebieg ćwiczenia .....	208
3.5.5. Zmiana ciśnienia wzdłuż drogi przepływu powietrza – linia ciśnień ...	208
3.5.6. Pomiar natężenia przepływu powietrza za pomocą zwężek .....	210
3.5.7. Pomiar natężenia przepływu innymi metodami .....	212
3.5.8. Opracowanie wyników .....	212
3.6. Profil prędkości w przewodzie o przekroju kołowym .....	213
3.6.1. Wprowadzenie .....	213
3.6.2. Podstawy teoretyczne .....	214
3.6.3. Cel ćwiczenia .....	219
3.6.4. Stanowisko pomiarowe i przebieg ćwiczenia .....	220
3.7. Pomiar liniowych strat ciśnienia .....	224
3.7.1. Wprowadzenie .....	224

---

3.7.2. Podstawy teoretyczne .....	225
3.7.3. Cel ćwiczenia .....	235
3.7.4. Stanowisko pomiarowe i przebieg ćwiczenia .....	235
3.7.5. Opracowanie wyników .....	237
3.8. Pomiar miejscowych strat ciśnienia .....	239
3.8.1. Wprowadzenie .....	239
3.8.2. Straty miejscowe w praktyce .....	244
3.8.3. Cel ćwiczenia .....	248
3.8.4. Schemat stanowiska .....	248
3.8.5. Opracowanie wyników .....	259
3.8.6. Katalog oporów miejscowych .....	259
3.9. Badanie charakterystyki przepływowej zaworu regulacyjnego .....	272
3.9.1. Cel ćwiczenia .....	272
3.9.2. Zawory odcinające i regulacyjne .....	272
3.9.3. Współczynnik $k_v$ zaworu .....	275
3.9.4. Stanowisko pomiarowe i przebieg ćwiczenia .....	276
3.9.5. Opracowanie wyników .....	280
3.10. Badanie charakterystyki przepływowej wentylatora .....	280
3.10.1. Wprowadzenie .....	280
3.10.2. Cel ćwiczenia .....	287
3.10.3. Stanowisko pomiarowe .....	287
3.10.4. Przebieg ćwiczenia .....	288
3.10.5. Opracowanie wyników .....	289
3.11. Przepływ cieczy przez przelewy .....	289
3.11.1. Wprowadzenie .....	289
3.11.2. Cel ćwiczenia .....	290
3.11.3. Stanowisko pomiarowe .....	290
3.11.4. Opracowanie wyników .....	292
3.12. Własności filtracyjne ośrodka porowatego .....	292
3.12.1. Wprowadzenie .....	292
3.12.2. Podstawy teoretyczne .....	293
3.12.3. Cel ćwiczenia .....	301
3.12.4. Stanowisko pomiarowe .....	301
3.12.5. Opracowanie wyników .....	303
<b>Literatura .....</b>	<b>305</b>





# PRZEDMOWA

W procesie kształcenia przyszłych inżynierów brakuje książek dedykowanych osobom spotykającym się po raz pierwszy z tematyką mechaniki płynów, które łączyłyby cechy skryptu do ćwiczeń laboratoryjnych i podręcznika wprowadzającego do podstaw tego przedmiotu. Skrypty bywają zbyt skrótowe, a podręczniki trudne w odbiorze dla osób początkujących. W ramach niniejszej publikacji postanowiliśmy połączyć najefektywniejszą formę nauki – przez eksperyment z nietypowym, uproszczonym opisem jego podstaw teoretycznych, wypełniając wspomnianą lukę.

Język książki dostosowano do poziomu absolwenta liceum lub technikum. Staraliśmy się opracować zapadające na długo w pamięć wyjaśnienia, stosując liczne kolokwializmy, powtórzenia i parafrazy, a także obrazowe porównania odnoszące się do doświadczeń z codziennego życia każdego człowieka.

Podział podręcznika na rozdziały, a także sam styl prezentowanych treści odbiega od tradycyjnego modelu. Wyodrębnione uwagi „na marginesie”, emfazy, zachęty do szerszego spojrzenia na dane zagadnienie, uwypuklenie podziału na typowe podręcznikowe definicje i nietypowe inżynierskie wyjaśnienia mają prowadzić do lepszego zrozumienia zapamiętywanych treści, tak jakby nie były one narzucone, ale wynikały z naturalnej kolei pełnego twórczej satysfakcji procesu zdobywania wiedzy.

Zakładamy, że czytelnik nie jest zmuszony do studiowania mechaniki płynów, ale z ciekawości chce poznawać jej podstawy. Położyliśmy nacisk na aplikacyjny charakter przyswajanych informacji w zakresie inżynierii środowiska, głównie w sieciach i instalacjach budowlanych oraz systemach utrzymania komfortu cieplnego. Publikacja, w naszym odczuciu, ma pomóc w zdobyciu podstawowej wiedzy z zakresu mechaniki płynów, a zarazem ułatwić dalsze jej uzupełnianie na podstawie klasycznych podręczników. Zadbaliśmy o dużą liczbę szczegółowych odniesień do literatury, jak również dokładny opis uzupełnień, do których odsyłamy.

Ocenę tego, czy udało nam się osiągnąć wszystkie wyżej wymienione cele, pozostawiamy czytelnikowi. Wciąż rozwijając nasz warsztat dydaktyczny, liczymy na konstruktywne uwagi i propozycje ulepszeń naszej pracy. Życzymy efektywnej lektury.