

Моделиране на ноздри върху лице на виртуален топлинен манекен

Мартин Иванов, Сергей Мижорски

Резюме:

В инженерната практика, оценката на топлинния комфорт на обитателите, както и анализите на качеството на въздуха в затворените помещения в реална или виртуална затворена среда, са често пъти извършвани чрез използването на реални или виртуални топлинни манекени. Реалните топлинни манекени могат да бъдат оборудвани с допълнителни устройства, които симулират човешки дейности като дишане, изпотяване, кихане, кашляне и др. Затова, разработването на допълнителни функции за виртуалните топлинни манекени се счита за важен аспект на представената инженерна област. Настоящата публикация разглежда виртуален модел на човешкото тяло, базиран на изчислителната динамика на флуидите, със симулирани стационарни фази на дишане, като в реалния дихателен цикъл при хората. Позицията и геометрията на симулираните ноздри са от особен интерес в представеното изследване. Резултатите относно симулираните въздушни течения при вдишване и издишване, показват добра корелация с реалните физически процеси.

Представената работа е част от дейностите по проект към НИС на ТУ-София, финансиран по направление „Перспективни ръководители“, с Договор № 161ПР0004-02, на тема: „Интегриране на схемно решение на пневматична система, симулираща процеса на дишане при хората, във виртуален модел на дишащ манекен“.

Ключови думи: изчислителна динамика на флуидите, затворена климатична среда, качество на въздуха в затворените помещения, топлинни манекени, експериментални изследвания, дихателен цикъл

Nostrils modeling over a face of virtual thermal manikin

Martin Ivanov, Sergey Mijorski

Abstract:

In the engineering practice, the assessment of the occupants' thermal comfort, as well as the analyses of indoor air quality in real or virtual enclosed environment, is widely performed by the use of real and virtual thermal manikins. The real thermal manikins can be equipped with additional devices that simulate human activities such as breathing, sweating, sneezing, coughing and others. That is why, the development of supplementary functionalities for the virtual thermal manikins is also considered as important aspect of this engineering area. So, the presented paper discusses CFD based model of human body, with simulated steady state breathing phases like in real human breathing cycle. The position and the geometry of the simulated nostrils are of special interest in the presented research. The results considering the simulated breathing flow show good correlation with the real physical processes.

The presented work is part of the activities under a "Perspective leaders" project, supported by "НИС" at TU-Sofia, with Contract № 161ПР0004-02, entitled: "Integration of schematic solution of pneumatic system, for simulating the breathing cycle of human occupants, in virtual model of breathing manikin".

Key words: computational fluid mechanics, indoor environment, indoor air quality, thermal manikins, experimental studies, breathing cycle

Въведение:

Топлинните манекени имат важна роля в инженерната практика, тъй като представляват точни модели на човешкото тяло и предоставят възможност за симулиране на различни

нива на физическа активност, както и на някои човешки дейности като дишане, изпотяване, кихане, кашляне и др. [1,3,6]. Те се изключително сложни инструменти и се използват също така, и за изследване на конвективни течения в различни условия, без излишен риск при излагане на самите хора. Но все пак, експерименталните изследвания с реални топлинни манекени изискват високо квалифициран труд, сравнително трудни са за провеждане, свързани са с много разходи и отнемат време. Ето защо използването на виртуални топлинни манекени (VTM), особено на етап проектиране на околната среда и прогнозиране на отделни параметри, се счита за целесъобразна алтернатива на реалните топлинни манекени [3,8].

За това, през последните години изследванията с VTM се развиват в насока прибавяне на допълнителни функционалности, включително и за симулиране на процесът на дишане при хората. Такава функционалност например, е частично представена в работата на Xiangdong [15]. Неговото проучване се отнася до моделиране на въздушните течения при различни позиции на краката на манекена, съответно при излагане на въздействието на различни външни условия. В това проучване, различните моделни настройки се визуализират чрез метод за проследяване на частиците в течението. Също така, експериментални данни са използвани за валидиране на получените модели на вдишвания въздух.

Физиологично погледнато, основната функция на дихателната система при хората е да доставя кислород в човешкото тяло и да извежда генерираните отпадъчни газове навън. Самата функция се нарича „дишане“ и реално погледнато представлява движението на въздуха от и към белите дробове на човека [3,8]. Здравите възрастни индивиди обикновено вдишват и издишват от 10 до 15 пъти в минута, при ниско ниво на активност или по време на почивка. Също така около 0.6 литра въздух се обменят между белите дробове и околната среда, по време на нормален дихателен цикъл [3,8]. Сумарно, това съответства на вдишване и издишване на повече от 12900 литра въздух на ден.

Но, вдишвания въздух в затворените помещения съдържа широко разнообразие от органични и неорганични съединения, голяма част от които обикновено се считат за замърсители. Тези замърсители биват емитирани от различни източници, като: строителни материали, мебелни и текстилни повърхности, телевизори и други битови електронни уреди, почистващи препарати, дейности като готвене отопление на твърди горива, тютюнопушене, както и от самите обитатели и техните домашни любимци [3,6]. Дългото излагане на тези замърсители и значителния обем на вдишван и издишван въздух, представляват сериозен риск за здравето, комфорта и работоспособността на обитателите на затворените помещения.

Допълнителни проучвания показват, че дишането като физиологичен процес все още се моделира рядко [1,3,10]. Особено рядко се моделират и самите въздушни течения при вдишване и издишване, като повечето усилия при създаването на VTM са насочени към развитието на топлинната им функционалност. Налице е необходимост от провеждане на числено изследване на взаимодействието между въздушните течения, генерирани при вдишване и издишване, и конвективните течения от нагнетите повърхности на манекена. От особен интерес за развитието на дишащата функционалност при VTM би било и реалистичното определяне на позицията и геометрията на симулираните ноздри.

Цел на представеното изследване:

Целта на представеното изследване е да се моделира реалистична позиция и геометрия на изходи, симулиращи ноздри, върху лице на виртуален топлинен манекен, а също и да се анализира поведението на въздушните течения генерирани при процесът на дишане. За изпълнение на целта, са дефинирани следните задачи:

1. Да се конструира опростен 3D модел на ноздра, с характерна за хората стандартна геометрия.

2. Да се конструира опростен 3D модел на ВТМ с възможност за симулиране на различни стационарни фази от процесът на дишане при хората, а именно „вдишване“ и „издишване“.

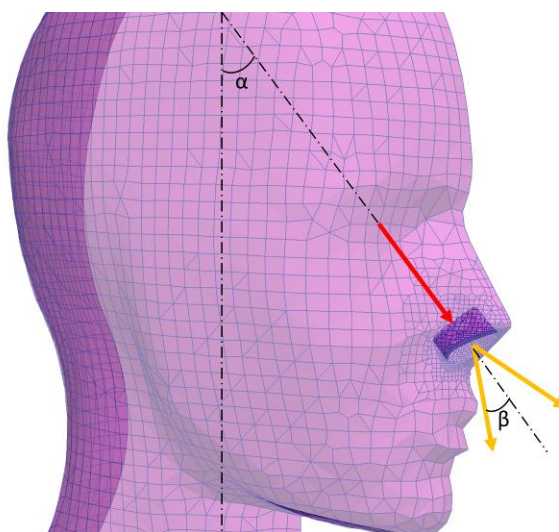
3. Да се изследват и сравнят теченията в дихателната зона на ВТМ при различните фази – на „вдишване“ и „издишване“.

Методи:

Използваните методи се базират на средствата на Изчислителната механика на флуидите (CFD). Проведени са две симулационни изследвания при стационарни условия. Те включват споменатите по-горе фази на дихателния цикъл при хората - вдишване и издишване. И в двата случая е използвана адаптирана от ENGYS® (www.engys.com) версия на изчислителния код за OpenFoam® (www.openfoam.com). Числения модел е създаден по метода с усреднени Рейнолдсови напрежения (RANS) в комбинация с $k-\omega$ турбулентен модел SST (Shear Stress Transport) [7, 12]. И при двете симулации е достигнат режим на стабилност на решенията, при предварително зададени 9000 итерации. След това са проведени допълнителни 1000 итерации, за осредняване и прецизиране на отклоненията в стойностите на симулираните полета на течението. Пресмятането и обвързването на уравненията за скорост и налягане е осъществено чрез алгоритъма „SIMPLE“. Подробна информация за алгоритъма, както и коефициенти за релаксация на решението са представени в [8].

Геометричен модел и изчислителна мрежа:

Цялостен модел на женски манекен е преработен и адаптиран за целите на представеното изследване. Приблизителната площ на манекена е 1.8 m^2 , а височината му е 1.65 m . Носната кухина е построена според изследването на Lin [4]. Както е показано на Фиг.1, отворът на назалната клапа е с площ 0.73 cm^2 . Наклонът на ноздрите (α) е 45 градуса, спрямо вертикалната ос на тялото на манекена, а наклонът на симулираните течения (β) е 15 градуса спрямо нормалата на задната стена на симулираната назална клапа [9,10,11].

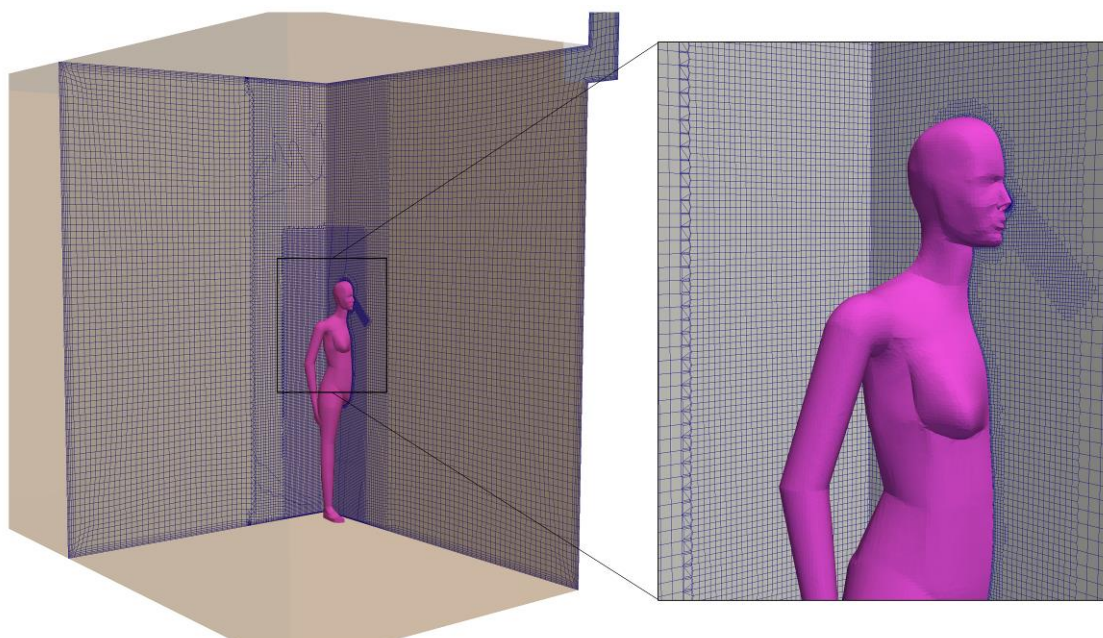


Фигура 1. Геометричен модел на лицевата част на виртуален топлинен манекен

Също така, за целите на изследването е построено правоъгълно помещение с размери 4×4 метра и височина от 3 метра. Манекенът е поставен в центърът на стаята. В

помещението е реализиран само един отвор на нивото на тавана, с площ от $0,08 \text{ m}^2$, служещ за коригиране на масовия баланс в контролния обем на стаята. Тъй като целта на изследването е да се моделира процесът на дишане при хората в стационарни условия, в помещението не е реализирана никаква друга вентилационна система.

Изчислителната област е дискретизирана с помощта на snappyHexMesh [12,13,14]. Изчислителната мрежа се състои от 1 140 000 контролни обема, базирани на клетки със различна форма (шестостени, многостенни, призми, клинове, тетраедри и други елементи), както е представена на Фиг. 2. За намаляване на изчислителното време, представената задача се разглежда като ососиметрична, и само половината от изчислителната област е моделирана, както и половината от виртуалния топлинен манекен. Размерът на базовата клетка в изчислителната мрежа е 40 mm , но с цел да се симулират прецизно геометричните характеристики на носна кухина, размерът на клетките в тази област е намален до $0,625 \text{ mm}$.



Фигура 2. Изчислителна мрежа на представения числен модел

Начални и гранични условия:

Количеството въздух, преминаващ през назалната клапа, е изчислен спрямо изследванията на Lin и Nigro [4,9]. Обемния дебит при вдишване и издишване е апроксимиран чрез формулата:

$$Q = (\Delta P \cdot \pi \cdot r^4) / (8 \cdot \eta \cdot L) \quad (1)$$

Където:

- ΔP , е налягане в обхвата $40\sim 80 \text{ Pa}$, а избраната стойност е 60 Pa ;
- L , апроксимираната дължина на назалната клапа, 0.33 m ;
- r , апроксимиран радиус на назалната клапа, 0.11 m ;
- η_{20} , кинематичен вискозитет при $20 \text{ }^\circ\text{C}$, $1.51 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, [2];
- η_{36} , кинематичен вискозитет при $36 \text{ }^\circ\text{C}$, $1.66 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, [2].

Също така, в изследването на Lin и Nigro [4,9] числото на Рейнолдс в зоната на назалната клапа е апроксимирано чрез следната формула:

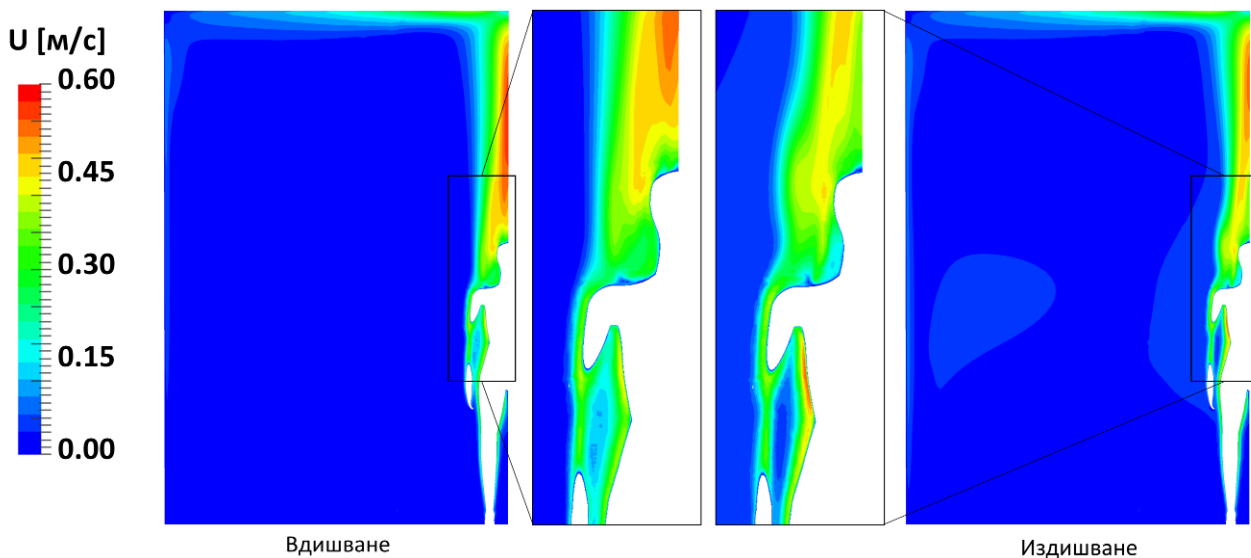
$$Re = 2 \cdot r \cdot Q \cdot \rho / \eta \quad (2)$$

Турбулентните характеристики на течението в ноздрата са апроксимирани след изчисляване на обемния дебит и заместване в уравнение (2). По този начин е изчислена и стойността на турбулентния интензитет, а именно 6.8% за представения случай. Дебитите при вдишване и издишване са съответно 0.629 l/s и 0.691 l/s, като температурата на генерираната въздушна струя е 36 °С. Стените на помещението, както и на въздуха в него, са с фиксирана стойност 20 °С, а налягането в модела е 101325 Pa.

Граничните условия върху повърхността на елементите на манекена са адаптирани от изследванията на Nilsson [10,11]. Коефициентите за пренос на топлина са фиксирани върху различните части на тялото и топлинния поток се изчислява като се има предвид общата повърхност на всеки елемент от манекена. Общо отделяната топлина е 110 W за цялата повърхност на манекена. Подробна информация за коефициентите на всеки един елемент е публикувана в [8].

Числени резултати:

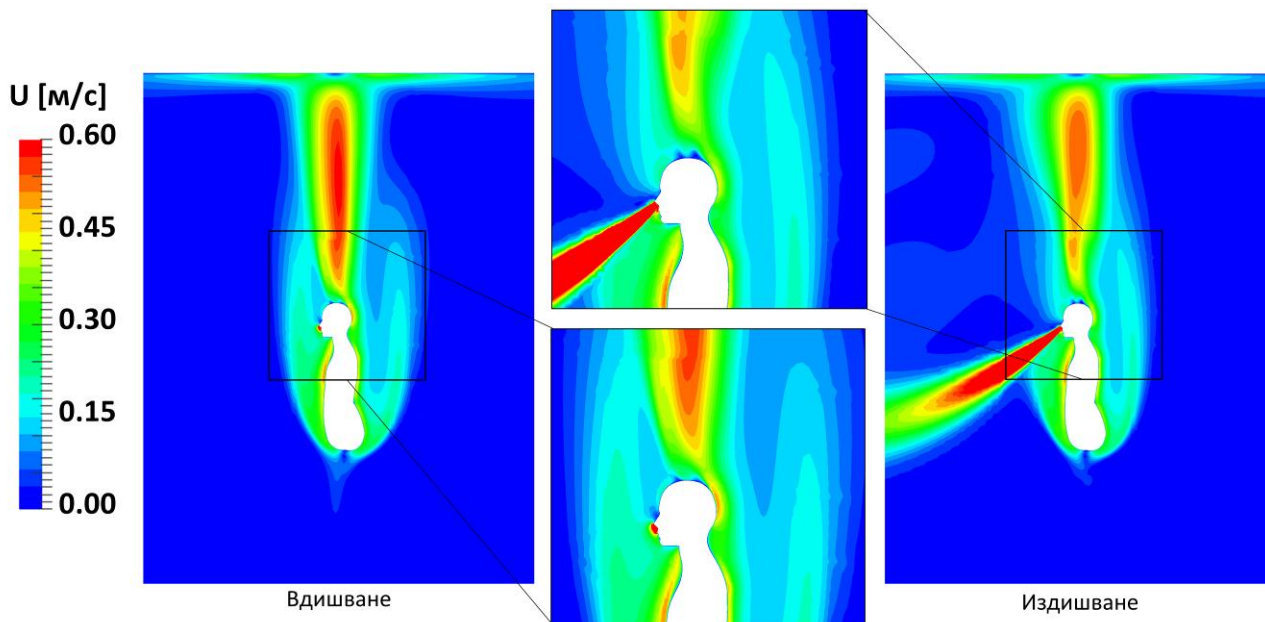
Резултатите от проведените числени изследвания са представени на фигури 3 и 4, посредством визуализирани скоростни полета. Резултатите показват ясно, че генерираното въздушно течение, при симулиране на дишане, оказва значително влияние върху конвективното течение и граничния слой около загрятото тяло на топлинния манекен. Това влияние е много по-малко по време на вдишване, докато при издишване е значително по-голямо. Фигурите показват още и, че по време на вдишване ефекта върху свободното конвективно течение е локализиран в дихателната зона, и не причинява значителна промяна на скоростта на струята над главата на манекена. В обратния случай, при издишване, се наблюдава значително нарушаване на свободното конвективно течение около манекена. Това нарушаване променя и течението над главата на манекена, като видимо води до намаляване на скоростта.



Фигура 3. Скоростни полета в анфас, при симулиране на вдишване и издишване

Влиянието на въздушно течение при издишване, върху граничния слой около тялото на манекена, се подсилва от ефекта на увличане на допълнителен въздух в зоната на дишане. Този ефект се наблюдава в областта около главата на манекена и над рамото му. Визуализациите при издишване в профил, показват значително отклонение на струята в

дихателната зона и съответното увличане на въздух от зоната под главата на манекена, в посока на издишания въздух.



Фигура 4. Скоростни полета в профил, при симулиране на вдишване и издишване

Като цяло, резултатите показват добра корелация с реалните физически явления и при двата симулирани случая - при вдишване и при издишване. В симулираните стационарни условия резултатите са стабилни и изчислителното време е значително по-малко, за разлика от симулации в нестационарен режим. Също така, граничните условия са по-опростени, а резултатите показват по-индикативно въздействието на симулирания процес на дишане върху конвективното течение около тялото на манекена.

Въпреки това, симулациите при стационарни условия могат да доведат до преизчисление на резултатните въздействия. Имплементирането на нестационарни условия ще илюстрира много по-точно динамиката на процесите, а също и турбулентното въздушно течение ще бъде по-добре предсказано в зоната на дишане на манекена. Също така, в стационарен режим, не могат да бъдат приложени по-сложни техники за моделиране като Large Eddies Simulation (LES) и Detached Eddies Simulation (DES). Тези техники биха позволили анализ на динамичния ефект от охлаждане на повърхността на отделните части на манекена. Затова, стационарните условия се считат за недостатък на представения модел.

Заклучение:

Проведено е симулационно изследване на фазите на вдишване и издишване, от дихателния цикъл при хората, при стационарни контролирани условия. Изследването е базирано на методите на изчислителната динамика на флуидите (CFD). Позицията и геометрията на симулираните ноздри са моделирани възможно най-реалистично.

Резултатите показват добра корелация с реалните физични явления и при двата симулирани случая - при вдишване и при издишване. И в двата случая генерираното въздушно течение, при симулиране на дишане, оказва значително влияние върху конвективното течение и граничния слой около загрятото тяло на топлинния манекен. Това влияние е по-ясно изразено при симулиране на издишване.

Установено е, че симулациите при стационарни условия могат да доведат до преизчисление на апроксимираното влияние. За това, имплементирането на нестационарни условия ще подобри значително работата на създадения модел, като ще даде възможност за много по-точно илюстриране на динамиката на процесите при симулиране на дишане с виртуален топлинен манекен.

Постигнатите резултати в представеното изследване дават нов, ценен подход при интегрирането на различни техники, предназначени за развитие на допълнителни функционалности на виртуалните топлинни манекени.

Литература:

- [1] Bjørn E., „Simulation of human respiration with breathing thermal manikins“, Proceedings of the 3rd international meeting on thermal manikin testing 3IMM, Stockholm, Sweden, 12–13 October, 1999;
- [2] Fluid Properties Calculator: <http://www.mhfl.uwaterloo.ca/old/onlinetools/airprop/airprop.html>, Microelectronics Heat Transfer Laboratory, 2016;
- [3] Ivanov M., “Compact Breathing Simulation System, Developed as Additional Functionality for Thermal Manikins”, “Romanian Journal of Building Services”, Vol.1, No.3, ISSN: 2393-5154, pp. 1-12, 2015;
- [4] Lin S., “Nasal Aerodynamics”, Chief Editor: Arlen D Meyers, MD, MBA, <http://emedicine.medscape.com/article/874822-overview#a1>, Updated: May 14, 2015;
- [5] Madsen T., “Development of a breathing thermal manikin”, Proceedings of the 3rd international meeting on thermal manikin testing 3IMM, Stockholm, Sweden, 12–13 October, 1999;
- [6] Melikov A., "Breathing thermal manikins for indoor environment assessment: important characteristics and requirements". *Europ. J. of Applied Physiology* 92 (6): 710–713, 2004;
- [7] Menter F., “Turbulence Modelling for Engineering Flows”, ANSYS Inc. , 2011;
- [8] Mijorski S., Ivanov M., “CFD modelling of flow interaction in the breathing zone of virtual manikin”, Submitted for publishing in “Energy Procedia”, Elsevier, 2016;
- [9] Nigro C., Nigro J., Mion O., Mello J., “Nasal valve: anatomy and physiology”, *Rev. Bras. Otorrinolaringol.*, Vol.75 no.2 São Paulo Mar./Apr., 2009;
- [10] Nilsson H., Brohus H., Nielsen P. V., “CFD Modeling of Thermal Manikin Heat Loss in a Comfort Evaluation Benchmark Test”, Proceedings of Roomvent 2007 : Helsinki 13-15 June, 2007;
- [11] Nilsson H., “How to Build and Use a Virtual Thermal Manikin Based on Real Manikin Methods”, Sixth International Thermal Manikin and Modelling Meeting”, “Thermal Manikins and Modelling”, ISBN: 962-367-534-8, 2006;
- [12] OpenFOAM® User Guide: 5.4 Mesh generation with snappyHexMesh. <http://cfd.direct/openfoam/user-guide/snappyhexmesh/>, 2016;
- [13] OpenFOAM® User Guide: 3.5 Standard solvers. <http://cfd.direct/openfoam/user-guide/standard-solvers/>, 2016;
- [14] OpenFOAM® User Guide: 4.5 Solution and algorithm control. <http://cfd.direct/openfoam/user-guide/fvSolution.>, 2016;
- [15] Xiangdong L., Kiao I., Qinjiang G., Jiyuan T., “Numerical investigation of particle transport and inhalation using standing thermal manikins”, *Building and Environment* 60, 116e125, 2013.

Acknowledgements:

Представената работа е част от дейностите по проект към НИС на ТУ-София, финансиран по направление „Перспективни ръководители“, с Договор № 161ПР0004-02, на тема: „Интегриране на схемно решение на пневматична система, симулираща процеса на дишане при хората, във виртуален модел на дишащ манекен“.

гл. ас. д-р Мартин Иванов, PhD, кат. „Хидроаеродинамика и хидравлични машини“, ЕМФ към Технически университет – София, България, e-mail: m_ivanov@tu-sofia.bg

д-р Сергей Мижорски, PhD, SoftSim Consult Ltd., консултант към кат. „Хидроаеродинамика и хидравлични машини“, ЕМФ към Технически университет – София, България, e-mail: sergey_mijorski@yahoo.com