

Sebastian Bielski

Wybrane zagadnienia przeptywów ciepła

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Dariusz Mikielwicz

RECENZENT

Stanisław Kwitnewski

REDAKCJA JĘZYKOWA

Agnieszka Frankiewicz

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 2024

ISBN 978-83-7348-908-0

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie I. Ark. wyd. 7,5, umowa nr 1295/1228

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń	5
Wstęp	6
1. Pojęcia wstępne	7
1.1. Definicje	7
1.1.1. Ciepło	7
1.1.2. Energia wewnętrzna	7
1.1.3. Temperatura	8
1.1.4. Wymiana ciepła	8
1.2. Mechanizmy wymiany ciepła	11
1.2.1. Przewodzenie	11
1.2.2. Konwekcja	12
1.2.3. Promieniowanie cieplne	12
1.2.4. Wymiana ustalona i nieustalona	12
1.3. Pojęcia i zależności opisujące przepływ ciepła	13
1.3.1. Przewodzenie	14
1.3.2. Przejmowanie	16
1.3.3. Promieniowanie	17
1.3.4. Przenikanie jako przykład złożonej wymiany ciepła	18
2. Równanie przewodzenia ciepła	22
2.1. Przewodność cieplna	22
2.2. Temperatura jako pole skalarne	23
2.3. Wyprowadzenie równania przewodzenia ciepła	24
2.4. Warunki początkowe i brzegowe	30
3. Przewodzenie ciepła w stanie ustalonym bez źródeł ciepła	33
3.1. Przypadki jednowymiarowe	33
3.2. Ścianki złożone, prawo spadku temperatury, opór cieplny	40
3.3. Żebro o stałym przekroju	60
3.4. Przypadki dwuwymiarowe	63
4. Przewodzenie ciepła w stanie ustalonym z wewnętrznymi źródłami ciepła	72
4.1. Równanie przewodzenia ciepła w przypadku źródeł wewnętrznych	72
4.2. Jednowymiarowe przewodzenie ciepła przy stałej gęstości źródeł	73
4.3. Przewodzenie ciepła przy nierównomiernym rozkładzie źródeł	79
4.4. Przewodność cieplna zależna od temperatury	80
5. Przewodzenie ciepła w stanie nieustalonym	82
5.1. Zagadnienie podstawowe	82
5.2. Zagadnienie uwzględniające przejmwowanie na brzegach	88
5.3. Uzupełnienie dotyczące warunków brzegowych	93
5.4. Stałe warunki brzegowe	95
5.5. Zagadnienie nieustalone dla kuli	98

5.6. Zagadnienie nieustalone dla walca	101
5.7. Zagadnienie dwuwymiarowe	106
5.8. Jednowymiarowy przepływ ciepła w przypadku zmiennych w czasie warunków brzegowych	111
5.9. Przykład zagadnienia nieustalonego w obecności źródeł ciepła	119
5.10. Przewodzenie ciepła w tkance	121
5.11. Tarcie jako źródło ciepła	122
6. Wprowadzenie do matematycznego opisu konwekcji	124
6.1. Równanie ciągłości	124
6.2. Równanie Naviera–Stokesa	128
6.3. Równanie energii	133
7. Promieniowanie	137
7.1. Pojęcia wstępne	137
7.2. Definicje	139
7.3. Zdolność emisyjna	141
7.4. Wymiana ciepła przez promieniowanie między powierzchniami równoległymi	148
7.5. Prawo Lamberta	152
Literatura	156

Wykaz ważniejszych oznaczeń

a	–	współczynnik wyrównywania temperatury [m^2/s]
c	–	prędkość światła [m/s]
c_p	–	ciepło właściwe [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]
k	–	współczynnik przenikania ciepła [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]
\vec{n}	–	jednostkowy wektor normalny
p	–	ciśnienie [Pa]
Q	–	ilość ciepła [J]
\vec{q}	–	gęstość strumienia ciepła [W/m^2]
q_v	–	wydajność źródeł ciepła [W/m^3]
T	–	temperatura [K , $^\circ\text{C}$]
\hat{T}	–	tensor naprężeń [Pa]
\vec{v}	–	prędkość [m/s]
α	–	współczynnik przejmowania ciepła [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]
η	–	lepkość [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]
Φ	–	strumień ciepła [W]
λ	–	współczynnik przewodzenia ciepła [$\text{W}/(\text{mK})$]
ρ	–	gęstość [kg/m^3]

Wstęp

Wykład do przedmiotu *przepływ ciepła* dla Studentów kierunku *fizyka techniczna* na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej poprowadziłem po raz pierwszy w roku akademickim 2008/09. Od tego czasu co roku staram się rozwijać i wzbogacać zakres materiału prezentowanego Studentom. Ważną składową przedmiotu zawsze były zajęcia laboratoryjne w pracowni komputerowej, w ramach których implementowaliśmy numerycznie sporo zagadnień o znaczeniu zarówno teoretycznym, jak i technicznym. Oczywiście jest, że współcześnie wiele konkretnych problemów dotyczących przepływów ciepła i rozkładu temperatury bada się za pomocą odpowiednich środowisk obliczeniowych. Myślę natomiast, że aby nauczyć się pracy z takimi środowiskami, warto zacząć od przypadków, dla których rozwiązania można uzyskać analitycznie, i dlatego kładłem dość mocny nacisk na stosowanie choćby metody rozdzielania zmiennych jako narzędzia do poszukiwania rozwiązań zagadnień przewodzenia ciepła dla prostej geometrii. Wbrew pozorom wzór opisujący rozwiązanie analityczne nie jest tylko wyrażeniem matematycznym, lecz zawiera sporo informacji istotnych z perspektywy fizyki. W dodatku możliwość porównania wyników otrzymanych numerycznie z rezultatami uzyskanymi analitycznie pozwala odpowiedzieć na pytanie, czy właściwie korzystamy z narzędzi dostępnych we wspomnianych środowiskach obliczeniowych.

Inspiracją do zainteresowania się niektórymi tematami jest dla mnie obserwacja otoczenia. To właśnie dzięki temu miałem okazję i przyjemność współpracować ze Studentami w ramach prac inżynierskich i magisterskich, w których zajmowaliśmy się modelowaniem efektywności radiatorów i wymienników ciepła, a także oporem cieplnym ścian budynków czy rozkładem temperatury w tkance poddanej działaniu zewnętrznego źródła ciepła. Wiele nauczyłem się przy okazji współpracy w ramach projektu realizowanego w ówczesnej Państwowej Wyższej Szkole Zawodowej w Elblągu (obecna nazwa to Akademia Nauk Stosowanych w Elblągu) dla zewnętrznej firmy zajmującej się produkcją kotłów.

Przejęcie w roku 2020 w tryb zdalnego nauczania stało się impulsem do usystematyzowania wiedzy, którą przekazuję Studentom, i zaprezentowania jej w formie skryptu. Chcę podziękować wszystkim tym Studentom, którzy korzystali z notatek będących punktem wyjścia do stworzenia poszczególnych rozdziałów skryptu i zgłaszali konstruktywne uwagi. Mam tu na myśli Studentów kierunku *fizyka techniczna* z lat 2019/20, 2020/21 oraz 2021/22. Duże znaczenie miały dla mnie Wasze pytania, zarówno te zadawane w trakcie wykładu (niekiedy kończyły się długimi dygresjami), jak i te, z którymi mierzyliśmy się w pracach dyplomowych. Dziękuję również Panu prof. Stanisławowi Kwitnewskiemu za życzliwą recenzję i cenne wskazówki.

Chciałbym, aby ten skrypt był pomocnym źródłem wiedzy dla kolejnych Studentów Wydziału FTiMS PG. Wierzę też, że będzie on przydatny dla wszystkich tych, którzy chcą zrozumieć podstawowe aspekty przewodzenia ciepła, a także konwekcji i promieniowania. Wskazane jest, aby potencjalny Czytelnik posiadał odpowiednie przygotowanie pod kątem wiedzy z fizyki i matematyki. Przydatne będą podstawy rachunku całkowitego i różniczkowego, elementarna znajomość termodynamiki oraz obeznanie z programowaniem w takich narzędziach jak C++, Matlab czy Python.