



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



[Kup książkę](#)

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 Szelażyńska, 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
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,
www.pwn.pl

Druk i oprawa: Białostockie Zakłady Graficzne SA

[Kup książkę](#)

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń	XIII
Przedmowa	XVII
1. Procedury obliczeń ciepłno-wilgotnościowych	1
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
2. Klimat i mikroklimat budynku	21
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 Fanger'a oceny komfortu cieplnego	57
2.13. Pożądane wartości parametrów mikroklimatu	63
2.14. Dane do projektowania i obliczeń	65
3. Jednowymiarowe przepływy ciepła w przegrodzie	66
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 niebosłonu	88
3.6. Złożona wymiana ciepła	91
3.6.1. Obliczeniowe wartości oporów i współczynników przejmowania ciepła	92
3.6.2. Obliczeniowe wartości oporów i współczynników przejmowania ciepła dla przypadków szczególnych	92
3.7. Obliczanie strat ciepła przez przegrody w ustalonym polu jednowymiarowym	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
4. Płaskie i przestrzenne przepływy ciepła – teoria mostków cieplnych	124
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
5.	Numeryczne metody obliczeń cieplnych	166
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 ciepłno-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
6.	Obliczanie strat ciepła z budynku do środowiska	206
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 przestrzeń nieogrzewane (nieklimatyzowane)	247
6.5.1.	Metoda uproszczona	249
6.5.2.	Numeryczna metoda obliczania współczynnika przenoszenia ciepła przez przestrzeń nieogrzewane	251
6.5.3.	Temperatura w przestrzeni nieogrzewanej	255
6.6.	Współczynnik przenoszenia ciepła przez przenikanie do przylegających budynków (lokalii) 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
7.	Wymiana ciepła przez grunt	267
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 okresowe przepływy ciepła w gruncie	305
7.6.2. Przykład obliczania okresowych strumieni ciepłych ...	307
8. Właściwości cieplno-wilgotnościowe materiałów budowlanych	309
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
9. Roczne bilansowanie zużycia energii do ogrzewania i wentylacji	327
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 zacielenia od przeszkód zewnętrznych	335
9.4.4. Czynniki redukcji dla ruchomych elementów zacieleniających	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
10. Obliczenia cieplne	349
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 termoz izolacyjnych	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
11. Mechanizmy przenoszenia wilgoci w przegrodach budowlanych	391
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
12. Ochrona przeciwwilgociowa przegród i budynków	421
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
13. Sprawdzenie kondensacji wilgoci	439
13.1. Warunki graniczne w zadaniach wilgotnościowych	440
13.2. Zasady szacowania kondensacji wilgoci na powierzchni wewnętrz- nej 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

14. Projektowanie złączy budowlanych	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
Wykaz literatury	501