

Designing new constructions of filter respirators: challenges and perspectives

Serhii Cheberiachko¹, Olena Yavorska^{1*}, Andrii Yavorskyi¹, Maksym Ikonnikov¹

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

*Corresponding author: cheberiachko.s.i@nmu.one

Abstract. The paper analyzes the available scientific and practical experience as well as trends of new designs of filter respirators. Basing on the analysis of scientific works in this area of research, it should be noted that it is quite difficult to implement an individual approach to the design and manufacture of each respirator and its current production at a particular enterprise. Thus, the article proposes to represent the movement of dust aerosol near the half-mask by two streams, one of which enters the filter box with a filter and can be described by three differential equations in the first-order partial derivatives with Euler variables, which with the flow continuity equation allow to obtain the relationship between the kinematic and geometric parameters of the filter and density of the dust flow. It is indicated that this equation does not take into account the penetration of the aerosol through the gaps, which requires the search for further solutions; that will be covered in the future authors' studies.

Keywords: elastomeric half mask, modeling, respirator, dust aerosol, filter, valve system

Проектування нових конструкцій фільтрувальних респіраторів: переваги і перспективи

Сергій Чеберячко¹, Олена Яворська^{1*}, Андрій Яворський¹, Максим Іконніков¹

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

*Відповідальний автор: yavorska.o.o@nmu.one

Анотація. У статті представлений аналіз наявного наукового і практичного досвіду та тенденцій проектування нових конструкцій фільтрувальних респіраторів. Виходячи із аналізу наукових робіт даного напрямку досліджень, слід констатувати, що досить складно реалізувати індивідуальний підхід для проектування та виготовлення кожного респіратора і його поточного виробництва на конкретному підприємстві. Так, у статті пропонується рух пилового аерозолу біля півмаски представляти двома потоками, один з яких потрапляє до фільтрувальної коробки з фільтром і може бути описаний трьома диференціальними рівняннями у частинних похідних першого порядку з Ейлеровими змінними, які з рівнянням нерозривності потоку дозволяють отримати взаємозв'язок між кінематичними та геометричними параметрами фільтра та щільністю запиленого потоку. Вказано, що в даному рівнянні не враховується проникнення аерозолу крізь щілини, що потребує пошуку подальших рішень, які будуть висвітлені у подальших роботах авторів.

Ключові слова: еластична півмаска, моделювання, респіратор, пиловий аерозоль, фільтр, клапанна система

1. Вступ

Захисні властивості фільтрувального респіратора залежать від трьох аспектів [1]: якісного надійного фільтра, який забезпечує заданий термін захисної дії респіратора; щільного прилягання півмаски респіратора до обличчя користувача, що забезпечує відсутність підсмоктувань нефільтрованого повітря крізь щілини за смугою обтюрації; своєчасного і постійного використання фільтрувального респіратора, що характеризується відповідним рівнем ергономічного комфорту.

Зрозуміло, що забезпечення вищезгаданих аспектів здійснюється на етапі проектування та розробки фільтрувальних респіраторів, що вимагає застосування нестандартних новаторських підходів для побудови якісних моделей підвісок [2]. Сучасні тенденції з цього напрямку все більше направлені на реалізацію індивідуального підходу, який поєднує в собі певні особливості основних підходів до проектування [3]: цілісного – низку об'єктивних та суб'єктивних цінностей, які пов'язані з способом життя майбутнього користувача; системного - функціональні зв'язки між навколишнім середовищем та процесами, що протікають за участі конкретної людини; функціонального – вплив конкретних властивостей засобів індивідуального захисту на діяльність людини [4].

Специфіка дизайну респіраторів полягає в тому, що концепції знаходять своє втілення, перш за все, у зручній і комфортній формі, що досягається за рахунок широкого застосування інформаційних технологій [5], з побудови цифрових моделей голови на основі обробки антропометричних даних [6], побудови та обрахунку параметрів півмаски за визначеними ключовими точками з використанням NURBS – поверхонь чи В-сплайнів [7]. Встановлення необхідних властивостей клапанної системи [8] завдяки виявленню відповідних матеріалів, які характеризуються еластичністю і довговічністю [9]. Розробки конструкції наголів'я з урахуванням рівномірного розподілу притискних зусиль [10]. Вибору параметрів та виготовлення нових фільтрувальних матеріалів для фільтрів, виходячи з властивостей шкідливої речовини [11] та умов експлуатації (рис. 1).

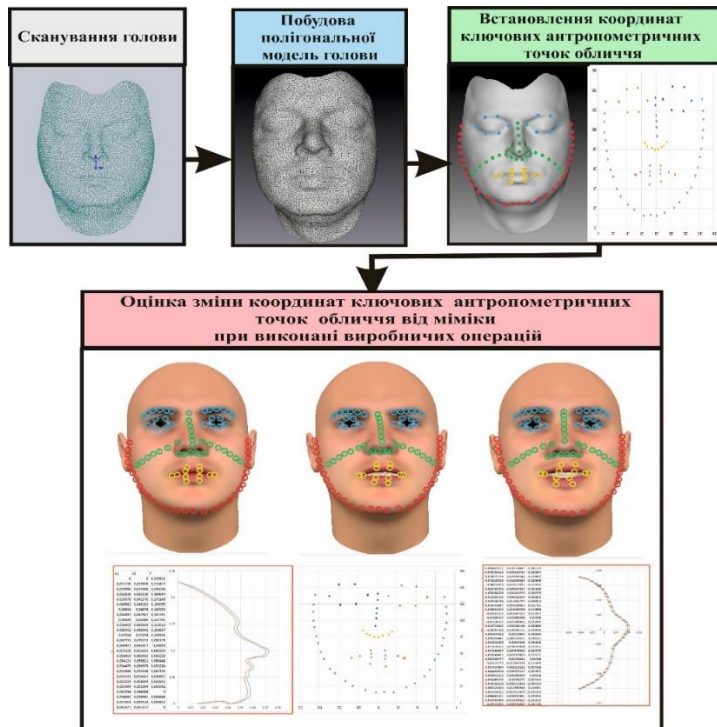


Рисунок 1. Етапи визначення координат антропометричних точок

2. Методика проведення досліджень

Однак вказаний підхід досить складно реалізувати для поточного виробництва засобів індивідуального захисту органів дихання на конкретному підприємстві [12] через значні втрати часу для налагодження обладнання під конкретний розмір півмаски чи наголів'я, підбір матеріалів для фільтрів чи клапанної системи, що відповідають умовам експлуатації та фізіологічним можливостям конкретного користувача [13].

Вирішення вказаних задач потребує перш за все розробку математичних моделей з обрахунку терміну захисної дії фільтрів з урахуванням, як їх конструктивних параметрів, так кліматичних та експлуатаційних умов праці (температури, вологості, дії декількох шкідливих газів, темпу, ритму виконуваної роботи) для швидкого підбору існуючих фільтрувальних матеріалів чи виготовлення нових із заданими параметрами (рис. 2).

Наприклад, для уловлювання парів при відносно невеликих концентраціях небезпечних хімічних речовин в повітрі на мікропористих сорбентах, зокрема на активованому вугіллі, отримала широке застосування теорія об'ємного заповнення мікропор (ТОЗМ) Дубініна-Радushкевича [14]:

$$a = \frac{W_0}{V^*} \exp \left[- \left(\frac{RT \ln \frac{P_s}{P}}{\beta E_0} \right)^2 \right]$$

$$\frac{P_s}{P} = \frac{C_s}{C}$$

де a – величина рівноважної адсорбції, ммоль/г; W_0 – граничний обсяг адсорбційного простору, см³/г. Для активного вугілля $W_0 \approx V_{\text{тн}}$; V^* – молярний об'єм шкідливої речовини в адсорбованому стані, ммоль/г. В інженерних розрахунках приймають, що $V^* \approx V_{\text{рід}}$ ($V_{\text{рід}}$ – молярний об'єм речовини в рідкому стані); R – універсальна газова постійна, $R = 8,31441$ Дж / (моль · К); T – температура, К; P_s – тиск насиченої паром речовини, Па; P – парціальний тиск пара речовини, Па; C_s – концентрація насиченого пара речовини, мг/л; C – концентрація пару речовини, мг/л; E_0 – характеристична молярна енергія адсорбції, кДж/моль, характеризує розмір мікропор: $X_{\text{мі}} = 12/E_0$; β – коефіцієнт афінності, за фізичним змістом дорівнює відношенню молярних диференціальних робіт адсорбції при адсорбції одного моля шкідливої речовини і одного моля бензолу (стандартної речовини).

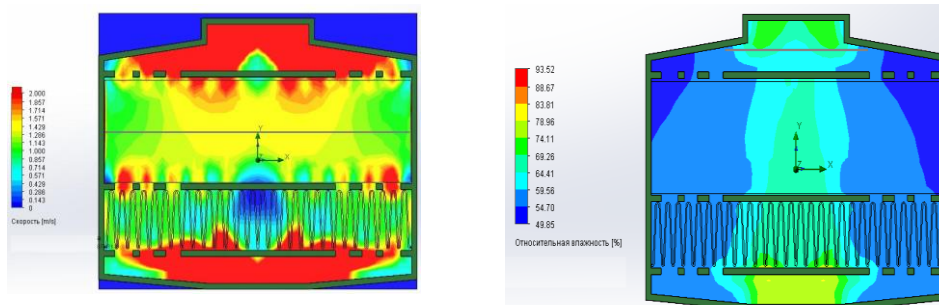


Рисунок 2. Моделювання відпрацювання адсорбенту з різною вологістю повітря 85 % (1); 50 % (2)

3. Результати та обговорення

Також потребує серйозної переробки процедура цифрового збору та обробки антропометричних даних користувачів для їх систематизації з метою виділення певного типоряду універсальних розмірів (рис. 3), які б характеризували анатомічну відмінність користувачів за віком, національністю чи наявністю бороди або певних вад і дозволили з одного боку швидко налаштовувати виробниче обладнання для їх виготовлення з мінімальними фінансовими та часовими втратами, а з іншого забезпечили максимальну відповідність конкретним користувачам, які будуть їх застосовувати після відповідної перевірки на виробництві

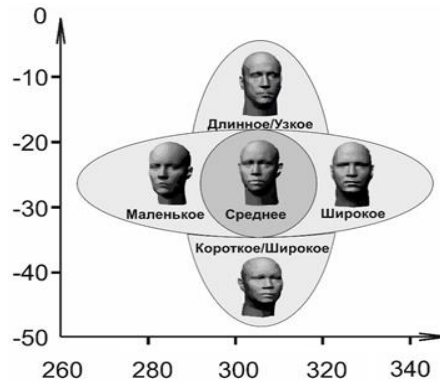


Рисунок 3. Цифрові моделі голови з різними антропометричними параметрами

Крім того описаний підхід потребує удосконалення математичних моделей із розрахунку захисних властивостей фільтрувальних респіраторів саме з урахуванням щільності прилягання їх до обличчя користувача з метою швидкого коригування конструкції півмаски ще на етапі їх виготовлення (рис. 4).

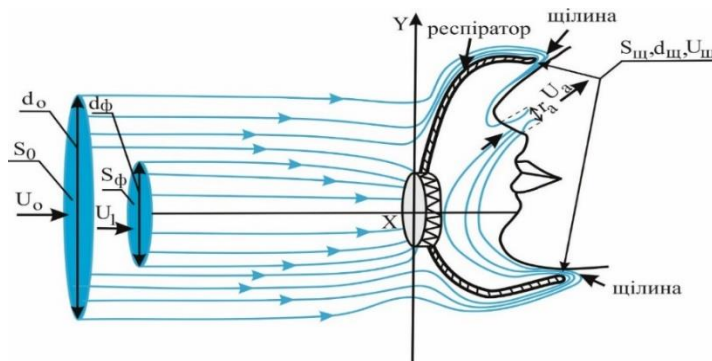


Рисунок 4. Модель руху повітря через еластомірну півмаску

Так, в цьому випадку рух пилового аерозолію біля півмаски представляється двома потоками, один з яких потрапляє до фільтрувальної коробки з фільтром і може бути описаний трьома диференціальними рівняннями у частинних похідних першого порядку з Ейлеровими змінними, які з рівнянням нерозривності потоку дозволяють отримати взаємозв'язок між кінематичними та геометричними параметрами фільтра та щільністю запиленого потоку

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \rho V_r + \frac{\partial \rho}{\partial r} V_r + \frac{\partial V_r}{\partial r} \rho + V_z \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \rho = 0; \\ V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\theta^2}{r} = k_\phi \cdot V_r - \frac{1}{\rho} RT \frac{\partial \rho}{\partial r}; \\ V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} + \frac{V_r V_\theta}{r} = k_\phi \cdot V_\theta; \\ V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = k_\phi \cdot V_z - \frac{1}{\rho} RT \frac{\partial \rho}{\partial z} \end{cases}$$

де V_r , V_θ , V_z – проекції швидкостей за осями координат, м/с; ρ – густина пилового потоку в фільтрувальному елементі, кг/м³; k_ϕ – коефіцієнт проникності, 1/с; R – універсальна газова постійна, Дж/(кг·К); T – температура запиленого потоку, К.

Однак в даному рівнянні не враховується проникнення аерозолію крізь щілини, що потребує пошуку подальших рішень.

4. Висновки

Отже, в перспективі для проектування нових конструкцій фільтрувальних засобів індивідуального захисту чи удосконаленні вже існуючих необхідно виготовлення виробничого обладнання чи технологічної лінії, яка б дозволяла швидко перелаштовувати параметри робочої зони, виходячи із заданого типорозміру півмасок, властивостей фільтра його конструкції, клапанної системи у відповідності до розмірів та характеристик матеріалів і наголів'я з урахуванням способу кріплення, що забезпечує змінний тиск на голову користувача.

Література

1. Shaffer, R.E., & Janssen, L.L. (2015). Selecting models for a respiratory protection program: What can we learn from the scientific literature? *American Journal of Infection Control*, 43(2), 127–132. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2014.10.021>
2. Zhuang, Z., Bergman, M., Lei, Z., Niezgoda, G. & Shaffer, R. (2017). Recommended test methods and pass/fail criteria for a respirator fit capability test of half-mask air-purifying respirators. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 14(6), 473-481. <https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1296233>.
3. Tarfaoui, M., Nachtane, M., Goda, I., Qureshi, Y. & Benyahia, H. (2020) 3D printing to support the shortage in personal protective equipment caused by COVID-19 pandemic. *Materials*, 13(15), 3339. <https://doi.org/10.3390/ma13153339>.
4. Swennen, G.R. J., Pottel, L. & Haers, P.E. (2020) Custom-made 3D-printed face masks in case of pandemic crisis situations with a lack of commercially available FFP2/3 masks. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, (49), 673-677. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2020.03.015>
5. Lowney, C. J., Hsung, T. C., Morris, D. O. & Khambay, B. S. (2018) Quantitative dynamic analysis of the nasolabial complex using 3D motion capture: A normative data set. *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery*, 71(9), 1332-1345. <https://doi.org/10.1016/j.bjps.2018.05.001>.
6. Shaheen, E., Willaert, R., Miclotte, I., Coropciuc, R., Bila, M., & Politis, C. (2020). A novel fully automatic design approach of a 3D printed face specific mask: Proof of concept. *PLOS ONE*, 15(12), e0243388. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0243388>
7. Groce, D., Guffey, S., & Viscusi, D.J. (2010) Three-dimensional facial parameters and principal component scores: Association with respirator fit. *Journal of the International Society for Respiratory Protection*, 27(1), 1-15.
8. Cai, M., Li, H., Shen, S., Wang, Y., & Yang, Q. (2018). Customized design and 3D printing of face seal for an N95 filtering facepiece respirator. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 15(3), 226-234. <https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1411598>

9. Kang, Y., Park, J., & Park, H. (2021). Particle leakage through the exhalation valve on a face mask under flow conditions mimicking human breathing: A critical assessment. *Physics of Fluids*, 33(10), 103326. <https://doi.org/10.1063/5.0067174>
10. Zhang, H., Zhang, J., Hu, Z., Quan, L., Shi, L., Chen, J., ... Luo, J. (2019). Waist-wearable wireless respiration sensor based on triboelectric effect. *Nano Energy*, (59), 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.01.063>
11. Gutierrez, A. M. J. A., Galang, M. D., Seva, R. R., Lu, M. C., & Ty, D. R. S. (2014). Designing an improved respirator for automotive painters. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44(1), 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2013.11.004>
12. Cheberiachko, S., Yavorska, O., Hridiaiev, V., & Yavorskyi, A. (2019). Studying the efficiency of a complex individual protective device. *E3S Web of Conferences*, (123), 01028. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301028>
13. Cheberiachko, S.I., Yavorskyi, A.V., Yavorska, O.O., Tykhonenko, V. V. (2018): Evaluating the risks of occupational respiratory diseases of coal mine workers. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (6), 104-111. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018/13>
14. A.O, D. (2012). Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin–Radushkevich Isotherms Studies of Equilibrium Sorption of Zn 2+ Unto Phosphoric Acid Modified Rice Husk. *IOSR Journal of Applied Chemistry*, 3(1), 38-45. <https://doi.org/10.9790/5736-0313845>