

COMPUTER SIMULATION OF THE DISORDERED FILTER STRUCTURES

Zofia Podsiadła-Bulsa

Politechnika Radomska

Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn

26-600 Radom, ul. Chrobrego 45

zpbulsa@tkdami.net

Abstract

The disordered structure of the filter materials used for engine fluids cleaning is very difficult for the mathematical description.

The paper presents the probability model of the disordered fibre structure and the results of its computer simulation. The computer program used enables to simulate unlimited fibre structures. It is possible to change the length of the fibres, their thickness and a percentage. The simulated structure is described by parameters like: number of pores, area, circumference and radius of the smallest, medium and maximum pore.

The paper present simulation example of the structure produced by fibres of parameters corresponding fibres producing filtrating papers structure

SYMULACJA KOMPUTEROWA NIEUPORZĄDKOWANYCH STRUKTUR FILTRACYJNYCH

Streszczenie

Nieuporządkowana struktura materiałów filtracyjnych stosowanych do oczyszczania płynów eksploatacyjnych jest bardzo trudna do opisu matematycznego.

W artykule przedstawiono probabilistyczny model takiej struktury i rezultaty jej komputerowej symulacji. Zastosowany program komputerowy pozwala symulować struktury zbudowane z włókien o dowolnie zadawanych parametrach: długości, grubości i ich udziału procentowego. Symulowana struktura jest charakteryzowana przez takie parametry jak: liczba por, powierzchnia, obwód oraz promień najmniejszej, średniej i maksymalnej pory.

Przedstawiono przykład symulacji struktury utworzonej przez włókna, których parametry odpowiadają włóknom tworzącym strukturę papierów filtracyjnych.

1. Wprowadzenie

W konstrukcjach współcześnie stosowanych filtrów do oczyszczania płynów eksploatacyjnych, technologicznych i roboczych dominują nietkane materiały włókniste, wysokoporowate o stabilnej strukturze por międzywłókiennych, wystarczająco odporne w zadanym czasie na obciążenia eksploatacyjne i zdolne do powierzchniowego i wglębnego zatrzymywania cząstek zanieczyszczeń stałych. Należą do nich impregnowane włókniny i papiery filtracyjne, przy czym wiodącym materiałem do płynów silnikowych jest papier utworzony z poliwymiarowych włókien roślinnych. Z wielu jego odmian wykonano ponad 90% przegród filtrujących w silnikach tłokowych zanieczyszczone powietrze, oleje smarowe, paliwa płynne i gazowe w silnikach pojazdów i maszyn.

Ponadto materiały nietkane z włókien sztucznych są z powodzeniem stosowane jako membrany do identyfikacji cząstek wysokodispersyjnych aero-hydrozoli, bakterii, wirusów itp. oraz na wkłady filtrów do oczyszczania:

- ciekłych produktów przemysłu chemicznego, spożywczego, monopolowego i innych,

- powietrza atmosferycznego w systemach wentylacji, ogrzewania i klimatyzacji zlokalizowanych w pomieszczeniach różnego przeznaczenia począwszy od kabin samochodów pasażerskich, laboratoriów badawczych aż do hal fabrycznych, w których odbywa się montaż nowoczesnych układów elektronicznych;
- oraz sterylizacji powietrza zasilającego sale operacyjne i laboratoria mikrobiologiczne. W wyszczególnionych zastosowaniach umożliwiają one separację cząstek o wymiarach z przedziału od 0,1 do 30 μm .

Struktura tych materiałów jest nieregularna, charakteryzuje ją szkielet z przypadkowo ułożonych włókien obejmujący zbiór krętych mikropor łączących przeciwległe strony warstwy włóknistej.

Ten rodzaj struktury determinują alternatywne metody ich wytwarzania, polegające na:

- dozowaniu wodnej zawiesiny włókien na ruchome sito;
- układaniu suchej warstwy z włókien pneumatycznie rozproszonych, opadających na taśmę transportową;
- osadzaniu strużek stopionego włóknotwórczego polimeru w postaci runa z cienkich włókienek na urządzeniu odbiorczym;
- wykorzystaniu operacji gręplowania włókienek na zgrzeblarkach i uformowania z otrzymanego runa, przez jego zagęszczenie taśmy włóknistej o jednakowej grubości.

W metodach tych nie ma opanowanego sposobu kontroli zachodzącego procesu układania włókien w warstwie ani kontroli gdzie ostatecznie osadzi się pojedyncze włókno lub aglomerat włókien. W rezultacie ich stosowania otrzymujemy zmienny rozkład włókien na powierzchni i wewnątrz materiału. Porowatość i wszystkie właściwości od tego zależne, jak ilość, kształt i rozmiary por zmieniają się losowo w danej strefie włókien przy czym zmiany te zwiększają się zależnie od umiejscowienia i zmniejszenia pola obserwacji.

Obserwacje wskazują, że struktura papierów i włóknin jest niejednorodna, a jej różnicowanie zależne od rodzaju asortymentu włókien i metod ich układania w warstwie.

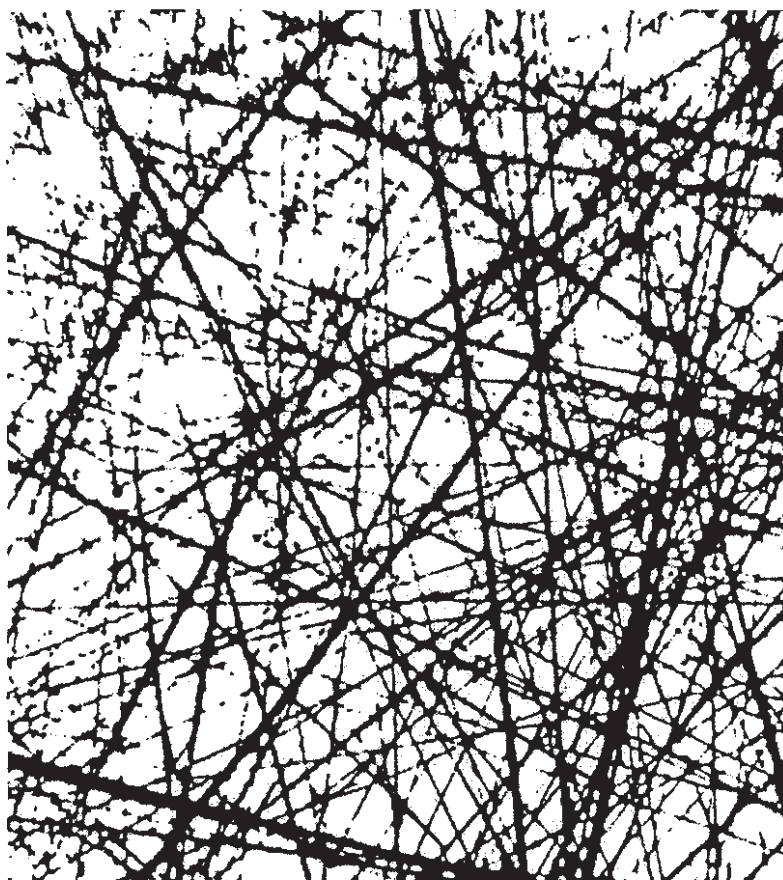
Strukturę papieru kształtują włókna roślinne o różnych wymiarach, nietypowych kształtach i profilach (linters, tkanka drzewna), natomiast strukturę włóknin poromerycznych lub szklanych - włókna proste, monowymiarowe, skrzyżowane każde z innym pod różnymi kątami tworzą na powierzchni filtracyjnej płaską siatkę z szeregiem oczek o zarysie nieregularnych wieloboków, co uwidacznia rys. 1.

Ta niejednorodność struktury jest bardzo znaczącą właściwością materiałów nietkanych i w przeciwieństwie do uporządkowanych geometrycznie struktur (teoretyczne modele równoległych i prostopadłych włókien do kierunku przepływu płynu) umożliwia otrzymanie optymalnej liczby drożnych por determinujących efektywną, wgłębną i powierzchniową filtrację zawiesin przy stosunkowo małych oporach przepływu.

Rzeczywista struktura tych materiałów jest trudna do opisu matematycznego i z tego powodu nie znamy przydatnych w praktyce współzależności między przepływowymi i filtracyjnymi charakterystykami, a ich porowatą strukturą. Znane wyniki z badań laboratoryjnych papierów i włóknin, przeprowadzanych zwykle na niereprezentatywnej liczbie próbek, dotyczą głównie charakterystyk przepływu i efektywności odfiltrowania cząstek bez uwzględnienia regresywnego wpływu podstawowych parametrów struktury, takich jak: porowatość, powierzchnia wewnętrzna, wymiary i rozkład wymiarowy por.

Wobec braku matematycznego ujęcia struktury papieru interpretacja empirycznych charakterystyk może być oparta na możliwych do przyjęcia uproszczeniach w opisie struktury porowatej, polegających między innymi, na probabilistycznym modelowaniu [2,5] jego

budowy włóknistej tak aby nieco bliżej poznać naturę struktury przestrzennej papieru i zależności w niej występujących.



Rys. 1. Struktura cienkiej warstwy z włókien syntetycznych (x150)
Fig. 1. Structure of the thin surface made of the synthetic fibres (x150)

2. Probabilistyczny model nieuporządkowanej struktury materiału filtracyjnego

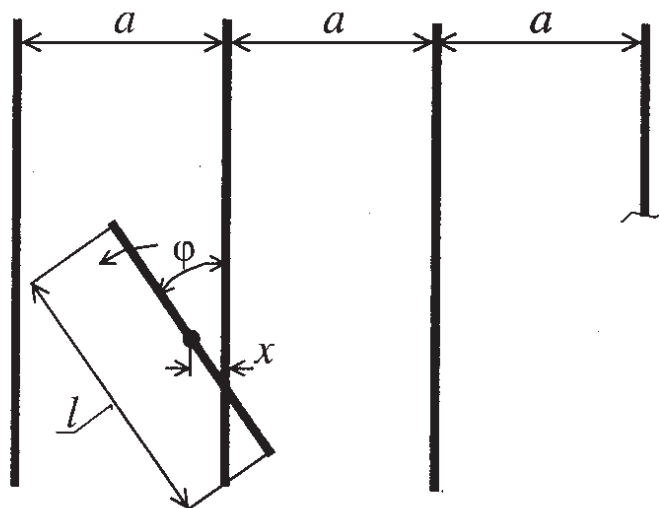
Do matematycznego opisu nieuporządkowanej struktury nietkanych materiałów filtracyjnych proponuje się przedstawiony model probabilistyczny, który dotyczy pola powierzchni filtracyjnej utworzonej z przypadkowo ułożonych, skrzyżowanych ze sobą włókien pod różnymi kątami tak, że tworzą płaską siatkę wieloboków wytyczających powierzchnię por międzywłókiennych.

Posługując się wiedzą matematyczną można między innymi określić prawdopodobieństwo skrzyżowania włókien, liczbę skrzyżowań i wieloboków (tworzących pory) itp.

Rozpatrzmy na początku prosty przykład, który może nieco wyjaśnić sens prawdopodobieństwa geometrycznego dotyczącego skrzyżowania pary włókien.

Niech na płaskim obszarze znajduje się wstęga utworzona z kilku prostych i równoległych z jednakowymi odstępami ich osi równymi a .

Zachodzi pytanie ile wynosi prawdopodobieństwo tego, że włókno o długości $l < a$, rzucone na „chybił trafił” na włókna równoległe skrzyżuje się z którymkolwiek z nich. Przykład ten ilustruje rys.2.



Rys. 2. Schemat usytuowania osi włókien
 Fig. 2. Scheme the axis of the fibres orientation

Oznaczmy przez x odległość środka tego włókna od osi najbliższego, zaś przez φ kąt, zawarty między osiami tych włókien. Para liczb (x, φ) określa położenie włókna rzuconego, przy czym spełnione są nierówności:

$$0 \leq x \leq a/2 \quad ; \quad 0 \leq \varphi \leq \pi \quad (1)$$

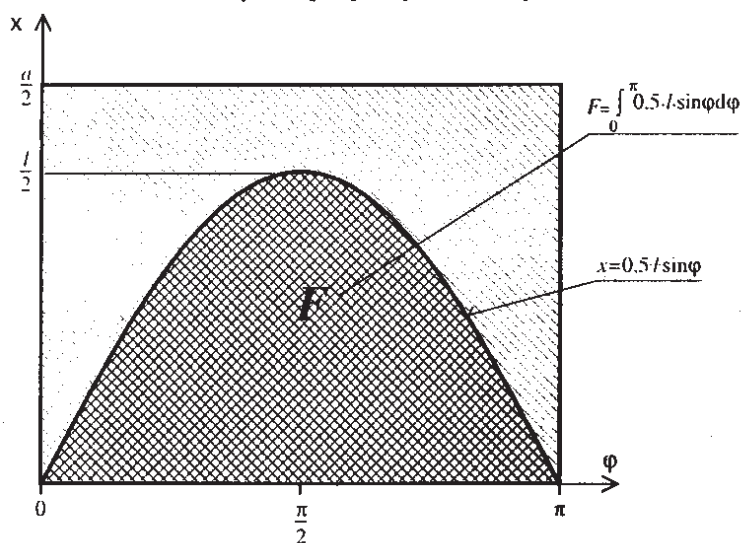
Z rys.2 widać, że włókno to może się skrzyżować z dolnym włóknem wtedy i tylko wtedy, gdy:

$$0 \leq x \leq l/2 \sin \varphi \quad (2)$$

Szukane prawdopodobieństwo określa zależność:

$$P = \frac{\int_0^{\pi/2} \frac{1}{2} \sin \varphi d\varphi}{a \cdot \frac{\pi}{2}} = \frac{\int_0^{\pi/2} \frac{1}{2} \sin \varphi d\varphi + \int_{\pi/2}^{\pi} \frac{1}{2} \sin \varphi d\varphi}{a \cdot \frac{\pi}{2}} = \frac{2 \cdot 1}{a \cdot \pi} \quad (3)$$

którą graficznie przedstawiono na rys. 3 przy czym, $P(\varphi) = 1/\pi$ dla każdego φ .



Rys. 3. Ilustracja prawdopodobieństwa skrzyżowań włókien.
 Fig. 3. Illustration of probability the fibres crossing

Drugi bardziej skomplikowany od poprzedniego, przykład dotyczy przypadkowej orientacji włókien wynikającej ze sposobów ich ułożenia wyszczególnionych w punkcie 1 opracowania.

Załóżmy, że n prostych włókien o długości l leży na płaszczyźnie $A > l^2$. Między osiami dwóch skrzyżowań włókien zawarte są cztery kąty z których każdy jest kątem wierzchołkowym pewnego wieloboku. l może przyjmować wartości z przedziału $(0, \pi)$ z jednakowym prawdopodobieństwem równym $1/\pi$. Jeśli jednym z nich jest kąt φ ograniczony dwoma włóknami o tej samej długości l , to ich końce, licząc od punktu skrzyżowania, wyznaczają pole rombu o powierzchni $l^2 \sin \varphi$.

Stąd prawdopodobieństwo skrzyżowania się dwóch włókien pod kątem na płaszczyźnie A wynosi:

$$p(\varphi) = \frac{l^2 |\sin \varphi|}{A} \quad (4)$$

a pod wszystkimi wartościami kąta φ ($0 < \varphi < \pi$) wynosi [3]:

$$p = \frac{l^2}{\pi A} \int_0^\pi |\sin \varphi| d\varphi = \frac{2 \cdot l^2}{\pi \cdot A} \quad (5)$$

Średnia liczba skrzyżowań przypadająca na włókno wynosi $(n-1)p$, a ogólna liczba skrzyżowań N_c w symulowanym polu A wynosi $n(n-1)p/2 \approx n^2 p/2$ dla dużych n . Stąd:

$$N_c = \frac{(n l)^2}{\pi A} \quad (6)$$

Równanie (6) zależy tylko od ogólnej długości wszystkich włókien, a nie od indywidualnej długości pojedynczego włókna. Jeśli więc wszystkie włókna zostaną przecięte na pół to l ulegnie zmniejszeniu lecz zarazem n ulegnie podwojeniu i w efekcie nl pozostanie niezmiennione.

Współzależność między liczbą N_c skrzyżowań włókien na powierzchni A i liczbą N_p utworzonych wieloboków – por międzywłókiennych – jest trudna do określenia na podstawie rozważań teoretycznych.

Brown [2] podaje, że jeżeli jednostkowa powierzchnia materiału filtracyjnego jest utworzona z n włókien, to liczba por powstałych w rezultacie skrzyżowań tych włókien wynosi:

$$N_p = \frac{n(n-1)}{\pi} \frac{n}{2} \quad (7)$$

Typowy kształt pory można przewidzieć w dość prosty sposób. Jeśli włókna mają tę samą średnicę to prawdopodobieństwo skrzyżowania więcej niż dwóch włókien w tym samym punkcie zbliża się do zera; jeśli przetną się osie dwóch włókien to utworzą się cztery kąty i tym samym przeciętna liczba boków wynosi cztery, chociaż co trzeci wielobok ma trzy kąty wierzchołkowe, zwłaszcza wtedy gdy długie włókna tworzą strukturę materiału filtracyjnego.

3. Symulacja komputerowa nieuporządkowanej struktury włóknistej materiału filtracyjnego

Symulację nieuporządkowanej struktury materiału filtracyjnego przeprowadzono przy pomocy specjalnie do tego celu napisanego programu komputerowego współpracującego ze środowiskiem Matlab.

Przyjęto, że każdą warstwę materiału charakteryzują dwa włókna określonego rodzaju (nawiązanie do rzeczywistej struktury papieru filtracyjnego).

Możliwość określenia parametrów włókna oraz wzajemnego ich udziału w warstwie umożliwia symulowanie dowolnych struktur materiałów filtracyjnych.

3. 1. Metodologia symulacji

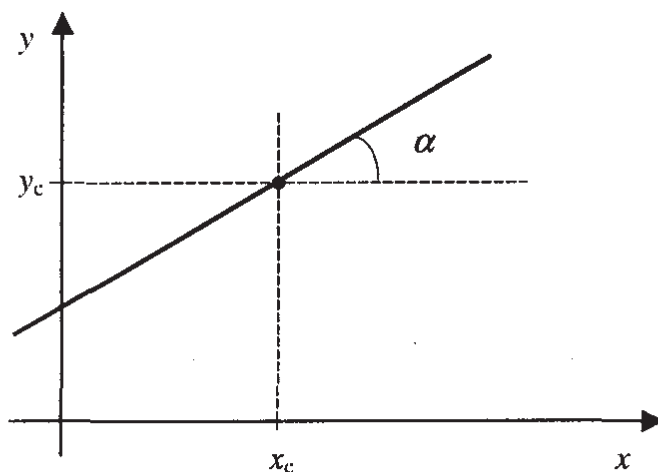
Symulacja materiału filtracyjnego polega na określeniu parametrów dla poszczególnych włókien i warstw. Definiowanie materiału filtracyjnego rozpoczyna się od określenia rozmiaru analizowanej powierzchni tkaniny oraz ilości warstw. Następnie definiuje się rodzaj materiału filtracyjnego.

Kolejnym etapem jest określenie parametrów włókien dla każdej warstwy. Następujące parametry opisują włókno:

- szerokość
- grubość
- długość

Dla włókien cylindrycznych przyjmuje się, że grubość jest równa szerokości włókna. Możliwe jest zdefiniowanie ilości oraz udziału procentowego włókien w obrębie warstwy. Grubość każdej warstwy jest określona jako suma dwóch maksymalnych grubości włókien. Możliwe jest ustalenie wszystkich parametrów dla każdej z warstw oddzielnie. Możliwe jest również ustalenie jednakowych parametrów dla wszystkich warstw.

Na podstawie zadanych parametrów dokonywana jest losowa generacja parametrów charakteryzujących włókno. Są to x_c , y_c , α . Znaczenie parametrów opisujących włókno ilustruje poniższy rysunek.



Rys. 4. Graficzna ilustracja parametrów opisujących włókno wykorzystywane do symulacji struktury
Fig. 4. Graphic illustration of the fibres describing parameters used for the structure simulation

Wartości x_c , y_c przyjmują losowe wartości z przedziału $[0,1]$ na podstawie rozkładu jednostajnego. Wartość kąta α jest określana losowo na podstawie rozkładu jednostajnego z przedziału $[0, \pi]$. Wartości x_c , y_c są przeskalowane do rozmiaru zdefiniowanej tkaniny. Na podstawie w/w parametrów możliwe jest jednoznaczne określenie współczynników a , b opisujących prostą o równaniu $f(x) = ax + b$. Prosta ta stanowi oś włókna.

3. 2. Przykład symulacji struktury włóknistej

Przeprowadzono symulację komputerową nieuporządkowanej struktury włóknistej zbudowanej z dwu rodzajów włókien dla której przyjęto poniżej podaną konfigurację.

Konfiguracja:

Rozmiar warstwy [μm]: 1000

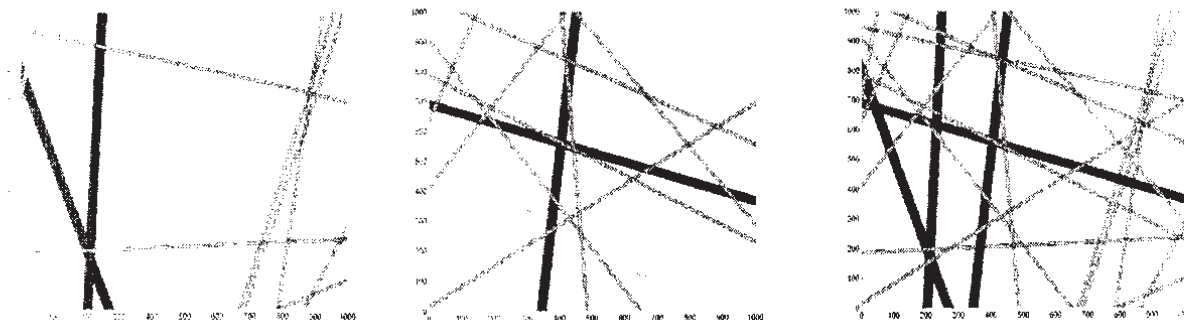
Ilość warstw: 5

Wybrane warstwy: 1, 2, 3, 4, 5

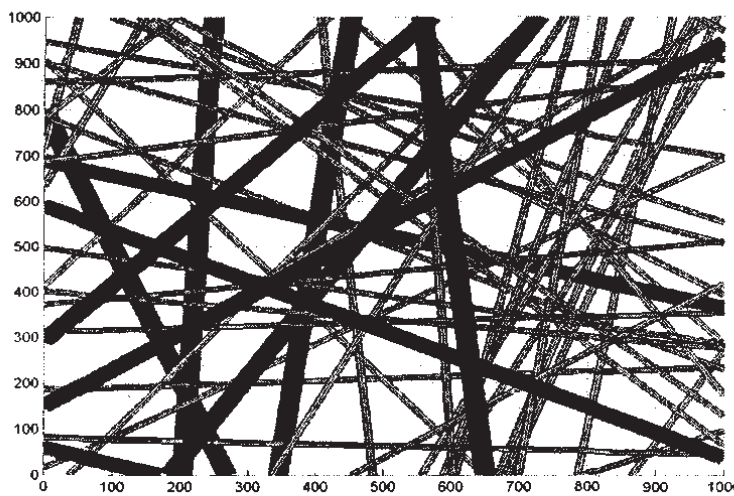
Wszystkie warstwy identyczne w postaci:

Ilość włókien	10.000000
Włókno I	
Szerokość [μm]	30.000000
Grubość [μm]	20.000000
Długość [μm]	4000.000000
Udział procentowy	20.000000
Włókno II	
Szerokość [μm]	12.000000
Grubość [μm]	12.000000
Długość [μm]	3000.000000
Udział procentowy	80
Stan generatora	0.000000

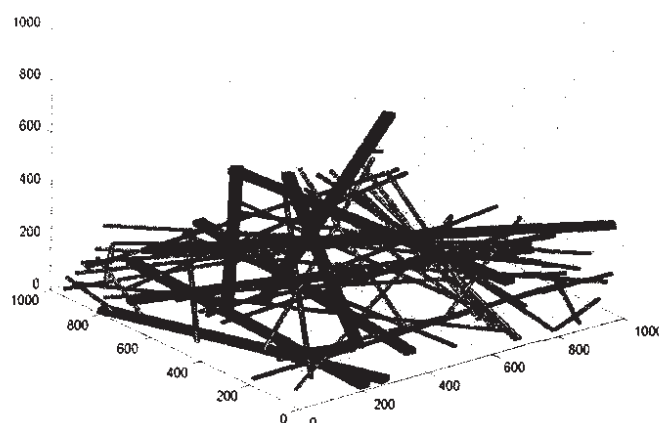
Obraz symulowanej struktury przedstawiają rysunki 5, 6, 7.



Rys. 5. Graficzny obraz tworzenia pojedynczych warstw symulowanej struktury
Fig. 5. Way of creating of the single surfaces of the simulated structure



Rys. 6. Dwuwymiarowy obraz symulowanej struktury
Fig. 6. Two – dimensional view of the filter structure computer simulation



Rys. 7. Trójwymiarowy obraz symulowanej struktury
 Fig. 7. Three-dimensional view of the filter structure computer simulation

Rezultaty obliczeń parametrów charakteryzujących strukturę symulowaną przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Wartości parametrów charakteryzujących symulowaną strukturę
 Table 1. Values of the parameters describing the simulated structure

Nazwa parametru	Wartość parametru
Ilość włókien	50
Ilość skrzyżowań	665
Ilość por	325
Szerokość włókien [μm]:	
minimalna	12.000000
maksymalna	30.000000
średnia	15.600000
Powierzchnia por [μm^2]:	
minimalna	0.000009
maksymalna	12805.637297
średnia	1024.009676
Obwody por [μm]:	
minimalny	0.016371
maksymalny	451.842806
średni	116.347380
Promienie zastępcze por [μm]:	
minimalny	0.000000
maksymalny	68.920796
średni	9.804129
Średnie długości boków [μm]	
minimalna	0.005457
maksymalna	103.887149
średnia	28.517764

4. Podsumowanie

Najpowszechniej stosowane materiały filtracyjne do oczyszczania płynów eksploatacyjnych posiadają strukturę nieuporządkowaną, niezwykle trudną do opisu matematycznego. Symulacja komputerowa umożliwia generowanie struktur zbudowanych z włókien o dowolnie zadawanych parametrach i dowolnym ich udziale procentowym. Daje możliwość wyznaczenia parametrów charakteryzujących symulowaną strukturę materiału filtracyjnego, pozwala więc projektować nowe struktury materiałów filtracyjnych i przewidywać ich zdolność do oczyszczania płynów.

W dalszych pracach w celu dalszego zbliżenia struktury symulowanej do rzeczywistej należy uwzględnić zmienność takich parametrów jak porowatość materiału i krętość włókien tworzących strukturę porowatą.

Literatura

- [1] Abbasi M.H.: *Diffusion of Gases in Porous Solids*, AIChE Journal, t 29 nr 4, 1983
- [2] Brown R.C.: *Air Filtration*, Pergamon Press 1993
- [3] Corte M.: *Why can paper be used as Filter Medium*, Filtration and Separation nr 1, 1980
- [4] Podsiadła-Bulsa Z., Piłat A.: Sprawozdanie z pracy n-b pt.: Zagadnienie budowy i symulacji struktur filtracyjnych, Politechnika Radomska, Radom 2002
- [5] Szucs E.: *Modelowanie matematyczne w fizyce i technice*, WNT, W-wa, 1977