

## Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń	5
1. Wprowadzenie. Uzasadnienie wyboru tematu	8
2. Przegląd literatury	11
3. Model fizyczny sprzężonej wymiany masy i ciepła	15
3.1. Zmienne stanu. Założenia dotyczące transportu masy i ciepła	15
3.2. Homogenizacja wyrobów włókienniczych w problemach wymiany masy i ciepła	16
3.3. Metody obliczeniowe homogenizacji w problemach wymiany masy i ciepła	20
3.4. Wybór wymiarowości problemu w zadaniach optymalizacji	23
4. Model matematyczny sprzężonej wymiany masy i ciepła	25
4.1. Sformułowanie funkcjonałów celu i warunków brzegowych dla problemu nieustalonego	25
4.2. Sformułowanie funkcjonałów celu i warunków brzegowych dla rozłącznego przewodzenia masy i ciepła	33
4.3. Sformułowanie warunków brzegowych dla typowego przewodzenia masy i ciepła przez wyrób włókienniczy	34
5. Analiza wrażliwości pierwszego rzędu dowolnego funkcjonału celu dla nieustalonego przewodzenia masy i ciepła	36
5.1. Wrażliwość pierwszego rzędu funkcjonału celu	36
5.2. Analiza wrażliwości pierwszego rzędu metodą bezpośrednią	37
5.3. Analiza wrażliwości pierwszego rzędu metodą układów sprzężonych	43
6. Optymalizacja warunków przewodzenia w wyrobach/konstrukcjach włókienniczych	51
6.1. Problem optymalnego projektowania warunków transportu ciepła i masy	52
6.2. Optymalizacja warunków przewodzenia w wielowarstwowym opatunku włókienniczym z terapeutycznym materiałem zmiany fazy zawartym w mikrokapsułach	55
6.3. Optymalizacja warunków przewodzenia w geomateriale włókienniczym	76

7. Podsumowanie i wnioski	87
Literatura	90
Summary	95

## Wykaz ważniejszych oznaczeń

W pracy zostały użyte poniższe oznaczenia globalne. Oznaczenia szczegółowe zostały zdefiniowane w konkretnym miejscu i odnoszą się tylko do tego fragmentu.

$A(\mathbf{x},t)$	macierz współczynników przewodzenia ciepła dla materiału wyrobu zajmującego obszar $\Omega$ ograniczony brzegiem zewnętrznym $\Gamma$ , $W/(m\ K)$ ,
$\mathbf{b}$	wektor parametrów projektowania (zmiennych decyzyjnych), m,
$C$	funkcjonał ograniczenia,
$C_0$	zadana, stała wartość funkcyjonału ograniczenia,
$c$	pojemność cieplna materiału, $J/(kg\ K)$ ,
$D = h_a \varepsilon / \zeta$	współczynnik dyfuzji pary wodnej, $m^2/s$ ,
$F$	doświadczalny funkcyjonał celu przyjęty do analizy wrażliwości,
$f(\mathbf{x},t)$	wydajność źródła ciepła wewnątrz obszaru $\Omega$ , $J/s$ ,
$f_w(\mathbf{x},t)$	wydajność źródła masy wewnątrz obszaru $\Omega$ , $kg/s$ ,
$G$	funkcyjonał celu o konkretnej interpretacji fizycznej,
$g_p = Dg/Db_p$	pochodna całkowita (materialna) funkcyjonału $g$ względem parametrów projektowania $b_p$ ,
$g^p = \partial g / \partial b_p$	pochodna cząstkowa (lokalna) funkcyjonału $g$ względem parametrów projektowania $b_p$ określona w stałym obszarze $\Omega$ ,
$H$	główna krzywizna brzegu zewnętrznego $\Gamma$ , $1/m$ ,
$H_a$	względna wilgotność powietrza,
$H_f$	względna wilgotność materiału włókien,
$h$	współczynnik przejmowania ciepła podczas konwekcji, $W/(m^2\ K)$ ,
$h_a$	współczynnik dyfuzji masy (pary wodnej) w powietrzu, $m/s$ ,
$N$	liczba badanych funkcyjonałów podczas analizy wrażliwości,
$\mathbf{n}$	jednostkowy wektor normalny do brzegu zewnętrznego $\Gamma$ , zwrot dodatni na zewnątrz obszaru $\Omega$ ograniczonego tym brzegiem,
$P$	liczba parametrów projektowania,
$p$	współczynnik podziału procesów sorpcji,
$\mathbf{q}$	wektor gęstości strumienia ciepła, $W/m^2$ ,
$\mathbf{q}^*$	wektor wstępnej gęstości strumienia ciepła, $W/m^2$ ,
$\mathbf{q}_w$	wektor gęstości strumienia masy, $kg/(m\ s)$ ,
$\mathbf{q}_w^*$	wektor wstępnej gęstości strumienia masy, $kg/(m\ s)$ ,
$q_n = \mathbf{n} \cdot \mathbf{q}$	gęstość strumienia ciepła w kierunku normalnym do brzegu, określonym wektorem normalnym $\mathbf{n}$ , $W/m^2$ ,
$q_{nw} = \mathbf{n} \cdot \mathbf{q}_w$	gęstość strumienia masy w kierunku normalnym do brzegu, określonym wektorem normalnym $\mathbf{n}$ , $kg/(m\ s)$ ,

$R_1, R_2$	wydatki sorpcji podczas pierwszej i drugiej fazy procesu sorpcji, $\text{kg}/(\text{m}^3 \text{ s})$ ,
$s_1, s_2$	współczynniki empiryczne określające proces sorpcji podczas jego drugiej fazy według Li,
$t$	czas rzeczywisty w wyrobie podstawowym i dodatkowym stowarzyszonym z danym parametrem projektowania (metoda bezpośrednia), s,
$t_{eq}$	czas osiągnięcia stanu quasi-równowagi podczas procesu sorpcji, s,
$T(\mathbf{x}, t)$	temperatura (zmienna stanu), $\text{K}/^\circ\text{C}$ ,
$T_\infty(\mathbf{x}, t)$	temperatura otoczenia, $\text{K}/^\circ\text{C}$ ,
$\dot{T} = \frac{dT}{dt}$	pochodna temperatury w czasie w problemach nieustalonych, $\text{K}/\text{s}$ ,
$V$	objętość materiału, $\text{m}^3$ ,
$\mathbf{v}^p(\mathbf{x}, \mathbf{b}, t)$	pole prędkości transformacji stowarzyszone z parametrem projektowania $b_p$ ; $p = 1..P$ ,
$\mathbf{v}_n^p = \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}^p$	prędkość w kierunku normalnym do brzegu zewnętrznego $\Gamma$ ,
$w_a(\mathbf{x}, t)$	stężenie pary wodnej w przestrzeniach między włóknami (zmienna stanu), $\text{kg}/\text{m}^3$ ,
$w_f(\mathbf{x}, t)$	stężenie pary wodnej we włóknach (zmienna stanu), $\text{kg}/\text{m}^3$ ,
$\mathbf{x}$	wektor współrzędnych punktów określających geometrię wyrobu, m,

### litery greckie

$\gamma_1, \gamma_2$	funkcje podcałkowe w całce wzdłuż brzegu w ogólnej postaci funkcjonału celu,
$\Gamma$	brzeg zewnętrzny otaczający obszar wyrobu $\Omega$ ,
$\Gamma_T$	brzeg zewnętrzny o zadanej temperaturze, warunek pierwszego rodzaju przewodzenia ciepła (Dirichleta),
$\Gamma_1$	brzeg zewnętrzny o zadanym stężeniu pary wodnej, warunek pierwszego rodzaju przewodzenia masy,
$\Gamma_q$	brzeg zewnętrzny o zadanej gęstości strumienia ciepła, warunek drugiego rodzaju przewodzenia ciepła (Neumanna),
$\Gamma_2$	brzeg zewnętrzny o zadanej gęstości strumienia masy, warunek drugiego rodzaju przewodzenia masy,
$\Gamma_c$	brzeg zewnętrzny o zadanej konwekcji cieplnej, warunek trzeciego rodzaju przewodzenia ciepła (Newtona),
$\Gamma_T$	brzeg zewnętrzny o zadanej konwekcji masy, warunek trzeciego rodzaju przewodzenia masy,
$\Gamma_4$	brzeg wewnętrzny, warunek czwartego rodzaju,
$\delta_{pk}$	symbol Kroneckera, delta Kroneckera,

$\varepsilon$	efektywna porowatość materiału włókienniczego,
$\zeta$	efektywny skręt włókien w materiale włókienniczym,
$\lambda$	współczynnik przewodności cieplnej dla materiału izotropowego, W/(m K),
$\lambda_w$	ciepło sorpcji/desorpcji pary wodnej we włóknach, współczynnik transportu krzyżowego, J/kg,
$\Sigma$	krzywa nieciągłości brzegu między jego poszczególnymi gładkimi odcinkami,
$\rho$	gęstość materiału włókien, kg/m <sup>3</sup> ,
$\sigma$	stała Stefana-Boltzmana, W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ),
$\tau$	czas w układzie sprzężonym (metoda układów sprzężonych), s,
$\chi$	mnożnik Lagrange'a,
$\Psi_1, \Psi_2$	funkcje podcałkowe całki objętościowej w ogólnej postaci funkcjonału,
$\Omega$	obszar wyrobu włókienniczego poddanego optymalizacji, m <sup>2</sup> ,
$\nabla$	operator gradientowy, nabla.

## 1. Wprowadzenie. Uzasadnienie wyboru tematu

Każdy ubiór użytkowany przez człowieka niezależnie od jego przeznaczenia (osobisty, roboczy, do prac w ekstremalnych warunkach) jest zawsze poddany działaniu zmieniających się temperatur i wilgotności. To oznacza, że z fizycznego punktu widzenia istnieją źródła ciepła i masy (potu, pary wodnej itp.) oraz miejsca, gdzie to ciepło i masą są odprowadzane. Przewodzenie masy i ciepła w odzieży to problemy powszechne i uniwersalne. Najczęściej są to problemy niustalone, czyli zmienne w czasie, w szczególnych przypadkach zachodzi jednak ustalone (stałe w czasie) przewodzenie ciepła i masy.

Można przyjąć w przypadku ubioru, że ciepło jest transportowane od ciała na zewnątrz lub od źródeł zewnętrznych (słońce, grzejniki, pożar) w stronę skóry. Zawsze zachodzi też transport masy (potu) od skóry do otoczenia lub od otoczenia (wilgoć, deszcz, warunki pracy) do skóry. Czasami można jednak założyć, że przy niedużych różnicach stężeń transport masy jest pomijalnie mały i nie ma praktycznego znaczenia. Tak więc stopień uproszczenia modelu fizycznego decyduje, czy problem dotyczy sprzężonego transportu ciepła i masy, ciepła czy masy (dyfuzja). Należy jednak zachować dokładność modelowania, niezbędną do oddania zachodzących zjawisk transportu.

Dodatkowa przesłanka takiego ujęcia problemu to wspólna ocena temperatury i wilgotności jako wskaźników komfortu pododzieżowego użytkownika ubioru/odzieży. Istnieje szereg metod jego oceny i optymalizacji.

Podobne zjawiska zachodzą również w innych wyrobach włókienniczych oraz niektórych konstrukcjach włókienniczych.

**Opatrunki na nośnikach włókienniczych.** Stan zapalny rany skutkuje podwyższoną temperaturą, co stanowi źródło ciepła transportowanego od rany, przez wszystkie warstwy opatrunku na zewnątrz. Wewnątrz materiału są umieszczane materiały zmiany fazy (pcm). Pod wpływem wysięku z rany rozpuszczają się i uwalniają substancję terapeutyczną. Jej dyfuzja na zewnątrz jest częściowo hamowana przez półprzepuszczalną membranę, większość dyfunduje od warstwy z mikrokapsułami do skóry. W opatrunkach tego typu występuje dyfuzja przeciwkierunkowa: czynnika aktywnego (wysięku z rany) na zewnątrz oraz czynnika terapeutycznego (leczniczego uwalnianego z mikrokapsuł) od warstwy zewnętrznej do skóry. Problem optymalizacji warunków przewodzenia odniesiony do kształtu przekroju poprzecznego opatrunku, z wykorzystaniem włókienniczych elementów nośnych (włókniny), w warunkach dyfuzji przeciwkierunkowej, został rozwiązany w sposób ogólny przez Koryckiego [2007].

**Wyroby włókiennicze poddawane obróbce wykończającej w maszynie prasowniczej.** Maszyna tego typu składa się z dwóch płyt prasowniczych,

dociskanych do siebie. Dodatkowo jedna lub obie mogą być źródłem pary wodnej (tzw. naporowywanie) przez część procesu technologicznego. Znając budowę wyrobu, można dopasować do niego warunki technologiczne i konsekwentnie dostosować konstrukcję wyrobu włókienniczego. Główna trudność to konstrukcja prawidłowego modelu fizycznego i matematycznego, szczególnie niestabilnych warunków brzegowych.

**Prasa nieckowa z urządzeniem do chłodzenia i klimatyzacji wyrobów włókienniczych.** Na górny brzeg materiału wielowarstwowego jest doprowadzane powietrze. Jest ono źródłem ciepła o określonym wydatku, a technologia wymusza ściśle określone parametry wilgotności. Transport ciepła i masy jest wymuszony kierunkiem ruchu powietrza, doprowadzanego z góry i odprowadzanego z dolnej powierzchni. Wyrób włókienniczy po prasowaniu przesuwają się po płaszczyźnie prowadzącej, co daje stałą temperaturę oraz stężenie pary wodnej. Na tej powierzchni są otwory, które odprowadzają powietrze. Bezpośrednio nad otworem następuje wymiana ciepła i masy wyrobu włókienniczego z otoczeniem przez konwekcję.

**Przewodzenie ciepła i masy wydzielanych przez ciało użytkownika w kompozytowej tkaninie wielowarstwowej w odzieży barierowej, zabezpieczającej przed źródłami ciepła i masy o dużym wydatku.** Czynnikiem odprowadzającym ciepło może być ludzki pot, a izolację stanowią warstwy powietrza znajdujące się wewnątrz tkaniny.

W pracy jest rozważany przypadek wspólnego transportu ciepła i masy, nazywany dalej sprzężonym przewodzeniem masy i ciepła. Oznacza to, że część ciepła jest transportowana z masą, co jest modelowane za pomocą tzw. współczynnika transportu krzyżowego. Transport masy z ciepłem pozostaje na poziomie cząsteczkowym i nie ma większego znaczenia, nie jest uwzględniany w inżynierskim modelu fizycznym i matematycznym.

Rozwiązanie problemów sprzężonego przewodzenia masy i ciepła może spowodować konkretne oszczędności. Znaczna część optymalnego projektowania jest bowiem przeprowadzana na modelu. Dopiero ostateczne badania sprawdzające można przeprowadzić na gotowym wyrobie, co znacznie skraca czas i zmniejsza koszty całego działania.

Na podstawie kwerendy literatury można stwierdzić, że model matematyczny sprzężonej wymiany ciepła i masy jest przedstawiany za pomocą równań różniczkowych cząstkowych drugiego rzędu. W większości modeli wykorzystuje się jednak dodatkowe równanie empiryczne, wiążące ze sobą zmienne stanu z wykorzystaniem procesów fizycznych zachodzących podczas przewodzenia.

Zagadnienia optymalizacji wyrobu są zorientowane wrażliwościowo, ponieważ warunki optymalności wymagają wprowadzenia wrażliwości pierwszego rzędu. W tym celu zostały wykorzystane metody bezpośrednia i układów sprzężonych. Każda z nich wymaga zdefiniowania i opisu matematycznego problemu przewodzenia ciepła, warunków brzegowych i początkowego, dokładnej interpretacji modelu fizycznego, czyli przyjęcia funkcjonału identyfikacji w ujęciu

wariacyjnym metody elementów skończonych, określenia wrażliwości pierwszego rzędu dla szczególnej postaci funkcjonału i wykonania obliczeń numerycznych.

Reasumując, podstawowe przesłanki motywujące podjęcie tematu można określić następująco:

- Duża ilość rzeczywistych problemów tego typu.
- Uniwersalność podjętego tematu. Dopiero rzeczywisty problem lub stopień ewentualnego uproszczenia pozwalają sprowadzić zadanie sprzężonego przewodzenia masy i ciepła do alternatywnego transportu masy (dyfuzja) lub ciepła.
- Różnorodność zjawisk transportu masy i ciepła. Postać tych zjawisk zależy od konkretnych warunków układu rzeczywistego, co wpływa na dużą liczbę i małą powtarzalność modeli fizycznych i matematycznych.
- Mała reprezentacja i coraz bardziej powszechna tendencja do modelowania i optymalizacji wymiany masy i ciepła wyrobów włókienniczych widoczna w literaturze.
- Możliwości uzyskania efektów ekonomicznych dzięki zastosowaniu znacznie tańszej i bardziej uniwersalnej implementacji numerycznej.

Zagadnienia modelowania i optymalizacji własności mogą zatem stanowić obiecujące, perspektywiczne i szybkie techniki określania dystrybucji zmiennych stanu oraz optymalnych własności wyrobów włókienniczych poddanych sprzężonemu przewodzeniu masy i ciepła.

Monografia jest adresowana głównie do osób zajmujących się problemami wymiany ciepła i masy w wyrobach i konstrukcjach włókienniczych oraz optymalizacją tych wyrobów z wykorzystaniem różnych kryteriów. Dotyczy to głównie osób prowadzących badania naukowe w zakresie tego tematu, np. pracowników wyższych uczelni, instytutów naukowo-badawczych, doktorantów. Może stać się także inspiracją dla badaczy z innych, pokrewnych dziedzin, do pokazania złożoności problemów modelowania i optymalizacji, związanych z wyrobami i konstrukcjami włókienniczymi.



## 2. Przegląd literatury

Istnieje dość szeroka literatura dotycząca sprzężonej wymiany masy i ciepła. Modelowanie zjawiska obejmuje: określenie modelu fizycznego, następnie modelu matematycznego, rozwiązanie go i wyznaczenie parametrów określających warunki przewodzenia masy i ciepła. Poszczególne pozycje opisują procesy wymiany masy i ciepła, rodzaje konstrukcji włókienniczych (tkaniny, dzianiny, włókniny), parametry materiałów włókienniczych itp. Z punktu widzenia modelu fizycznego umożliwia to homogenizację materiałów wyrobów, w modelu matematycznym pozwala na sformułowanie ogólne warunków brzegowych i początkowych lub konkretnych wartości w tych warunkach.

Wprowadzając problemy optymalizacji/identyfikacji w wyrobach włókienniczych poddanych działaniu sprzężonego przepływu masy i ciepła, należy uwzględnić pozycje dotyczące poszczególnych elementów informatyki, matematyki i mechaniki. Publikacje dotyczą w tym przypadku różnych postaci równań stanu, warunków brzegowych i początkowych, dyskretyzacji za pomocą siatki metody elementów skończonych, sformułowania warunków optymalności i stacjonarności, obliczeń numerycznych optymalizacji i identyfikacji itp.

Istnieje duża grupa podstawowych prac zajmujących się modelowaniem i wyznaczaniem parametrów stanu wyrobów włókienniczych poddanych działaniu masy i ciepła. Kaviani [1995] omówił modelowanie fizyczne i matematyczne w problemach dwufazowych, rozumiane jako transport ciepła i masy/składników chemicznych. Wprowadzone zostały aspekty mechaniki płynów oraz termodynamiki na poziomie mikro, głównie odnoszące się do kapilar i porów, ciśnienie i stężenie w kapilarach, elementarne prawa przepływu, sprzężone przewodzenie i konwekcja na poziomie mikro itp.

Pan, Gibson (red.) [2006] zajęli się aspektami budowy wyrobów włókienniczych pod kątem transportu wilgoci, odniesieniami ciepło – wilgoć w materiałach włókienniczych i modelowaniem kontaktu tekstylia – ciało. Omówiono charakterystyki geometrii i konstrukcji tekstyliów, istotne przy homogenizacji, modelowanie zawilgocenia, przepływ wielofazowy przez materiały porowate, zmianę fazy w materiałach, sprzężony transport masy i ciepła czy rolę skóry w termoregulacji i komforcie cieplnym.

Urbańczyk [2002] omówił dokładnie mikrostrukturę włókna, jej parametry, powstawanie i modyfikację. Wprowadzone zostały dane dotyczące własności termicznych, m.in. współczynniki przewodności cieplnej czy rozszerzalność cieplna włókien.

Kolejni autorzy, Nowacki i Olesiak [1991], zajęli się zagadnieniami dyfuzji i termodyfuzji w ciałach stałych. Sformułowane zostało i rozwiązane

podstawowe równanie dyfuzji, również na przykładzie ciał o określonych kształtach. Przedyskutowana została termodyfuzja ciał odkształcalnych, istotna z punktu widzenia tekstyliów.

Zarzycki [2010] omówił różne sposoby transportu ciepła (przewodzenie, konwekcja, przenikanie, promieniowanie) oraz wymienniki ciepła, dyfuzję masy, różniczkowy bilans masy, wymienniki masy, absorpcję fizyczną gazów czy procesy membranowe. Szczególnie przydatne są różniczkowe równania opisujące różne metody transportu ciepła, jak i szczegółowy opis bilansu masy równaniami różniczkowymi.

Autor kolejnej fundamentalnej pozycji Li [2001] zamieścił szereg informacji ogólnych i praktycznych. Rozpatrzono w niej aspekty psychologiczne, neurofizjologiczne i fizjologiczne komfortu cieplnego, określono jego przewidywalność, a także sformułowano i rozwiązano dynamiczny transport ciepła i masy w wyrobach włókienniczych. Pozycja ta zawiera dokładne sformułowanie i rozwiązanie problemu nieustalonego przewodzenia ciepła i masy za pomocą równań transportu masy i ciepła oraz równania modelującego zjawiska fizyczne w materiale włókien. Podaje także szereg danych materiałowych przydatnych do obliczeń. Podobny zakres prezentuje publikacja Li, Luo [1999], gdzie rozwiązano problem podstawowy przewodzenia ciepła i masy dla różnych materiałów i warunków brzegowych, bez szerszych odniesień środowiskowych. Podano również dane materiałowe dla kilku elementarnych materiałów włókienniczych. Li i Holcombe [1992] zwrócili uwagę na opis dwuskładnikowego procesu sorpcji pary wodnej w materiale włókien, podając funkcje opisujące wydatki. Li i Zhu [2003] przeanalizowali sprzężony transport ciepła i wilgoci przy wielu zjawiskach elementarnych na poziomie kapilar. Posłużyli się przy tym osobnymi równaniami bilansów masy dla różnych stanów skupienia masy: pary wodnej i fazy ciekłej (wody).

Model wykorzystujący równania bilansu ciepła i masy jest obecnie powszechnie stosowany do opisu komfortu cieplnego i wyznaczania zmiennych stanu, również jako podstawa badań laboratoryjnych, patrz np. Kaasjager [2007]. Modelowanie komfortu cieplnego za pomocą równań różniczkowych, wyznaczanie zmiennych stanu oraz parametrów materiałowych niezbędnych do laboratoryjnej weryfikacji omówili Więźlak i in. [1996]. Model jednowymiarowego transportu ciepła i masy przez powlekaną tkaninę został przeanalizowany przez Fohra, Coutona, Treguiera [2002]. Został uwzględniony rodzaj obróbki, istnienie membran oraz zjawiska sorpcji/desorpcji, kondensacji/parowania, dyfuzji różnych stanów cieczy, przewodzenie ciepła i opór kontaktu na powierzchniach między fazami.

Nieco inaczej są określane zmienne stanu dla ubioru spełniającego funkcję barierową poddanego ekstremalnemu strumieniowi ciepła, bez możliwości odprowadzenia ciepła na zewnątrz. Chitrphiromsri i Kuznietsov [2004] przedyskutowali transport masy i ciepła, wykorzystując opis fizyczny zjawisk ciepła, entalpii oraz faz stałej i gazowej. Stanowi to wskazówkę postępowania przy

określonych warunkach brzegowych, nie jest jednak typowe dla modelowania i optymalizacji przeciętnego ubioru.

W szeregu przypadków wewnątrz kompozytów włókienniczych występują materiały zmiany fazy (pcm). Próba ich analizy została przedstawiona przez Li, Zhou [2004]. Najistotniejsze jest określenie parametrów materiałowych oraz modelowanie wielkości wydatku cieplnego koniecznego dla zmiany stanu kapsułów dla warstw włókienniczych z materiałami zmiany fazy.

Haghi [2003] określił czynniki determinujące transport pary wodnej we włóknach, rozpatrzył podstawowe charakterystyki fizyczne i parametry materiałowe dotyczące wymiany ciepła i transportu pary wodnej.

Doświadczalne problemy analizy wrażliwości własności termicznych kompozytów wieloskładnikowych obciążonych defektami omówił Kamiński [2005]. Wrażliwość była wyznaczana za pomocą niewielkich zmian parametrów obliczeniowych, a nie klasycznej analizy wrażliwości z udziałem pochodnej funkcjonału celu. Podano również metodę określania zastępczego współczynnika przewodności cieplnej kompozytu.

Tekstyliami włókiennicze podczas konwekcyjnej wymiany ciepła i masy z otoczeniem podlegają opływowi płynu. Orzechowski, Prywer, Zarzycki [2001] rozpatrzyli w swojej pracy głównie problemy mechaniki przepływów. Interesujący jest jednak opis przepływów stowarzyszonych z wymianą ciepła, szczególnie w ujęciu liczb kryterialnych. Praca zwiera też ujęcia bilansowe transportu masy i ciepła płynu wieloskładnikowego. Problemy warstw przyściennych, podstawy przepływów płynów oraz opływu podstawowych elementów geometrycznych (figury geometryczne, łopatki) zostały omówione w wielu pracach, jedna z nowszych w ujęciu inżynierskim to Walczak [2010]. Crank [1975] omówił w dokładny sposób bilans masy, różne postacie różniczkowego równania dyfuzji oraz różne praktyczne aspekty rozwiązywania podstawowych problemów dyfuzji. Praktyczne aspekty dyfuzji, głównie dotyczące dyfuzji Knudsena w porach materiału, omówili Gilron i Soffer [2002].

Fundamentalna pozycja omawiająca optymalizację i identyfikację w problemach przewodzenia ciepła została napisana przez Talera, Dudę [2003]. Jest tu ujęcie bilansowe masy i ciepła, omówienie różnych postaci warunków brzegowych, zaś główna część pracy to rozwiązanie szeregu zadań praktycznych. Ustalone i nieustalone zagadnienia przewodzenia ciepła zostały rozwiązane za pomocą metod analitycznych i numerycznych, zarówno problemy proste, jak i odwrotne. Zostały wykorzystane metody różnic skończonych i elementów skończonych. Istotny jest też algorytm całkowania równań różniczkowych metodą Gaussa, która może być przydatna do określenia zmiennych stanu.

Wiele prac zajmuje się aspektami numerycznymi optymalizacji i identyfikacji. Kącki [1992] przedstawił ujęcie bilansowe masy i ciepła w postaci równań różniczkowych cząstkowych, definicje różnych warunków brzegowych oraz rozwiązania analityczne wielu problemów przewodzenia masy, ciepła oraz sprzężonego przewodzenia masy i ciepła. Ostatni z tych problemów został

rozwiązany za pomocą klasycznego ujęcia współczynników krzyżowych i entalpii układu. Równania różniczkowe cząstkowe zdefiniowane w modelu matematycznym zostały rozwiązane za pomocą różnych metod numerycznych. Inne postacie modeli fizycznego i matematycznego problemów dyfuzji przytoczyli Lukovicova, Zamecnik [2005]. Podane sprzężone równania stanu są prostej postaci, ponieważ wykorzystują współczynniki transportu krzyżowego. Ich wyznaczenie może jednak sprawiać kłopot, przynajmniej dla niektórych materiałów włókienniczych i pewnych warunków brzegowych. Autorzy przeanalizowali i rozwiązali problem prosty i odwrotny, wyznaczyli doświadczalnie te współczynniki.

Szereg praktycznych metod numerycznych rozwiązywania problemów optymalizacji i identyfikacji zawierają prace Barona [1995], Kąckiego, Małolepszego, Romanowicza [1997] czy Kosmy [2008]. Szczegółowe i jednocześnie proste omówienie zasad wielu podstawowych metod numerycznych wraz z szeregiem algorytmów gotowych do implementacji numerycznej w dowolnym języku zawiera praca Findeisena, Szymanowskiego, Wierzbickiego [1980].

Zagadnienia optymalnego projektowania w wyrobach włókienniczych zostały rozważone tutaj w ujęciu wrażliwościowym pierwszego rzędu. Stanowi to kontynuację prac Demsa i Mroza [1995, 2001], Demsa i Rousseleta [1999a,b], czy Demsa, Koryckiego, Rousseleta [1997]. Problem przeciwkierunkowej, sprzężonej dyfuzji we włókienniczych materiałach kompozytowych (np. opatrunkach na nośniku tekstylnym) omówił Korycki [2009c]. Zostało przyjęte, że gradient temperatury jest pomijalnie mały na grubości materiału, co pozwala rozpatrzyć wyłącznie transport masy. Autor określił poszczególne fazy dyfuzji przeciwkierunkowej, zdefiniował i rozwiązał wrażliwości pierwszego rzędu wraz z wyznaczeniem zmiennych stanu, sformułował i rozwiązał problem optymalizacji. Modelowanie niestabilnego transportu masy i ciepła w konstrukcjach tekstronicznych przedstawił Korycki [2010a]. Dla określenia trzeciego równania niezbędnego do rozwiązania problemu z powodu liczby zmiennych stanu posłużono się metodą przybliżoną, układ równań różniczkowych został rozwiązany w czasie i przestrzeni poprzez całkowanie numeryczne, zostały zamieszczone mapy temperatury i stężenia pary wodnej. Korycki [2009b] dokonał optymalizacji i identyfikacji problemu jednowymiarowego (1D grubość warstw materiału kompozytowego) przy sprzężonym niestabilnym przewodzeniu masy i ciepła. Posłużono się przy tym nieco inną formą zapisu równań stanu, analizując dyfuzję Knudseną i wprowadzając m.in. współczynnik dyfuzji z jej wykorzystaniem. Analizowano również wpływ membrany. Ten sam autor [2010] sformułował problem i analizował wrażliwość w ujęciu ogólnym dla konstrukcji trójwymiarowych 3D. Otrzymane zależności posłużyły do optymalizacji i identyfikacji kształtu płaskich, dwuwymiarowych konstrukcji kompozytowych. Parametry materiałowe analizowano w skali mikro, wprowadzając materiał ortotropowy, dyfuzję Knudseną oraz określając jej współczynnik stały podczas całego procesu.