

**ANDRZEJ DYLLA**

# **FIZYKA CIEPLNA BUDOWLI W PRAKTYCE**

obliczenia ciepłno-wilgotnościowe



FIZYKA BUDOWLI



**PWN**

**ANDRZEJ DYLLA**

**FIZYKA CIEPLNA  
BUDOWLI  
W PRAKTYCE**

obliczenia ciepłno-wilgotnościowe



**ANDRZEJ DYLLA**

**FIZYKA CIEPLNA  
BUDOWLI  
W PRAKTYCE**

obliczenia cieplno-wilgotnościowe



Projekt okładki i stron tytułowych **Bartosz Dobrowolski**

Ilustracja na okładce **alice-photo/Shutterstock**

Konsultacja merytoryczna dr inż. **Agnieszka Kaliszuk-Wieteka**

Wydawca **Izabela Ewa Mika**

Redaktor prowadzący **Irena Puchalska**

Redaktor **Ewa Charitonow**

Produkcja **Mariola Grzywacka**

Łamanie **Ewa Szelatyńska, ScanSystem.pl**

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](http://www.legalnakultura.pl)  
*Polska Izba Książki*

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA  
Warszawa 2015

ISBN 978-83-01-18168-0

Wydanie I

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](mailto:pwn@pwn.com.pl),  
[www.pwn.pl](http://www.pwn.pl)

Druk i oprawa: Białostockie Zakłady Graficzne SA

# Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń .....	XIII
Przedmowa .....	XVII
<b>1. Procedury obliczeń ciepłno-wilgotnościowych .....</b>	<b>1</b>
1.1. Rola fizyki cieplnej budowli w projektowaniu budynków .....	1
1.2. Kody ilustracyjne i obliczeniowe książki .....	3
1.3. Niektóre błędy fizyczne w kształtowaniu struktury termoizolacyjnej budynku i ich następstwa .....	5
1.4. Intuicyjne i numeryczne projektowanie złączy .....	8
1.5. Kryterium energetyczne i wilgotnościowe .....	11
1.5.1. Charakterystyka energetyczna budynków .....	14
1.5.2. Wymagania w zakresie ochrony przeciwwilgociowej .....	17
1.6. Metody obliczeniowe fizyki budowli .....	18
<b>2. Klimat i mikroklimat budynku .....</b>	<b>21</b>
2.1. Elementy i rodzaje klimatu .....	23
2.2. Promieniowanie słoneczne .....	25
2.3. Temperatura powietrza zewnętrznego .....	27
2.4. Wilgotność powietrza atmosferycznego .....	30
2.5. Opady atmosferyczne .....	32
2.6. Wiatr i zjawiska burzowe .....	33
2.7. Klimat miasta .....	35
2.8. Obliczeniowe parametry klimatu .....	40
2.8.1. Parametry pogodowe w obliczeniach cieplnych .....	40
2.8.2. Parametry pogodowe w obliczeniach wilgotnościowych ..	41
2.9. Parametry mikroklimatu .....	44
2.9.1. Temperatury powietrza .....	46
2.9.2. Temperatury promieniowania, asymetria promieniowania ..	47
2.9.3. Wilgotność powietrza wewnętrznego .....	49

2.9.4. Ruch powietrza w pomieszczeniach .....	51
2.10. Parametry cieplne człowieka .....	51
2.10.1. Wydatek energetyczny, ciepło metaboliczne .....	52
2.10.2. Przenikanie ciepła przez odzież .....	53
2.11. Przegląd metod oceny komfortu cieplnego .....	54
2.12. Metoda Fangera oceny komfortu cieplnego .....	57
2.13. Pożądane wartości parametrów mikroklimatu .....	63
2.14. Dane do projektowania i obliczeń .....	65
<b>3. Jednowymiarowe przepływy ciepła w przegrodzie .....</b>	<b>66</b>
3.1. Zasadnicze rodzaje wymiany ciepła. Pole temperatur .....	68
3.2. Podstawowe zależności opisujące przewodzenie ciepła .....	71
3.3. Jednowymiarowe ustalone przenikanie ciepła .....	74
3.4. Konwekcyjne przejmowanie ciepła na powierzchni przegrody ....	81
3.4.1. Konwekcja swobodna na powierzchni wewnętrznej .....	82
3.4.2. Konwekcja wymuszona i mieszana .....	84
3.5. Współczynniki przejmowania ciepła przez promieniowanie .....	85
3.5.1. Podstawy teorii promieniowania ciepła .....	85
3.5.2. Wyznaczanie współczynników przejmowania ciepła przez promieniowanie .....	87
3.5.3. Promieniowanie ciepła do nieboskłonu .....	88
3.6. Złożona wymiana ciepła .....	91
3.6.1. Obliczeniowe wartości oporów i współczynników przejmowa- nia ciepła .....	92
3.6.2. Obliczeniowe wartości oporów i współczynników przejmowa- nia ciepła dla przypadków szczególnych .....	92
3.7. Obliczanie strat ciepła przez przegrody w ustalonym polu jednowy- miarowym .....	94
3.8. Szczeliny w przegrodzie .....	95
3.8.1. Szczeliny zamknięte .....	96
3.8.2. Szczeliny słabo i dobrze wentylowane .....	100
3.9. Wymiana ciepła w przegrodach przezroczystych i przez elementy specjalne .....	102
3.10. Przybliżone metody obliczeń cieplnych przegród niejednorodnych	106
3.10.1. Przenikanie ciepła przez proste przegrody niejednorodne; metoda „kresów” .....	107
3.10.2. Opór cieplny przestrzeni nieogrzewanych .....	116
3.11. Poprawki współczynnika przenikania ciepła .....	121
<b>4. Płaskie i przestrzenne przepływy ciepła – teoria mostków cieplnych .....</b>	<b>124</b>
4.1. Istota płaskich i przestrzennych przepływów ciepła .....	126
4.2. Gałęziowe strumienie ciepła w złączu .....	128
4.2.1. Strumienie ciepła w modelu jednostrefowym .....	128

4.2.2.	Strumienie ciepła w modelu dwustrefowym .....	130
4.3.	Klasyfikacja mostków cieplnych .....	131
4.4.	Parametry termiczne określające mostek .....	134
4.4.1.	Liniowy współczynnik przenikania ciepła .....	134
4.4.2.	Punktowy współczynnik przenikania ciepła .....	139
4.4.3.	Gałęziowe współczynniki przenikania ciepła .....	142
4.4.4.	Najniższa temperatura na wewnętrznej powierzchni mostka ciepłego. Współczynnik temperaturowy $f_{Rsi}$ .....	151
4.5.	Wpływ mostka na kształtowanie warunków cieplnych środowiska	157
4.6.	Metody szacowania parametrów termicznych mostków .....	160
4.6.1.	Parametry mostków cieplnych wg katalogów ITB .....	160
4.6.2.	Parametry mostków cieplnych wg normy PN-EN ISO 14683 .....	162
4.6.3.	Katalog mostków cieplnych przygotowany w UTP w Byd- goszczy [10, 32] .....	163
<b>5.</b>	<b>Numeryczne metody obliczeń cieplnych .....</b>	<b>166</b>
5.1.	Metody różnic i elementów skończonych .....	166
5.2.	Praktyczne aspekty stosowania metod numerycznych .....	170
5.3.	Zasady modelowania mostków .....	172
5.3.1.	Geometria mostków ponad powierzchnią gruntu .....	174
5.3.2.	Mostki w podłożu gruntowym .....	176
5.3.3.	Procedury korekcyjne .....	178
5.3.4.	Ustalenie wartości obliczeniowych na granicach obszaru mostka .....	178
5.4.	Walidacja numerycznych metod i programów obliczeniowych ...	179
5.5.	Symulacja zadań cieplno-wilgotnościowych za pomocą progra- mów komputerowych .....	181
5.5.1.	Pożądane cechy programów symulacyjnych .....	181
5.5.2.	Budowanie algorytmów symulacyjnych; krok po kroku ...	182
5.6.	Przykłady obliczeń mostków płaskich .....	188
5.7.	Przykłady obliczania mostka przestrzennego .....	199
5.8.	Obliczanie mostków w płaskich modelach dwustrefowych .....	201
<b>6.</b>	<b>Obliczanie strat ciepła z budynku do środowiska .....</b>	<b>206</b>
6.1.	Równanie bilansu energetycznego budynku w zakresie ogrzewania i wentylacji .....	206
6.2.	Współczynnik przenoszenia ciepła przez przenikanie z budynku do środowiska .....	208
6.3.	Bezpośredni współczynnik $H_D$ przenoszenia ciepła przez obudowę budynek ponad powierzchnią terenu .....	213
6.3.1.	Współczynnik przenoszenia ciepła przez złącza .....	214
6.3.2.	Składanie strumieni cieplnych na powierzchni przegrody	216
6.3.3.	Współczynnik przenoszenia ciepła przegród .....	219



6.3.4.	Realny współczynnik przenikania ciepła i niejednorodność przegród .....	222
6.3.5.	Bilansowanie strumieni ciepła dla budynku .....	224
6.3.6.	Przykłady obliczeniowe .....	225
6.4.	Przenoszenie ciepła przez okno .....	237
6.4.1.	Obliczanie współczynnika przenikania ciepła okna .....	239
6.4.2.	Przykłady obliczania współczynników przenikania ciepła okien .....	241
6.4.3.	Przenoszenie ciepła przez okna i drzwi zewnętrzne z uwzględnieniem współczynnika $U_w$ .....	244
6.5.	Współczynnik przenoszenia ciepła przez przenikanie $H_U$ przez przestrzenie nieogrzewane (nieklimatyzowane) .....	247
6.5.1.	Metoda uproszczona .....	249
6.5.2.	Numeryczna metoda obliczania współczynnika przenoszenia ciepła przez przestrzenie nieogrzewane .....	251
6.5.3.	Temperatura w przestrzeni nieogrzewanej .....	255
6.6.	Współczynnik przenoszenia ciepła przez przenikanie do przylegających budynków (lokali) $H_A$ .....	256
6.7.	Wentylacyjne straty ciepła .....	259
6.7.1.	Zasady określania współczynnika przenoszenia ciepła przez wentylację .....	261
6.7.2.	Wielkość wymiany powietrza z przestrzeni nieogrzewanej .....	264
6.7.3.	Szczególny przypadek przestrzeni wentylowanej pod podłogą podniesioną .....	265
<b>7.</b>	<b>Wymiana ciepła przez grunt .....</b>	<b>267</b>
7.1.	Wprowadzenie .....	267
7.2.	Klasyfikacja obudowy budynku w kontakcie z gruntem .....	269
7.3.	Trójwymiarowa metoda numeryczna obliczania przepływów ciepła w gruncie .....	270
7.3.1.	Podłoga na gruncie .....	270
7.3.2.	Podziemie ogrzewane .....	277
7.3.3.	Podziemie nieogrzewane .....	281
7.4.	Przybliżona metoda szacowania strat ciepła przez grunt pod budynkiem .....	286
7.4.1.	Parametry obliczeniowe .....	288
7.4.2.	Obliczenia strat ciepła przez podłogę na gruncie .....	289
7.4.3.	Obliczenia strat ciepła w ogrzewanym podziemiu metodą przybliżoną .....	293
7.4.4.	Nieogrzewane przestrzenie wentylowane w metodzie przybliżonej .....	297
7.5.	Analiza dokładności metod określania wymiany ciepła przez grunt .....	303
7.6.	Uwzględnienie periodycznych przepływów ciepła w gruncie .....	304

7.6.1. Metoda uwzględniająca periodyczne przepływy ciepła w gruncie .....	305
7.6.2. Przykład obliczania periodycznych strumieni ciepłych ...	307
<b>8. Właściwości cieplno-wilgotnościowe materiałów budowlanych .....</b>	<b>309</b>
8.1. Charakterystyki i definicje .....	310
8.2. Analiza termiczna materiałów .....	311
8.2.1. Parametry fizyczne materiałów, kształtujące ich przewodność cieplną .....	311
8.2.2. Pojemność cieplna materiałów .....	316
8.2.3. Promieniowanie cieplne materiałów .....	317
8.3. Stan wilgotnościowy materiału .....	319
8.3.1. Sorpcja i desorpcja wilgoci .....	319
8.3.2. Dyfuzja pary wodnej przez przegrody .....	322
8.3.3. Kapilarny ruch wilgoci w materiałach budowlanych .....	324
<b>9. Roczne bilansowanie zużycia energii do ogrzewania i wentylacji .....</b>	<b>327</b>
9.1. Zasady bilansowania energetycznego .....	328
9.1.1. Równanie bilansu energetycznego budynku .....	329
9.1.2. Strefy obliczeniowe temperatury w budynkach i lokalach .....	330
9.2. Procedura obliczeniowa .....	331
9.3. Zyski ciepła od źródeł wewnętrznych .....	332
9.4. Zyski ciepła od nasłonecznienia .....	333
9.4.1. Równanie podstawowe dla typowych powierzchni przeszkłonych .....	334
9.4.2. Całkowita przepuszczalność energii słonecznej dla powierzchni oszklonej .....	335
9.4.3. Czynniki korekcyjne zacienienia od przeszkód zewnętrznych .....	335
9.4.4. Czynniki redukcji dla ruchomych elementów zacięających .....	338
9.4.5. Zyski ciepła od nasłonecznienia elementów specjalnych ..	339
9.5. Współczynnik wykorzystania zysków ciepła .....	343
9.6. Metoda obliczeń miesięcznych .....	346
9.7. Obliczanie rocznego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynku (lokalu) .....	347
<b>10. Obliczenia cieplne .....</b>	<b>349</b>
10.1. Uwagi wstępne .....	349
10.2. Geneza formułowania wymagań cieplno-wilgotnościowych .....	351
10.3. Współczesny i przyszły poziom ochrony cieplnej .....	353

10.3.1. Wymagane wartości wskaźnika zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną $EP$ .....	355
10.3.2. Wymagane wartości współczynnika przenikania ciepła ścian budynków .....	356
10.3.3. Wymagane wartości współczynnika przenikania ciepła dachów, stropodachów oraz podłóg stykających się z gruntem .....	357
10.3.4. Wymagane wartości współczynnika przenikania ciepła okien, drzwi balkonowych i drzwi zewnętrznych .....	360
10.3.5. Graficzna ilustracja wymagań termoizolacyjnych .....	362
10.3.6. Wielkość przeszklenia .....	363
10.4. Dane do obliczeń cieplnych .....	364
10.5. Schemat I sprawdzenia wymagań w zakresie wartości współczynników przenikania ciepła elementów budynku .....	365
10.6. Schemat II sprawdzenia wymaganego poziomu wskaźnika zapotrzebowania na energię nieodnawialną .....	366
10.7. Przykłady obliczeniowe .....	368
<b>11. Mechanizmy przenoszenia wilgoci w przegrodach budowlanych .....</b>	<b>391</b>
11.1. Wiadomości ogólne .....	391
11.2. Przyczyny zawilgocenia przegród budowlanych .....	393
11.2.1. Wilgoć budowlana .....	394
11.2.2. Opady atmosferyczne .....	394
11.2.3. Kondensacja pary wodnej na wewnętrznej powierzchni przegrody .....	395
11.2.4. Kondensacja pary wodnej wewnątrz przegrody .....	396
11.3. Skutki nadmiernego zawilgocenia przegród .....	396
11.3.1. Destrukcja biologiczna wewnątrz mieszkalnych oraz przegród .....	397
11.3.2. Fizyczne i chemiczne skutki zawilgocenia .....	398
11.3.3. Niszczenie przegród w wyniku zamarzania .....	400
11.4. Mechanizmy ruchu wilgoci w przegrodach budowlanych .....	401
11.4.1. Teoria dyfuzji pary wodnej przez przegrodę .....	402
11.4.2. Wykresy teorii dyfuzyjnej .....	405
11.4.3. Metody szacowania kondensacji wewnętrznej w przegrodzie .....	407
11.4.4. Przykład szacowania kondensacji wewnętrznej prostą metodą dyfuzyjną .....	412
11.4.5. Przepływy kapilarne .....	416
<b>12. Ochrona przeciwwilgociowa przegród i budynków .....</b>	<b>421</b>
12.1. Wymagania ogólne .....	421
12.2. Zabezpieczenia przed działaniem wód opadowych i z topniejącego śniegu .....	422

12.3. Izolacje przeciwwilgociowe i przeciwwodne (hydroizolacje) .....	424
12.3.1. Ochrona przed niebezpiecznym promieniowaniem .....	424
12.3.2. Izolacje przeciwwilgociowe w budynkach .....	425
12.4. Materiały odporne na działanie wilgoci .....	428
12.4.1. Materiały budowlane w środowiskach wilgotnych .....	429
12.4.2. Dobór materiałów budowlanych w zależności od strefy za- wilgocenia przegrody .....	429
12.5. Ochrona przed kondensacją wilgoci na powierzchni wewnętrznej przegrody .....	432
12.6. Ochrona przed nadmierną kondensacją wilgoci we wnętrzu prze- grody .....	434
12.6.1. Kształtowanie wymagań wilgotnościowych w Polsce (w ostatnich latach) .....	434
12.6.2. Wpływ geometrii przegród i złączy na powstawanie obsza- rów kondensacji międzywarstwowej .....	435
12.6.3. Znaczenie czasu trwania stanów krytycznych w kształtowa- niu wymagań wilgotnościowych .....	437
<b>13. Sprawdzenie kondensacji wilgoci .....</b>	<b>439</b>
13.1. Warunki graniczne w zadaniach wilgotnościowych .....	440
13.2. Zasady szacowania kondensacji wilgoci na powierzchni wewnętr- znej przegrody .....	444
13.3. Metoda badania kondensacji powierzchniowej wg normy PN-EN ISO 13788 .....	445
13.3.1. Dwa sposoby ustalania dopuszczalnej wilgotności we- wnętrznej .....	446
13.3.2. Procedury projektowe .....	447
13.4. Uproszczenia w szacowaniu kondensacji powierzchniowej w Polsce .....	450
13.5. Przykłady obliczania kondensacji w złączach płaskich i prze- strzennych .....	452
13.6. Zasady szacowania kondensacji we wnętrzu przegrody .....	458
13.6.1. Procedury obliczeniowe metody Glasera .....	458
13.6.2. Przykłady obliczania kondensacji wewnętrznej w prze- grodzie .....	459
13.7. Metody bardziej zaawansowane .....	470
13.7.1. Metoda sprzężonego transportu ciepła i masy WUFI .....	470
13.8. Aneks .....	473
13.8.1. Warunki graniczne w zadaniach sprawdzania kondensacji powierzchniowej .....	473
13.8.2. Obliczanie wartości krytycznej czynnika temperaturowego przy kondensacji powierzchniowej .....	475

<b>14. Projektowanie złączy budowlanych</b> .....	478
14.1. Wprowadzenie .....	478
14.2. Algorytmy szkoły projektowania złączy budowlanych .....	479
14.3. Modelowanie termiczne złączy płaskich .....	482
14.3.1. Parapet betonowy w ścianie trójwarstwowej .....	482
14.3.2. Balkon z nośnikiem izotermicznym i progiem klinkierowym .....	486
14.4. Modelowanie termiczne złączy przestrzennych .....	489
14.5. Modelowanie cieplno-wilgotnościowe złączy płaskich .....	493
<b>Wykaz literatury</b> .....	501