UDC 614.89
DOI:10.36804/nndipbop.37-4.2021.25–34
RESEARCH ARTICLE
OPEN ACCESS

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ РЕСПІРАТОРІВ

С. І. Чеберячко[1], Л. Д. Третякова[2*], Ю. І. Чеберячко[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна
[2]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м Київ, Україна
[*]E-mail для листування: lt79@ukr.net

Отримано: 10 грудня 2021; ***Прийнято:*** 23 грудня 2021

Цитувати як: Чеберячко, С. І., Третякова, Л. Д., Чеберячко Ю. І. (2021). Оптимізація параметрів конструктивних елементів фільтрувальних респіраторів. *Проблеми охорони праці в Україні*, 37(4), 25–34

Мета. Вибір оптимальної довжини вставки у стрічку кріплення наголів'я протипилового фільтрувального респіратора.*Дизайн/методологія /підхід.*Метод планування експерименту застосовано до встановлення інтерполяційних (регресійних) залежностей процесу використання фільтрувального респіратора. У математичній моделі вхідними керованими змінними є довжина вставки стрічки наголів'я та зусилля натягу наголів'я, вихідним параметром – об'єм підсмоктування повітря в підмасковий простір за смугою обтюрації лицьової маски. Встановлено регресійну степеневу залежність між вихідним і двома вхідними параметрами. Функцію відгуку апроксимовано нелінійною математичною моделлю другого порядку. Під час визначення коефіцієнтів при змінних керування застосовано метод найменших квадратів. Визначену регресійну залежність використано в оптимізаційних розрахунках. *Висновки.* Вирішення поставлених завдань дало такі результати: нелінійна математична модель порівняно з лінійною моделлю більш адекватно характеризує процес використання фільтрувального респіратора, відносна похибка не перевищує 0,6 %. На підставі отриманої регресійної моделі сформульовано оптимізаційне завдання, яке містить цільову функцію та додаткові обмеження за захисними та ергономічними вимогами. Цільова функція не має екстремуму в межах встановлених обмежень. Інтервальну оцінку оптимальних значень визначено графічно, як точку перетину графіків зміни довжини, зусиль натягу наголів'я, об'єму підсмоктування за смугою обтюрації та обмежень. Респіратор не перевищує об'єм підсмоктаного повітря на рівні 0,5 %за спокійного режиму роботи придовжині вставки у стрічці наголів'я в інтервалі 2–3,2 см. За таких параметрів зусилля натягу наголів'я не перевищує гігієнічного нормативу 5 Н. *Обмеження/наслідки досліджень.* Адаптований до розробки та визначення оптимальних параметрів метод планування експерименту є універсальним для всіх видів засобів індивідуального захисту. *Практичні наслідки.* Використання активного експерименту за різних конструкцій лицьової маски та комплекту наголів'я дає можливість обґрунтувати вибір матеріалу, площі та довжини вставки у стрічку наголів'я. *Оригінальність/цінність.* Запропонований спосіб визначення оптимальних параметрів засобів індивідуального захисту дає можливість, порівняно з наявними підходами, відійти від евристичних методів проєктування, формалізувати та поєднати аналітичними залежностями основні нормативні, захисні, ергономічні, технологічні вимоги до захисних виробів та їх окремих елементів.

Ключові слова: фільтрувальний респіратор, метод планування експерименту, математична модель, наголів'я.

OPTIMISING THE DESIGN PARAMETERS OF A FILTER RESPIRATOR

S. Cheberyachko[1], L. Tretiakova[2*], Yu. Cheberyachko[1]
[1]National Technical University "Dnipro Polytechnic", Dnipro, Ukraine
[2]National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky", Kyiv, Ukraine
*E-mail for correspondence: lt79@ukr.net

Received: 10 December 2021; ***Accepted:*** 23 December 2021

Cite as: Cheberyachko, S., Tretiakova, L., Cheberyachko, Yu. (2021). Optimization of parameters of constructive elements of filtering respirators. *Labour Protection Problems in Ukraine*, 37 (4), 25–34.

Purpose. The optimum length choice of the headband insert for a dust filter respirator. *Design/methodology/approach.* The method of experimental planning has been applied to determine the interpolation (regression) and optimisation dependencies of the filter respirator process. The dominant variables for the respirator were selected based on experimental studies. Input controlled variables for mathematical model are length of tape insertion and headband tension force, output parameter is volume of contaminated air suction under face mask. A regression power relationship between the variables has been established. The recall function was approximated by a second-order non-linear mathematical model. The method of least squares was applied in determining the coefficients at the control variables. Regression dependencies and additional constraints on protective and ergonomic requirements have been used in the optimisation calculations. *Conclusions.* The solution of the set tasks were the following results: the nonlinear mathematical model more adequately characterizes the respirator use process compared to the linear model of the first order. Relative error between experimental and calculated values of air intake does not exceed 0.6 %. The optimization task is formulated with the regression model. The target function and constraints have been defined with safety and ergonomic requirements. The target function does not have an extremum within the defined constraints. The optimum insertion length was determined graphically and was 2–3.2 cm, the headband tension force does not exceed 5 H With this parameter. *Research limitations/consequences.* The proposed method is universal in determining the optimum parameters for all types of personal protective equipment. *Practical implications*: the choice of respirator design parameters can be made using experimentation-surface fitting. *Originality/value.* The proposed method makes it possible to decline heuristic design methods and establish analytical relationships between the requirements and parameters of individual elements of personal protective equipment.

Key words: filter respirator, the method of experimental planning, mathematical model, headband.

1. Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій

Засоби індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД) як технічний об'єкт є достатньо складною системою, яка формується з певної кількості

ISSN 2664-4304

взаємозв'язаних елементів. Це дає змогу при проєктуванні ЗІЗОД застосувати блочно-ієрархічний підхід, який передбачає розділення складної системи на низку окремих елементів. Конструкції ЗІЗОД мають складники, які формально можна розглядати як окремі елементи: лицьова частина (півмаска, маска); смуга обтюрації, яка забезпечує щільне прилягання до обличчя; фільтри; комплект наголів'я; клапанна система. Ефективність і технічний рівень індивідуальних дихальних пристроїв визначають десятьма групами показників якості відповідно до ДСТУ ГОСТ 12.4.041:2006 [1], які характеризують їх основні властивості. Під час розроблення ЗІЗОД потрібно забезпечити такі вимоги:

– показники призначення, які відповідають вимогам технічного завдання;

– конструкцію та розмірний ряд, які враховують особливості антропометричних розмірів обличчя та голови людини [2];

– формостійкість, ергономічність, надійність маски та комплекту наголів'я впродовж визначеного гарантованого строку використання [3];

– обмеження додаткових ризиків у використанні, зручність зберігання та утилізації [4];

– економічність і технологічна досконалість [5].

На виробництвах за умов високого рівня забруднення повітря пилом та аерозолями зі шкідливими домішками бактерій, важких металів, різноманітних хімічних сполук широке розповсюдження набули разові протипилові фільтрувальні респіратори. Респіратор без фільтра або із вдихальним і видихальним фільтрами накриває ніс, рот і підборіддя користувача. Півмаска щільно прилягає до обличчя, виготовляється з фільтрувальних матеріалів і фіксується за допомогою регульованих елементів наголів'я. Вимоги до такого типу ЗІЗОД визначено в ДСТУ EN 149:2017 [6]. Протипилові фільтрувальні півмаски класифікують відповідно до ефективності фільтрації та максимального загального коефіцієнта підсмоктування забрудненого повітря за смугою обтюрації. Встановлено три класи півмасок з маркуванням FFP1, FFP2, FFP3. Півмаску FFP1 з першим ступенем захисту вибирають за умови, що концентрація шкідливих речовин у повітрі робочої зони не перевищує чотирикратної гранично допустимої концентрації (ГДК). Допускають, що крізь фільтрувальний матеріал може проникати до 20 % шкідливих домішок, а крізь півмаску – до 25 %, оскільки 5 % додаються на підсмоктування за смугою обтюрації. Такі респіратори використовують у загальних виробничих приміщеннях, сільському господарстві, харчовій промисловості. РеспіраториFFP2 з другим ступенем захисту використовують за умови, що концентрація шкідливих речовин у повітрі робочої зони не перевищує 12 ГДК. Водночас тільки 8 % домішок може проходити крізь фільтрувальну маску і відповідно 2 % – за смугу обтюрації. Такі респіратори використовують у машинобудівній, хімічний, будівельній галузях. У півмасках FFP3 із третім ступенем захисту можна працювати за концентрації до 30 ГДК. Такі респіратори захищають від пилу високої концентрації з твердими частками, які містять берил, алюміній, кобальт, радіоактивні частинки. Понад цю концентрацію використання протипилових фільтрувальних півмасок заборонено.

Захисні властивості фільтрувального респіратора великою мірою залежать від захисних властивостей лицьової маски [7]. У конструкціях лицьових масок використовують кілька (до трьох) шарів матеріалів. Перший (зовнішній каркасний) виготовляють з волокон: лавсанових, поліамідних, поліпропіленових або пористого поліуретану, щільністю до 40 г/м^2. Перший і третій захисні шари затримують з повітряного потоку найкрупніші частки пилу, запобігають деформації респіратора, захищаючи основний фільтрувальний шар від механічних ушкоджень. Третій (внутрішній) шар прилягає безпосередньо до обличчя та виготовляється з матеріалів, які не викликають алергію та вбирають вологу (бавовна, байка, атлас). Другий, (фільтрувальний) шар призначено для затримання дрібних твердих чи аерозольних часток. Другий шар виготовляють з фільтрувальних волокнистих матеріалів (поліпропілен, велюр, вовна, двонитка, трикотин, джерсі), залежно від призначення респіратора та ступеня захисту.

Важливим елементом забезпечення високих ізолювальних властивостей є наголів'я, яке відповідає за фіксацію півмаски на голові користувача та рівномірний розподіл зусиль за смугою обтюрації. Нещільне прилягання обтюратора до поверхні обличчя користувача призводить до надмірного підсмоктування забрудненого повітря у підмасковий простір і, як наслідок, є причиною зниження його захисної ефективності [8]. На просочування часток пилу та аерозолів через можливі зазори впливають: робочі положення, рухи тіла та голови, інтенсивність фізичного навантаження. Найчастіше просочування шкідливих речовин у підмасковий простір фільтрувального респіратора фіксують біля носа, щоки та підборіддя, під час розмов, нахилів голови та змінення міміки обличчя [9]. Найбільша кількість зазорів утворюється у разі невідповідності антропометричних параметрів обличчя працівника типорозміру респіратора [10], а також під час роботи зі зсунутою півмаскою. Такі порушення захисних властивостей зазвичай відбуваються під час фізичних навантажень у разі невдалої конструкції наголів'я. Усунути зміщення можна завдяки збільшенню сили притиску півмаски до поверхні обличчя користувача. Проте підвищений внутрішній тиск може призвести до появи больових відчуттів, порушуючи комфортність застосування респіратора. Надійність герметизації є складним завданням, яке потребує постійного пошуку способів удосконалення конструкцій наголів'я. У статті запропоновано спосіб удосконалення конструкції наголів'я завдяки вибору оптимальної довжини додаткової еластичної вставки у стрічку кріплення наголів'я.

Автори статей [11, 12] наголошують, що під час застосування фільтрувальних масок надійний довготривалий захист органів дихання працівника може бути досягнутий тільки у разі щільного прилягання маски внаслідок зменшення просочування забрудненого повітря за смугу обтюрації. Кількість шкідливих речовин, які надходять у підмасковий простір респіратора, залежить від опору фільтрувальних матеріалів і величини зазорів між смугою обтюрації та поверхнею обличчя користувача. Відповідна закономірність вперше теоретично проаналізована у [13]. За висновками автора, величина опору диханню безпосередньо впливає на захисні властивості фільтрувального респіратора, які погіршуються через зростання перепаду тиску на його поверхнях. Цей теоретичний висновок експериментально підтверджено у працях [14, 15], де встановлено, що кількість забрудненого повітря, що просочується, в чотири рази збільшується у разі зміни опору дихання з 56 до 196 Па. Результати досліджень, які наведено у [16], показали, що на просочування забрудненого повітря впливає важкість виконуваної роботи. Вочевидь, під час зростання фізичного навантаження глибина та частота

ISSN 2664-4304

вдихів-видихів збільшується. Так, у стані спокою об'ємна витрата повітря становить до 12 л/хв, а під час виконання робіт підвищеної важкості збільшується у 6–7 разів [17]. Зі збільшенням фізичного навантаження користувача зростає швидкість вдиху-видиху повітряного потоку до 30 вдих/хв, що знижує ефективність процесу фільтрації. Окрім цього, з'являється ймовірність збільшення зазору між смугою обтюрації та поверхнею обличчя через змінення міміки, сповзання та ослаблення зусиль, які притискають лицьову півмаску [18].

Конструкція наголів'я визначає надійність виробу та тривалість використання респіратора [19]. Під час носіння елементи наголів'я найшвидше, порівняно з іншими елементами, пошкоджуються, що вимагає негайної заміни респіратора. Деякі виробники фільтрувальних респіраторів виготовляють наголів'я з гуми або латексу, які за загального регулювання можуть залишати сліди (прим'ятини) на обличчі користувача. Низка виробників для удосконалення конструкції наголів'я пропонують додавати вставки, які мають сприяти: щільнішому утриманню лицьової півмаски на обличчі; змінюванню довжини наголів'я; зменшенню величини механічного натягу стрічки кріплення [20]. Гнучкі вставки з різними властивостями на розтягнення (наприклад, пластик «ABS flex») встановлюють в елемент наголів'я. Довжина таких вставок варіюється від 2 см до 10 см, що впливає на рівномірність розподілу зусиль між смугою обтюрації та поверхнею голови та дає можливість додаткового регулювати величину натягу наголів'я з кожного боку окремо.

Мета роботи – вибір оптимальної довжини вставки у стрічку кріплення наголів'я протипилового фільтрувального респіратора.

Основне завдання для досягнення поставленої мети – встановлення аналітичної залежності між довжиною вставки у наголів'я, зусиллям натягу лицьової півмаски та величиною підсмоктування повітря за смугою обтюрації. Оптимальні значення довжини вставки визначено за умови, що підсмоктування зовнішнього повітря не перевищує 0,5 % від загальної кількості повітря, що вдихається.

Матеріали та методи дослідження

Застосування фільтрувального респіратора є доцільним та ефективним у разі правильного підбору класу, коефіцієнта захисту та розміру лицьової півмаски. Коефіцієнт захисту $K_з$ [21] респіратора визначають за формулою

$$K_з = \frac{Q_0}{Q_п}, \quad (1)$$

де Q_0 – загальна витрата повітря під час дихання; $Q_п$ – об'єм підсмоктування повітря за смугою обтюрації.

Захисні властивості у використанні залежать від конструкції обтюратора та елементів (додаткової вставки) наголів'я (рисунок 1).

Оптимізація довжини вставки у наголів'я передбачає встановлення аналітичних залежностей між домінантними показниками виробу. За результатами експериментальних досліджень здійснено відбір домінантних факторів і визначено керовані змінні: об'єм підсмоктування повітря в підмасковий простір – $Q_П$ (см^3 / хв); довжина вставки у стрічку наголів'я – L (см); зусилля натягу наголів'я – F(Н). Визначення аналітичних залежностей на підставі теорії термодинаміки та аеродинаміки є достатньо складним завданням. У статті завдання вирішено з використанням методів теорії планування експериментів [22]. Метод планування експерименту застосовано до визначення інтерполяційних (регресійних) та оптимізаційних залежностей процесу.

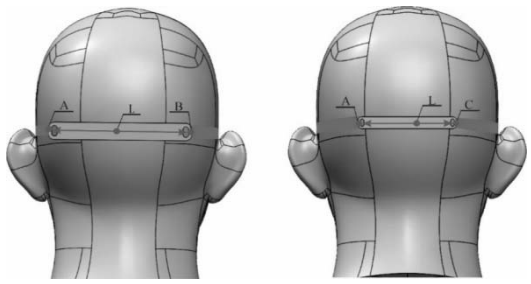

Рисунок 1 – Змінення геометричних параметрів вставки у стрічку наголів'я

Схему об'єкта дослідження (фільтрувальний респіратор) надано у вигляді пасивного триполюсника з визначеними вхідними та вихідними параметрами (рисунок 2).

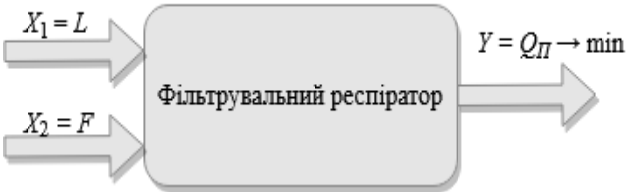

Рисунок 2 – Схема фільтрувального респіратора

Вихідним Y-параметром (функція відгуку) є об'єм підсмоктування повітря за смугою обтюрації, вхідними – X_j-параметри (j = 2): довжина вставки у стрічку наголів'я та зусилля натягу півмаски, вектор якого перпендикулярний вектору розтягування стрічок наголів'я. Модель побудована за наявності таких припущень:

– вхідні параметри мають два ступеня свободи;

– вхідні параметри є незалежним, взаємні кореляційні зв'язки відсутні;

– вхідні та вихідні параметри можна експериментально виміряти прямим або непрямим способом.

Результати досліджень

Завдання полягає у встановленні аналітичної залежності (степеневого поліному) між параметрами процесу, граничними та початковими умовами під час дослідження формалізованої моделі. Метод планування експерименту передбачає цілеспрямовану зміну значень вхідних параметрів при одночасному експериментальному визначенні вихідного параметру:

– вхідні параметри змінюються на двох чи трьох рівнях у діапазоні середнього значення, верхньої та нижньої межі інтервалу регулювання (варіювання). Кодові позначення такі: $X_{ср}$ ↔(0); X_{max}↔(+1); X_{min} ↔(-1) (таблиця 1);

– кроки варіювання вхідних параметрів є цілочисловими значеннями, змінення яких охоплює весь діапазон параметрів.

Під час планування експерименту в кожному досліді функції вхідних параметрів задано різними комбінаціями. Відомо [23], що кількість експериментів для моделі першого порядку дорівнює 2^2, для моделі другого порядку – 3^2.

ISSN 2664-4304

Таблиця 1 – План факторного експерименту

Параметри	Кодовані значення	Довжина вставки, X_1, см	Зусилля натягу наголів'я, X_2, Н
Рівні параметрів			
X_{min}	-1	4	3
X_{cp}	0	6	5
X_{max}	+1	8	7
Крок варіювання	1	2	2

У разі визначення абсолютних значень показників за детермінованими моделями можна отримати певну похибку, межі якої потрібно перевірити порівнянням із результатами експериментів. За такої процедури результати математичного моделювання доповнюють фізичним. Для вирішення поставленого завдання під час натурних випробувань фільтрувального респіратора визначено вихідний Y-параметр. Експериментальні дослідження здійснено на спеціальній лабораторній установці з манекенами (рисунок 3), за методами, наведеними у стандарті [24].

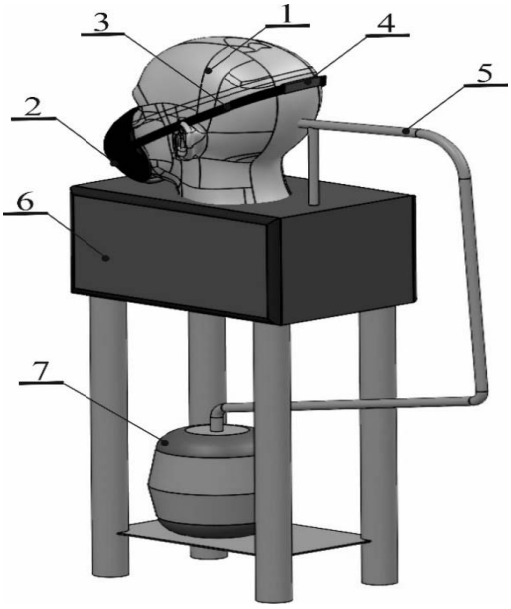

Рисунок 3 – Зовнішній вид експериментальної установки для визначення об'єму підсмоктування зовнішнього повітря: 1 – манекен голови; 2 – респіратор; 3 – наголів'я; 4 – вставки елемента у наголів'я; 5 – повітроводи; 6 – пульт управління стендом; 7 – поршневий насос

Перевірку захисних властивостей здійснено щодо протипилового фільтрувального респіратора марки «Стандарт» з різною довжиною вставки у наголів'я. Об'єм підсмоктаного повітря за смугою обтюрації та обличчям розраховано за формулою:

$$Q_n = f_l\,(\Delta P_1 - \Delta P_2)\,, \qquad (2)$$

де f_l – постійна, яка залежить від гнучких властивостей вставки, $f_l = 5{\cdot}10^{-4}$; ΔP_1 – перепад тиску між зовнішнім середовищем і підмасковим простором за смугою обтюрації, поверхню якої оброблено силіконом, Па; ΔP_2 – перепад тиску на поверхні респіратора.

Вимірювання перепаду тиску на респіраторі, який знаходився на голові та обличчі манекену, здійснено електронним диференційним мікромановакуметром Testo 512 (виробник Testo AG, Німеччина). Діапазон виміру (0–200) Па, час реакції – 0,2 с, дискретність – 0,1 Па. Повітря надходить із поршневого насосу з параметрами: витрата повітря – 2,5 дм^3/ цикл; черговість – 12 циклів/хв. Аналоговий пружинний універсальний динамометр Digital NK-50 використано для вимірювання зусилля натягу наголів'я (рисунок 4).

Рисунок 4 – Зовнішній вигляд лабораторної установки

Відповідно до плану експерименту здійснено виміри об'єму підсмоктування повітря (табл. 2, 3).

За результатами експериментальних дослідів можна визначити математичні моделі процесу. Рішення функції відгуку Y шукаємо у вигляді:

$$Y = f(X_1, X_2, b_0, b_1, b_2, b_3). \qquad (3)$$

Коефіцієнти b_i у (2) математичних моделях першого та другого порядків визначено методом найменших квадратів [22].

У статті розглянуто дві постановки задачі:

1.Функцію відгуку апроксимовано лінійною математичною моделлю першого порядку.

2.Функцію відгуку апроксимовано нелінійною математичною моделлю другого порядку.

Таблица 2 – План повного двофакторного експерименту для моделі першого порядку

Номер експерименту	Умови експерименту в кодованих значеннях		Умови експерименту в натуральних значеннях		Результати експерименту
	X_1	X_2	X_1	X_2	Y
1	+1	+1	8	7	38,4
2	-1	+1	4	7	31,5
3	+1	-1	8	3	110,9
4	-1	-1	4	3	95,3

ISSN 2664-4304

Таблица 3 – План трифакторного експерименту для нелінійної моделі другого порядку

Номер експерименту	Умови експерименту в кодованих значеннях		Умови експерименту в натуральних значеннях		Результати експерименту
	X_1	X_2	X_1	X_2	Y
1	-1	+1	4	7	31,5
2	0	+1	6	7	35,2
3	+1	+1	8	7	38,4
4	-1	0	4	5	64,7
5	0	0	6	5	69,1
6	+1	0	8	5	72,4
7	-1	-1	4	3	95,3
8	0	-1	6	3	101,6
9	+1	-1	8	3	110,9

Модель першого порядку двофакторного експерименту

Рівняння функції відгуку будемо шукати у вигляді лінійної функції двох змінних

$$Y = b_0X_0 + b_1X_1 + b_2X_2 \,. \qquad (4)$$

У такій моделі кількість експериментів становить 4, кількість вхідних параметрів – 2, кількість невідомих коефіцієнтів – 3.

Загальний вид системи рівнянь для визначення невідомих коефіцієнтів математичної моделі:

$$b_0\sum_{i=1}^{n} X_0Y_{ji} + b_1\sum_{i=1}^{n} X_{1i}Y_{ji} + b_2\sum_{i=1}^{n} X_{2i}Y_{ji} = \sum_{i=1}^{n} X_{ij}Y_i\,;$$

$$j = 0,1,2; i = 4, \qquad (5)$$

де X_{ji} – значення j-го фактору в i-му досліді; Y_{ji} – значення j-го відгуку в i-му досліді; Y_i – значення відгуку в i-му досліді; X_0– умовний фактор$X_0 = 1$.

Накопичування сум, які входять до системи рівнянь, наведено у таблиці 4.

Таблиця 4 – Результати експериментів

Номер експерименту i	X_1	X_1^2	X_2	X_2^2	X_1X_2	Y	YX_1	YX_2
1	8	64	7	49	56	38,4	307,2	268,8
2	4	16	7	49	28	31,5	126,0	220,5
3	4	16	3	9	12	95,3	381,2	285,9
4	8	64	3	9	24	110,9	887,2	332,7
Сума	24	160	20	116	120	276,1	1701,6	1107,9

З урахуванням отриманих значень сум кожного параметру система рівнянь набуває вигляду

$$\begin{aligned} 4b_0 + 24b_1 + 20b_2 &= 276{,}1 \\ 24b_0 + 160b_1 + 120b_2 &= 1701{,}6 \\ 20b_0 + 120b_1 + 116b_2 &= 1107{,}6\,. \end{aligned} \qquad (6)$$

Розв'язок цієї системи такий:

$$b_0 = 137{,}4;$$
$$b_1 = 2{,}8;$$
$$b_2 = -17{,}1.$$

Рівняння функції відгуку$Y_р$ за результатами експерименту набуває вигляду

$$Y_р = Q_p = 137{,}4 + 2{,}8L - 17{,}1F, \qquad (7)$$

де $Q_р$ – розрахункове значення об'єму повітря, яке підсмоктується.

Відносне відхилення розрахункового значення від експериментального визначено за формулою:

$$\varepsilon = \frac{Q_{вим} - Q_р}{Q_{вим}} \cdot 100\%\,, \qquad (8)$$

де $Q_{вим}$ – виміряне значення об'єму підсмоктування повітря. Результати зіставлення розрахункових значень за формулою (6) з експериментальними, наведено у таблиці 5.

Таблиця 5 – Результати зіставлення розрахункових та експериментальних даних

	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$
$Q_{вим}$, см^3/хв	38,4	31,5	95,3	110,9
$Q_р$, см^3/хв	40,8	29,0	99,5	105,5
ε	7,6	8,5	5,8	5,3

Як випливає з таблиці 5, лінійна модель погано апроксимує результати експерименту, відносне відхилення перевищує 8 %.

Математична модель другого порядку трифакторного експерименту

Математичну модель другого порядку представимо у вигляді

$$Y_i = b_0X_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3(X_1 \cdot X_2). \qquad (9)$$

Упровадження додаткового множника у вигляді добутку двох вхідних параметрів робить модель нелінійною, що підвищує її точність. У такій моделі кількість експериментів (мінімальне, середнє і максимальне значення) становить $i = 9$, кількість вхідних параметрів – $j = 2$, кількість невідомих коефіцієнтів – $b = 4$.

Систему з чотирьох рівнянь, яка складена відповідно до (5), записуємо зі значеннями, які визначено у таблиці 6.

ISSN 2664-4304

Таблиця 6 – Результати експериментів

i	X_1	X_1^2	X_2	X_2^2	X_1X_2	Y	YX_1	YX_2	X_3
1	4	16	7	49	28	31,50	126	220,5	28
2	6	36	7	49	42	35,20	211,2	246,4	42
3	8	64	7	49	56	38,40	307,2	268,8	56
4	4	16	5	25	20	64,70	258,8	323,5	20
5	6	36	5	25	30	69,10	414,6	345,5	30
6	8	64	5	25	40	72,40	579,2	362	40
7	4	16	3	9	12	95,30	381,2	285,9	12
8	6	36	3	9	18	101,60	609,6	304,8	18
9	8	64	3	9	24	110,90	887,2	332,7	24
	54	348	45	249	270	619,10	3775	2690,1	270

З урахуванням отриманих значень сум кожного параметру система з чотирьох рівнянь набуває вигляду

$$9b_0 + 54b_1 + 45b_2 + 270b_3 = 423{,}7$$

$$54b_0 + 348b_1 + 270b_2 + 1740b_3 = 2631$$

$$45b_0 + 270b_1 + 249b_2 + 1494b_3 = 2071{,}5$$

$$270b_0 + 1740b_1 + 1494b_2 + 9628b_3 = 12829{,}4\ , \quad (10)$$

а розв'язок цієї системи:

$$b_0 = 121{,}83; \quad b_1 = 5{,}24;$$
$$b_2 = -13{,}63; \quad b_3 = -0{,}54.$$

Рівняння функції відгуку$Y_р$ за результатами проведення другого експерименту набуває вигдяду

$$Y_p = Q_p = 121{,}83 + 5{,}24L - 13{,}63F - 0{,}54(L \cdot F)\ . \quad (11)$$

Результати зіставлення розрахункових значень за формулою (10) з експериментальними наведено у таблиці 7.

Таблиця 7 – Результати зіставлення розрахункових та експериментальних даних

Параметр	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$	$i = 6$	$i = 7$	$i = 8$	$i = 9$
$Q_{вим}$, см^3/хв	31,5	35,2	38,4	64,7	69,1	72,4	95,3	101,6	110,9
$Q_р$, см^3/хв	31,3	35,0	38,2	64,4	68,8	72,0	95,2	101,2	110,7
ε	0,6	0,6	0,5	0,4	0,5	0,5	0,1	0,4	0,2

Як випливає з таблиці 7, відносне відхилення не перевищує 0,6 %. Тобто нелінійна модель, яка враховує додатковий складник ($L{\cdot}F$), суттєво підвищує точність математичної моделі. Це дає підстави зробити висновок, що запропонована математична модель адекватно описує реальний фізичний процес.

Більшість завдань, які необхідно вирішити під час створення ЗІЗОД, можна привести до вибору найкращого у тому чи іншому сенсі варіанту. Визначення оптимальних параметрів конструкції наголів'я сформульовано як оптимізаційне. За параметр оптимізації прийнято довжину вставки. За результатами експериментів отримано аналітичну залежність (11), яку розглядаємо як цільову функцію з керованими змінними *L, F*:

$$Q_p = 121{,}83 + 5{,}24L - 13{,}63F - 0{,}54(L \cdot F) \to min\ . \quad (12)$$

Обмеження встановлено за рівнем зусилля натягу наголів'я, об'ємом підсмоктування повітря та вартістю вставки

$$4{,}5H \geq F \geq 5{,}3H; \qquad Q \leq 70\frac{\text{см}^3}{\text{хв}}. \quad (13)$$

Цільова функція не має екстремуму в межах встановлених обмежень. Діапазон оптимальних значень визначено графічно як точки перетину графіків змінення довжини за певних зусиль натягу наголів'я та граничного значення об'єму підсмоктування за смугою обтюрації (рисунок 5).

Як випливає з рисунку 5, інтервальна оцінка оптимальної довжини вставки, яка не перевищує встановлені обмеження, дорівнює 2,0 <*L*< 3,2 см.

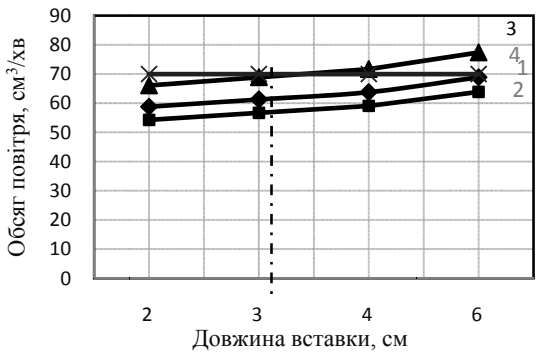

Рисунок 5 – Залежності змінення об'єму підсмоктування повітря від довжини вставки:
1 – граничне значення; 2 – *F* = 5,3 *H*;*3* – *F* = 5,0 *H;*
4 – *F* = 4,5 *H*

Обговорення результатів дослідження

ЗІЗОД відповідно до вимог [25] віднесено до третьої категорії складності, для якої потрібна оцінка відповідності. Процедура передбачає виконання внутрішнього контролю виробництва та контрольних перевірок засобів упродовж усього терміну використання та зберігання. Дослідне носіння та експериментальна перевірка захисних засобів займає досить багато часу і є дорогим [26]. Виконання таких етапів є тривалим, вимагає високої фахової підготовки дослідників. Особливість проєктування ЗІЗОД полягає у зміні багатьох вхідних параметрів, які мають імовірнісний характер: антропометричні характеристики обличчя людини; мінливість шкідливих домішок у повітряному середовищі, їх концентрація; зміни у фізіологічному та психологічному станах людини. Існує певна кількість

ISSN 2664-4304

публікацій, де докладно досліджено процес розроблення або удосконалення респіраторів [27]. Альтернативні методи проєктування зазвичай базуються на евристичних методах, які спираються переважно на фахові знання проектувальника або на пропозиції щодо використання автоматизованих систем проєктної розробки. Однак процес проєктування ЗІЗОД не достатньо формалізовано, використання формальних математичних моделей без одночасної експериментальної перевірки може призводити до помилок і втрати часу на їх виправлення. У статті запропоновано спосіб скорочення такого процесу без втрати якості захисного виробу.

Наголів'я – це невід'ємна складова фільтрувального респіратора, конструкція якого суттєво впливає на загальний коефіцієнт захисту виробу. Основна вимога до конструкції наголів'я – забезпечення щільного прилягання півмаски за рівномірного розподілу тиску на шкіру обличчя користувача та на шкірні покриви потиличної та верхньої частини голови. Отримане рішення дає можливість визначити оптимальну довжину вставки у стрічку наголів'я з дотриманням захисних та ергономічних вимог для такого виду засобу індивідуального захисту. Рішення (11) отримано на підставі теорії планування експериментів. У запропонованому підході теоретичні розрахунки доповнено експериментальними даними, які легко можна відтворити в лабораторних умовах. В оптимізаційній задачі, яка розглянута, цільова функція (12) не має екстремуму за визначених обмежень (13), отримане рішення має інтервальну оцінку. Таку ваду можна усунути, якщо встановити додаткові початкові параметри (площа стрічок наголів'я, вартість матеріалів, наявність вдихального фільтру тощо) та додаткові обмеження до півмаски.

Упровадження запропонованого теоретичного методу дає можливість подальшого удосконалення окремих елементів респіратора. Наприклад, виникла потреба у заміні матеріалу наголів'я до певного типу ЗІЗОД (фільтрувального респіратора, респіратора з фільтром, протигазу). Це спричинить пошук найкращого варіанту. Застосування методів планування експерименту дасть можливість обґрунтувати вибір певного матеріалу, площу наголів'я, довжину вставки у стрічку. Перевагою запропонованого підходу є врахування зусилля натягу наголів'я, яке є важливішою ергономічною вимогою до ЗІЗОД. Саме підвищений або низький рівень зусилля натягу є однією з причин невикористання фільтрувальних респіраторів на виробництві [28]. Використання величини зусилля натягу як початкового параметру під час проєктування дає можливість визначити такі основні характеристики матеріалів до наголів'я як: ширину, довжину, розривне навантаження та відносне подовження під час розривання. Під час експериментальних випробуваннях на манекені за заданих обмежень (коефіцієнт захисту, зусилля натягу, способи та місця з'єднання елементів), можна визначити площу стрічок наголів'я. Можливо рішення і оберненої задачі: за відомих розмірів стрічок та зусилля натягу, визначити фізико-механічні характеристики матеріалів: розривне навантаження та відносне подовження під час розривання.

Висновки

Конструкція протипилового фільтрувального респіратора, відповідно до стандартів, повинна забезпечувати формостійкість виробу, встановлений коефіцієнт захисту та обмежений об'єм підсмоктування забрудненого повітря за смугою обтюрації. Запропоновано вирішити поставлені завдання на підставі методів теорії планування експерименту.

За результатами експериментальних досліджень здійснено відбір домінантних чинників і визначено керовані змінні математичної моделі: вхідні параметри – довжина вставки стрічки наголів'я, зусилля натягу наголів'я; вихідний параметр – об'єм підсмоктування повітря у підмасковий простір. Розроблено двофакторну модель і плани двофакторного та трифакторного експерименту, в результаті реалізації яких експериментально визначено об'єм підсмоктування повітря. Функцію відгуку процесу адекватно апроксимовано нелінійною математичною моделлю другого порядку (11), коефіцієнти якої визначено за методом найменших квадратів. Відносна похибка між дослідними та розрахунковими значеннями об'ємів підсмоктування повітря не перевищує 0,6 %. На підставі отриманої регресійної моделі сформульовано оптимізаційне завдання, яке містить цільову функцію та перелік обмежень. Отримана цільова функція не має екстремуму в межах встановлених обмежень. Інтервальна оцінка оптимальних значень визначена графічно, як перетин графіків змінення довжини, зусиль натягу наголів'я та об'єму підсмоктування за смугою обтюрації. Фільтрувальний респіратор марки «Стандарт» не перевищує встановлений стандартом об'єм підсмоктування повітря під час спокійного режиму роботи на рівні (0,5–0,6) %за довжини вставки у стрічці наголів'я в інтервалі (2–3,2) см. За таких параметрів зусилля натягу наголів'я не перевищує гігієнічного нормативу 5,3 Н.

Подяка авторів

Авторський колектив висловлює подяку адміністрації підприємства ТОВ «НВП «ІКАР» за допомогу у перевірці результатів моделювання. Автори висловлюють щиру подяку за поради під час підготовки цієї роботи професору В. І. Голінько

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфліктів інтересів через публікацію цієї статті.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ ГОСТ 12.4.041:2006 Засоби індивідуального захисту органів дихання фільтрувальні. Загальні технічні вимоги (ГОСТ 12.4.041:2001, IDT). [Чинний від 2007.07.01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 181 с.URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=30151.

2. CaiM., LiH., ShenS., WangYu. Customized design and 3D printing of face seal for an N95 Filtering Facepiece Respirator.*Journal of Occupational and Environmental Hygiene.* 2017. 15(3). 226–234. doi: 10.1080/15459624.2017.1411598.

3. Голінько В.І., Третякова Л.Д., Чеберячко С.І. Проектування засобів індивідуального захисту працюючих: навч. посіб. Дніпро: Державний ВНЗ «НГУ», 2017. 181. URL: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41917

4. Третякова Л.Д., Остапенко Н.В. Оцінка додаткового ризику у використанні захисного одягу. *Проблеми охорони праці в Україні*: зб. наук. праць. Київ: ДУ «ННДІПБОП», 2016. Вип. 32. 57–67. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/42196/1/Ryzyky-u-vykorystanni-zakhysnoho-odiahu.pdf

5. Остапенко Н.В., Луцкер Т.В., Колосніченко О.В., Третякова Л.Д. Розробка елементів спеціального захисного одягу на основі принципів трансформації. *Теорія та практика дизайну*: зб. наук. пр. Київ: Дія, 2015. Вип. 8: Технічна естетика. 204–216.URL:https://knutd.edu.ua/publications/pdf/Ukrainian_editions/2015/Ostapenko_Lutsker_Kolosnichenko_Tretyakova27112015

6. ДСТУ EN 149:2017 Засоби індивідуального захисту органів дихання. Фільтрувальні півмаски для захисту від аерозолів. Вимоги, випробування, маркування (EN 149:2001+A1:2009, IDT). [Чинний від 2018.02.01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2017. 18 с. URL:http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=75012.

7. Капцов В.А., Чиркин А.В. Об эффективности средств индивидуальной защиты органов дыхания как средства профилактики заболеваний (обзор). *Токсикологический вестник*. 2018;2:2–6. https://doi.org/10.36946/0869-7922-2018-2-2-6.

8. Чеберячко С.І, Чеберячко Ю.І, Шайхлісламова І.А. Проєктування півмасок фільтрувальних респіраторів. *Наука та інновації*. 2020. 16(5). 97–109.URL: 10.15407/scin16.05.097.

9. Yumiao C., Jianping W., Zhongliang Y. The human factors/ergonomics studies for respirators: a review and future work. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2015. 27(5). 652–676.76. doi:10.1108/IJCST-06-2014-0077.

10. Чеберячко С.І., Радчук Д.І., Чеберячко Ю.І. Методика підбору випробувачів для дослідження фільтрувальних респіраторів. *Метрологія та прилади.* 2016. 2. 36–40.URL: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/mettpr_2016_2_2.pdf.

11. Lei Z., Yang J.J., Zhuang Z. Headform and N95 filtering facepiece respirator interaction: contact pressure simulation and validation. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2012. 9. 46–58.doi: 10.1080/15459624.2011.635130.

12. Tcharkhtchi A, AbbasnezhadN, SeydaniM.Z. An overview of filtration efficiency through the masks: Mechanisms of the aerosols penetration. *Bioactive Materials, KeAi Publishing.* 2021. 6 (1).106–122. URL: ff10.1016/j.bioactmat.2020.08.002ff. ffhal-02937492f/

13. LeiZ., YangJ., ZhuangZ. A novel algorithm fordetermining contact area between a respirator and aheadform. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2014. 11(4). 227–237. doi: 10.1080/15459624.2013.858818.

14. Janssen L., Zhuang Z., Shaffer R. Criteria for the Collection of Useful RespiratorPerformance Data in the Workplace**.** *JournalOccup Environ Hyg.* 2014; 11(4): 218–226.doi: 10.1080/15459624.2013.852282.

15. Shevchenko V.G. Research on the influence of miners' energy expenditure on coal mining efficiency. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2017, 3, 140–146.URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2017_3_24

16. Zatsarnyi V., Tretiakova L. Protection against falls, stroke's and other mechanical injuries. *East European science journal*. 2018, 10(38), part 2. 36–41.URL: https://eesa-journal. com/arxiv-zhurnala

17. Gutierrez A.M.J.A., Galang M.D., Seva R.R., Lu M.C., Rose D., Ty S. Designing animproved respirator for automotive painters. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2014, 44(1), 131–139. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2013.11.004

18. Третякова Л.Д. Метод оцінки надійності складних засобів захисту.*Інформаційний бюлетень з охорони праці*. 2010.3 (57). 29–31.

19. Bergman M., Zhuang Z., Brochu E., Palmiero A. Fit Assessment of N95 Filtering-Facepiece Respirators in the U.S. Centers for Disease Control and Prevention Strategic National Stockpile. *Journal of the International Society for Respiratory Protection 2015. 32 (2)*Vol. 32, No. 2, 2015.50–62. URL: https://www.isrp.com/the-isrp-journal/journal-public-abstracts

20. Стрілець В.М. Особенности выбора средств индивидуальной защиты для работы спасателей в условиях, которые существенно отличаются от наихудших условий пожара. *Системи озброєння і військова техніка*. 2014. 4(40),150–153. URL:http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/author/2450

21. Holinko V., Cheberiachko S., Symanovych H., Kicki J. Designing the half-masks of filter respirators for workers of mining enterprises. 2019.E3S Web of Conferences 123(120):01001.doi:10.1051/e3sconf/201912301001

22. Грищук Ю.С. Основи наукових досліджень: нав. посіб. Харків, Видавничий центр НТУ «ХПІ», 2008. 242 с. URL: http://web.kpi.kharkov.ua/ea/wp-content/uploads/sites/25/2017/02/OND-Ukr.pdf

23. Юрченко А.А., Євстратенко Л.І., Столбченко О.В. Применение методов планирования промышленных экспериментов для решения задач управления проветриванием шахт. *Геотехнічна механіка:* сб. наук. праць. Дніпропетровськ: ІГТМ НАН України, 2015. Вип. 120. 214–224.URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/gtm_2015_120_22

24. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Півмаски і чвертьмаски: Вимоги, випробування, маркування. ДСТУ 140: 2004. [Чинний від 2007.06.01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2004. 25с. URL:http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=68406

25. Третякова Л.Д., Каштанов С.Ф. Особливості функціонування та застосування сучасного європейського та національного законодавств з безпеки засобів індивідуального захисту. *Інформаційний бюлетень з охорони праці.* 2018. 3. 12–18.

26. Cheberyachko S., Cheberyachko Y., Naumov M., Deryugin O. Development of an algorithm for effective design of respirator half-masks and encapsulated particle filters. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 2021. doi: 10.1080/10803548.2020.1869429

27. Cheberyachko S., Tretiakova L., Kolosnichenko M., Ostapenko N.Designing filtering half-masks.*Fibres and Textiles Vlákna a textil.* 2020. 27(3). 82–89. URL:http://vat.ft.tul.cz/Archive/VaT_2020_3.html

28. Чеберячко С.І., Яворська О.О. Аналіз сучасних вимог до фільтрувальних засобів індивідуального захисту органів дихання. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2018. 53. 296–308. URL: http://znp.nmu.org.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnalu

REFERENCES

1. DSTU HOST 12.4.041:2006 Zasoby indyvidualnoho zakhystu orhaniv dykhannia filtruvalni. Zahalni tekhnichni vymohy (HOST 12.4.041:2001, IDT). [Chynnyi vid 2007.07.01]. Vyd. ofits. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2006. 181 s. URL:http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=30151.

2. Cai M., Li H., Shen S., Wang Yu. Customized design and 3D printing of face seal for an N95 Filtering Facepiece Respirator.*Journal of Occupational and Environmental Hygiene.* 2017. 15(3). 226–234. doi: 10.1080/15459624.2017.1411598.

3. HolinkoV.I., TretiakovaL.D., CheberiachkoS.I. Proektuvanniazasobivindyvidualnohozakhystupratsiuiuchykh: navch. posib. Dnepro: DerzhavnyiVNZ «NHU», 2017. 181 s. URL: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41917:

4. Tretiakova L.D., Ostapenko N.V. Otsinka dodatkovoho ryzyku u vykorystanni zakhysnoho odiahu. Problemy okhorony pratsi v Ukraini: zb. nauk. prats. Kyiv: DU „NNDIPBOP", 2016. 32. 57–67. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/42196/1/Ryzyky-u-vykorystanni-zakhysnoho-odiahu.pdf

5. Ostapenko N.V., Lutsker T.V., Kolosnichenko O.V., Tretiakova L.D. Rozrobka elementiv spetsialnoho zakhysnoho odiahu na osnovi pryntsypiv transformatsii. Teoriia ta praktyka dyzainu: zb. nauk. pr. Kyiv: Diia, 2015. Vyp. 8: Tekhnichna estetyka. 204–216. URL: https://knutd.edu.ua/publications/pdf/Ukrainian_editions/2015/Ostapenko_Lutsker_Kolosnichenko_Tretyakova27112015

6. DSTU EN 149:2017 Zasoby indyvidualnoho zakhystu orhaniv dykhannia. Filtruvalni pivmasky dlia zakhystu vid aerozoliv. Vymohy, vyprobuvannia, markuvannia (EN 149:2001+A1:2009, IDT). [Chynnyi vid 2018.02.01]. Vyd. ofits. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2017. 18 s. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=75012.

7. Kaptsov V.A., Chyrkyn A.V. Ob effektyvnosty sredstv indyvydualnoi zashchyty orhanov dykhanyia kak sredstva profylaktyky zabolevanyi (obzor). Toksykolohycheskyi vestnyk. 2018; 2: S. 2-6. https://doi.org/10.36946/0869-7922-2018-2-2-6.

8. Cheberiachko S.I, Cheberiachko Yu.I, Shaikhlislamova I.A. Proiektuvannia pivmasok filtruvalnykh respiratoriv. Nauka ta innovatsii. 2020. 16(5). 97–109. URL:10.15407/scin16.05.097.

9. Yumiao C., Jianping W., Zhongliang Y. The human factors/ergonomics studies for respirators: a review and future work. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2015. 27(5). 652–676.76. doi:10.1108/IJCST-06-2014-0077.

10. Cheberiachko S.I., Radchuk D.I., Cheberiachko Yu.I. Metodyka pidboru vyprobuvachiv dlia doslidzhennia filtruvalnykh respiratoriv. Metrolohiia ta prylady. 2016. 2. 36–40. URL:http://nbuv.gov.ua/j-pdf/mettpr_2016_2_2.pdf.

11. Lei Z., Yang J.J., Zhuang Z. Headform and N95 filtering facepiece respirator interaction: contact pressure simulation and validation. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2012. 9. 46–58.doi: 10.1080/15459624.2011.635130.

12. Tcharkhtchi A, AbbasnezhadN, SeydaniM.Z. An overview of filtration efficiency through the masks: Mechanisms of the aerosols penetration. *Bioactive Materials, KeAi Publishing.* 2021. 6 (1). 106–122. URL: ff10.1016/j.bioactmat.2020.08.002ff. ffhal-02937492f/

13. LeiZ., YangJ., ZhuangZ. A novel algorithm fordetermining contact area between a respirator and aheadform. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2014. 11(4). 227–237. doi: 10.1080/15459624.2013.858818.

14. Janssen L., Zhuang Z., Shaffer R. Criteria for the Collection of Useful RespiratorPerformance Data in the Workplace**.** *JournalOccup Environ Hyg.* 2014; 11(4): 218–226. doi: 10.1080/15459624.2013.852282.

15. Shevchenko V.G. Research on the influence of miners' energy expenditure on coal mining efficiency. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2017, 3, 140–146. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2017_3_24

16. Zatsarnyi V., Tretiakova L. Protection against falls, stroke's and other mechanical injuries. *East European science journal*. 2018, 10(38), part 2. 36–41. URL: https://eesa-journal. com/arxiv-zhurnala

17. Gutierrez A.M.J.A., Galang M.D., Seva R.R.,Lu M.C., Rose D., Ty S. Designing animproved respirator for automotive painters. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2014, 44(1), 131–139. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2013.11.004

18. Tretiakova L.D. Metodody ocinky nadiinosti skladnykh zasobiv zakhystu*. Informatsiinyi biuleten z okhorony pratsi*. 2010. 3 (57). 29–31.

19. Bergman M., Zhuang Z., Brochu E., Palmiero A. Fit Assessment of N95 Filtering-Facepiece Respirators in the U.S. Centers for Disease Control and Prevention Strategic National Stockpile. *Journal of the International Society for Respiratory Protection 2015. 32 (2)* Vol. 32, No. 2, 2015.50–62. URL:https://www.isrp.com/the-isrp-journal/journal-public-abstracts.

20. Strilets V.M. Osobennosty vybora sredstv indyovyodualnoi zashchyty dlia raboty spasatelei v uslovyiakh, kotorye sushchestvenno otlychaiutsia ot naykhudshykh uslovyi pozhara*. Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika.* 2014. 4(40), 150–153. URL:http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/author/2450

21. Holinko V., Cheberiachko S., Symanovych H., Kicki J. Designing the half-masks of filter respirators for workers of mining enterprises. 2019.E3S Web of Conferences 123(120):01001. doi: 10.1051/e3sconf/201912301001

22. Hryshchuk Yu.S. Osnovy naukovykh doslidzhen: nav. posib. Kharkiv, Vydavnychyi tsentr NTU «KhPI», 2008. 242 s. URL: http://web.kpi.kharkov.ua/ea/wp-content/uploads/sites/25/2017/02/OND-Ukr.pdf

23. Iurchenko A.A., Yevstratenko L.I., Stolbchenko O.V. Prymenenye metodov planyrovanyia promyshlennykh eksperymentov dlia reshenyia zadach upravlenyia provetryvanyem shakht*. Heotekhnichna mekhanika*: sb. nauk. prats. Dnipropetrovsk: IHTM NAN Ukrainy, 2015. 120. 214–224. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/gtm_2015_120_22

24. DSTU 140: 2004.Zasoby indyvidualnoho zakhystu orhaniv dykhannia. Pivmasky i chvertmasky: Vymohy, vyprobuvannia, markuvannia. [Chynnyi vid 2007.06.01]. Vyd. ofits. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2004. 25 s. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=68406

25. Tretiakova L.D., Kashtanov S.F. Osoblyvosti funktsionuvannia ta zastosuvannia suchasnoho yevropeiskoho ta natsionalnoho zakonodavstv z bezpeky zasobiv indyvidualnoho zakhystu. *Informatsiinyi biuleten z okhorony pratsi*. 2018. 3. 12–18.

26. Cheberyachko S., Cheberyachko Y., Naumov M., Deryugin O. Development of an algorithm for effective design of respirator half-masks and encapsulated particle filters. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 2021. doi: 10.1080/10803548.2020.1869429

27. Cheberyachko S., Tretiakova L., Kolosnichenko M., Ostapenko N.Designing filtering half-masks. *Fibres and Textiles Vlákna a textil.* 2020. 27(3). 82–89. URL: http://vat.ft.tul.cz/Archive/VaT_2020_3.html.

28. Cheberiachko S.I., Yavorska O.O. Analiz suchasnykh vymoh do filtruvalnykh zasobiv indyvidualnoho zakhystu orhaniv dykhannia. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. 2018. 53. 296–308. URL: http://znp.nmu.org.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnalu.

С. И. Чеберячко, Л. Д. Третьякова, Ю. И. Чеберячко

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ РЕСПИРАТОРОВ

Цель. Выбор оптимальной длины вставки в ленту крепления наголовья противопылевого фильтровального респиратора. Дизайн/методология /подход. Метод планирования эксперимента применен к установлению интерполяционных (регрессионных) зависимостей процесса использования фильтровального респиратора. В математической модели входными

ISSN 2664-4304

управляемыми переменными являются длина вставки ленты наголовья и усилия натяга наголовья, выходным параметром – объем подсоса воздуха в подмасочное пространство за полосой обтюрации лицевой маски. Установлена регрессионная зависимость степени между выходным и двумя входными параметрами. Функция отзыва аппроксимирована нелинейной математической моделью второго порядка. Во время определения коэффициентов при переменных управления применён метод наименьших квадратов. Определенная регрессионная зависимость использована в оптимизационных расчетах. Выводы. Решение поставленных задач дало такие результаты: нелинейная математическая модель по сравнению с линейной моделью более адекватно характеризует процесс использования фильтровального респиратора, относительная погрешность не превышает 0,6 %. На основании полученной регрессионной модели сформулировано оптимизационное задание, которое содержит целевуюфункцию и дополнительные ограничения по защитным и эргономическим требованиям. Целевая функция не имеет экстремума в пределах установленных ограничений. Интервальная оценка оптимальных значений определена графически, как точка пересечения графиков изменения длины, усилий натяга наголовья, объема подсоса, за полосой обтюрации и ограничений. Респиратор не превышает установленный стандартом объем подсосанного воздуха на уровне 2 % при длине вставки в ленте наголовья в интервале 2–3,2 см. При таких параметрах усилие натяга наголовья не превышает гигиенический норматив 5 Н.Ограничение/последствия исследований. Адаптированный к разработке и определению оптимальных параметров метод планирования эксперимента является универсальным для всех видов средств индивидуальной защиты. Практические последствия. Использование активного эксперимента при разных конструкциях лицевой маски и комплекта наголовья дает возможность обосновать выбор материала, площади и длины вставки в ленту наголовья. Оригинальность/ценность. Предложенный способ определения оптимальных параметров средств индивидуальной защиты дает возможность, по сравнению с существующими подходами, отойти от эвристических методов проектирования, формализовать и соединить аналитическими зависимостями основные нормативные, защитные, эргономические, технологические требования к защитным изделиям и их отдельных элементов.
Ключевые слова: фильтровальный респиратор, метод планирования эксперимента, математическая модель, наголовья.