

Моделиране на въздухопропускливостта през поръзни текстилни структури

Радостина А. Ангелова, Мирослав Късов

Modelling of the Air-permeability of Porous Textile Structures: *The paper presents results from the CFD simulation of the air-permeability of woven textiles in through-thickness direction. The woven structure is approximated to a jet system and 0% and 25% porosity of the mesostructure (permeability of the threads) is simulated. The necessary mathematical background for simulation of the porosity is also presented. The numerical results show the adequacy of the model.*

Key words: *Computational Fluid Dynamics, Textiles, Woven textiles, Jet Systems, Porosity, Air-Permeability*

ВЪВЕДЕНИЕ

Изчислителна механика на флуидите (CFD) като средство за пресмятане на пропускливостта на текстилни поръзни изделия има различни приложения в развитието на нови материали, както и за подобряване на съществуващи изделия като филтри, платове за облекло, технически текстил, композитни материали и др. Една от основните задачи е свързана с прогнозиране на въздухопропускливостта в напречна посока на виртуални текстилни изделия в етапа на проектирането им, без да се налага реалното им производство, което е скъпо и трудоемко [5, 7-8]

Моделирането на въздухопропускливостта е свързано с адекватно симулиране на текстилната преграда, през която преминава флуида [3-4]. Площните текстилни изделия са йерархично структурирани материали. Ето защо, един модел за протичане на флуид в текстила трябва да бъде в състояние да отчита за поръзността както на макроструктурно ниво (през порите между нишките), така и на мезоструктурно ниво (през порите между влакната или филаментите в нишките).

В настоящото изследване се представя метод за симулиране на въздухопропускливостта през поръзни текстилни структури, основан на теорията за система струи и представен в предишни публикации на колектива [1-3, 6, 9-10]. За симулацията се използва CFD софтуерен пакет FLUENT и препроцесор GAMBIT. Симулирана е тъкана структура в сплитка лито, през която протича флуид в напречна посока.

ПОСТАНОВКА НА ЧИСЛЕНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ

Математичен модел. Използва се системата ЧДУ на Рейнолдс с добавено уравнение за непрекъснатост, затворена с RSM турбулентен модел.

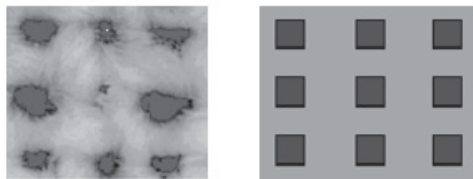
Моделиране на тъканата структура. Моделира се тъкан плат в сплитка лито, от щापелни прежди П100%, с дебелина на образеца 0.39mm и средна площ на пората 0.038mm². Образецът се апроксимира до система от 3x3 коридорно разположени струи, както е показано на Фиг. 1. Еквивалентната страна на пората с квадратно напречно сечение е 0.19mm. Отстоянието от началото на изчислителната област е 4 mm, а дължината на изчислителната област след образеца е 8 mm. Тези разстояния са определени на базата на предварителни тестове така, че да се осигури развитието на течението след текстилната „преграда“ [2].

Подходът е подробно описан и приложен в [2-3].

Моделиране на поръзната среда. Моделирането на поръзността на мезоструктурата се извършва чрез добавяне на допълнителен член за количество на движение към преносните уравнения от системата ЧДУ на Рейнолдс. Този член S_i отразява инертното и вискозното съпротивление и има вида [11]:

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + \frac{C_2}{2} \rho |v_i|\right) \quad (1)$$

където α е коефициентът на вискозно съпротивление; μ - динамичният вискозитет; v_i - скоростта в i -тото направление; C_2 - коефициентът на инерционно съпротивление; $|v|$ - големината на скоростта.



Фигура 1. Апроксимация на тъкана макроструктура до системи струи, изтичащи от квадратен отвор

Инерционното съпротивление се пресмята чрез уравнението на Van Winkle и се задава еднакво за трите направления (x , y и z). Уравнението има вида:

$$\dot{m} = CA_f \sqrt{\frac{2\rho\Delta p}{1 - \left(\frac{A_f}{A_p}\right)^2}} \quad (2)$$

където \dot{m} е масовият дебит през мезоструктурата; C - коефициент, който зависи от числото на Рейнолдс Re и от отношението на дебелината на плата t към хидравличния диаметър на пората d_h ; ρ - плътността на въздуха; A_f - общата площ на порите на макроструктурата; A_p - площта на текстилната преграда.

При заместване в (2) на изразите (3) и (4)

$$\dot{m} = \rho v A_p \quad (3)$$

$$E = \frac{A_f}{A_p} \quad (4)$$

и при разделяне на дебелината на плата $t = \delta$, се получава:

$$\frac{\Delta p}{\delta} = \left(\frac{1}{2} \rho v^2\right) \frac{1}{C^2} \frac{E^2 - 1}{t} \quad (5)$$

където v е общата скорост през образеца (не скоростта през порите на макроструктурата).

При сравняване на уравнение (5) с дефинираното уравнение (1) за инерционното съпротивление следва:

$$\Delta p_i \approx \sum_{j=1}^3 C_{2ij} \Delta n_i \left(\frac{1}{2} \rho v_j |v_j|\right), \quad (6)$$

при което за коефициента на инерционно съпротивление се получава:

$$C_2 = \frac{E^2 - 1}{t C^2} \quad (7)$$

Уравнението на Ergun се използва за пресмятане на вискозното съпротивление, което се задава еднакво за трите направления (x , y и z):

$$\frac{|\Delta p|}{t} = \frac{150\mu}{D_p^2} \frac{(1-E)^2}{E^2} v_\infty + \frac{1.75\rho}{D_p} \frac{(1-E)}{E^3} v_\infty^2, \quad (8)$$

където D_p е средният диаметър на влакното в мезоструктурата.

При сравняване на уравнение (8) с уравнението за инерционното

съпротивление:

$$\Delta p_i = \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{ij}} v_j \Delta \eta_i, \quad (9)$$

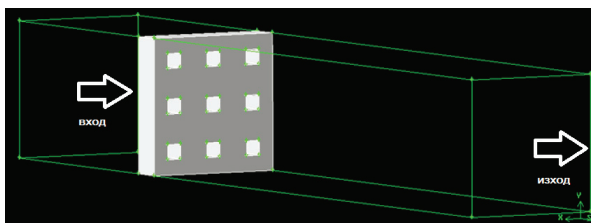
следва:

$$C_2 = \frac{3.5(1-E)}{D_p E^3} \text{ и} \quad (10)$$

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{150(1-E)^2}{D_p^2 E^3}. \quad (11)$$

Стойностите за порьозност на мезоструктурата варират от 0 до 1, като 0 съответства на 100% пропускливост, а 1 – на 0% пропускливост. Симулира се въздухопропускливостта през макроструктурата при задаване на две стойности на порьозност на мезоструктурата: 0% и 25%.

На Фиг. 2 е представена схема на изчислителната област, генерирана в GAMBIT, с посочени вход и изход на течението.



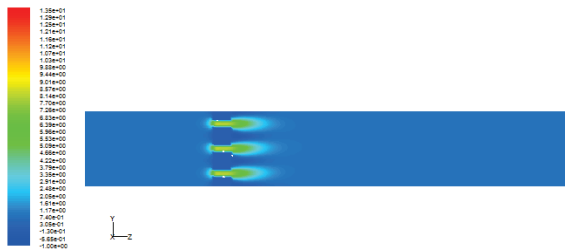
Фигура 2. Изчислителна област

Гранични условия. По стените на изчислителната област са зададени симетрични гранични условия. От двете страни на тъканата макроструктура е зададено градиент на налягането 100 Pa. Линейната плътност на нишките от мезоструктурата не се променя по дължината им. Прекръстосването на нишките (сплитката) рефлектира върху дебелината на макроструктурата, която определя дължината на порите, през които изтичат струите. Площта на порите е еднаква за всички пори в рамките на модела.

РЕЗУЛТАТИ ОТ ЧИСЛЕНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ

Фигури 3 и 4 показват резултати от визуализацията на скоростните полета при зададени съответно 0 и 25% порьозност на мезоструктурата. Сравнението между фигурите показва качествена промяна на скоростното поле, което отразява преминаването на флуид през текстилната макроструктура. При 0% порьозност на мезоструктурата може да се наблюдава по-ясно и развитието на струйното течение след образеца и взаимодействието между струите за формиране на резултантното течение. При Фиг. 3 текстилът играе много повече роля на преграда пред движението на въздуха, в сравнение с Фиг.4 и скоростта на течението е по-ниска.

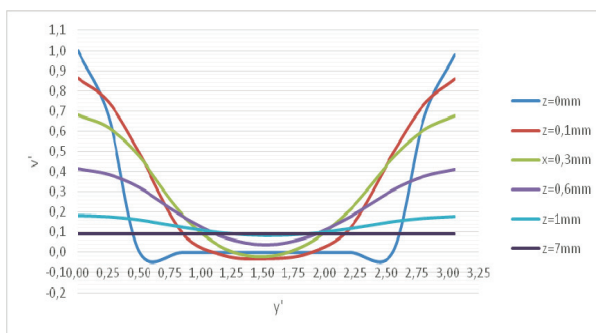
Ефектът на задаването на порьозност на мезоструктурата може да се проследи по-ясно при изменение на обезразмерените скоростни профили, показани на Фигури 5 и 6, съответно за 0 и 25% порьозност. Докато на Фиг. 5 абсолютната стойност на минималната скорост в зоната на нишката е 0m/s, при Фиг. 6 тя е 2.9m/s. Развитието на течението е сходно, на затихването на скоростта е много по-бързо при отсъствие на порьозност на мезоструктурата. Скоростта на развитото течение също е различна: 0.8m/s при 0% порьозност и 3.7m/s при 25% порьозност.



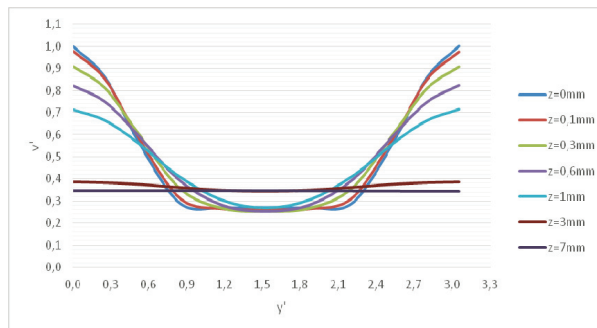
Фигура 3. Скоростно поле,
0% порьозност на мезоструктурата, z-velocity, равнина $x=0.875\text{mm}$



Фигура 4. Скоростно поле,
25% порьозност на мезоструктурата, z-velocity, равнина $x=0.875\text{mm}$



Фигура 5. Скоростни профили, 0% порьозност на мезоструктурата,
y-velocity, равнина $x=0.875\text{mm}$



Фигура 6. Скоростни профили,
25% порьозност на мезоструктурата, y-velocity, равнина $x=0.875\text{mm}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практическото значение на резултатите от представеното изследване е възможността за симулиране на преноса на флуид през тъкана порьозна структура чрез средствата на CFD, при моделиране на течението през порите на макроструктурата като система струи, с едновременната възможност за задаване на порьозност на мезоструктурата. Резултатът от изследването показва адекватно поведение на модела и възможност за използването му за реално пресмятане на въздухопропускливостта на тъкани текстилни изделия.

Финансиране

Изследването в работата е финансирано от ТУ-София, научно-изследователски проект в помощ на докторанти No 142 ПД 0030-02.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Станков П., Тримерни турбулентни течения в топло- и масообемни процеси, Дисертация Доктор на техническите науки, ТУ-София, 1998.
- [2] Angelova R.A., P. Stankov, I. Simova, I. Aragon, Three Dimensional Simulation of Air Permeability of Single Layer Woven Structures, Cent. Eur. J. Eng., 1(4), pp. 430-435, 2011.
- [3] Angelova R.A., P. Stankov, I. Simova, M. Kyosov, Computational modeling and experimental validation of the air permeability of woven structures on the basis of simulation of jet systems, Textile Research Journal 83 (18), pp. 1887- 1895, 2013.
- [4] Angelova R.A., Pore Approximation in Numerical Modeling of Air-Permeability of Woven Structures, Proc. of Second Int. Course "Ventilation Efficiency and Indoor Climate Quality", ISBN 978-9989-2701-8-5, Ohrid, Macedonia, August 18-23, pp. 115-120, 2010b.
- [5] Duru Cimilli S., E. Deniz, C. Candan, B.U. Nergis, Determination of Natural onvective Heat Transfer Coefficient for Plain Knitted Fabric via CFD Modeling, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe, 20, 1(90), pp. 42-46, 2012.
- [6] Lozanova M., P. Stankov, Experimental Investigation on the Similarity of a 3D Rectangular Turbulent Jet, Experiments in Fluids, vol. 24 (5-6), pp. 470-478, 1998.
- [7] Nazarboland M.A., X. Chen, J. W. S. Hearle, R. Lydon, M. Moss, Effect of Different Particle Shapes on the Modelling of Woven Fabric Filtration, J. of Information and Computing Science, Vol. 2, No. 2, pp. 111-118, 2007.
- [8] Saldaeva E., Through thickness air permeability and thermal conductivity analysis for textile materials, PhD Thesis, The University of Nottingham, UK, 2010.
- [9] Stankov P., I. Simova, Numerical and experimental study on air jet systems applied in air supply devices, Proc. Int. Conf. "Mechanical Engineering in XXI Century", Nis, Serbia, 25-26 November 2010, pp.47-51, 2010.
- [10] Stankov P., M. Lozanova, D. Markov, Y. Dinkov Experimental investigation of rectangular turbulent jets, In Proc. of Int.Symp. on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Lisbon, Portugal, August 9-12, 1994.

За контакти:

Доц. д-р Радостина А. Ангелова, Катедра "Текстилна техника", ТУ–София, e-mail: radost@tu-sofia.bg

Докладът е рецензиран.