

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

КРАВЧЕНКО БОГДАН ДМИТРОВИЧ

УДК 331.452:614.8:331.48

ДИСЕРТАЦІЯ

**ІНТЕГРАЛЬНА ОЦІНКА ПРОФЕСІЙНИХ РИЗИКІВ ПРИ ВИБОРІ І
ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАХИСТУ**

Спеціальність 263 – цивільна безпека
Галузь знань 26 – цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів та текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Б.Д. Кравченко

Науковий керівник: Голінько Василь Іванович, доктор технічних наук,
професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки

Дніпро – 2026

АНОТАЦІЯ

Кравченко Б.Д. Інтегральна оцінка професійних ризиків при виборі і експлуатації засобів індивідуального захисту. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 263 – цивільна безпека (26 – цивільна безпека) – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Дніпро, 2026.

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності управління професійними ризиками при виборі та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД) шляхом розроблення інтегральної моделі оцінки професійних ризиків, яка комплексно враховує людський фактор, експлуатаційні ризики, захисну ефективність, прогнозований ресурс захисної дії та економічні критерії прийняття рішень.

Проведено комплексний аналіз нормативно-правової бази України та світу, включаючи міжнародні стандарти ISO 45001:2018 та ISO 31000:2018, європейський стандарт EN 529:2005 (гармонізований в Україні як ДСТУ EN 529:2006), національні правила вибору та застосування ЗІЗОД згідно з НПАОП 0.00-1.04-07, а також Технічний регламент засобів індивідуального захисту, затверджений Постановою Кабінету Міністрів України № 771. Крім того, проаналізовано наукові джерела та існуючі методи оцінки ризиків, серед яких якісні методи (матричні методи, метод HAZOP, метод «5-чому?»), кількісні методи (FMEA, SPAR-N, FRAM) та гібридні (напівкількісні) підходи, зокрема метод Файна-Кінні. Встановлено, що чинні підходи переважно орієнтовані на окремі складові ризику, тобто технічні, організаційні або економічні аспекти, і не забезпечують комплексного врахування взаємозв'язку між конструктивними особливостями респіратора, фізіологічним станом працівника, динамікою експлуатаційних ризиків та економічними наслідками.

Виявлено, що існуючі стандарти та методики мають переважно статичний характер і недостатньо регулюють динамічні ризики тривалої експлуатації ЗІЗОД, що створює суттєві прогалини в системі управління охороною праці. На основі проведеного аналізу сформульовано мету та завдання дослідження.

Удосконалено модель оцінювання надійності людини при експлуатації ЗІЗОД на основі модифікованого методу SPAR-H (Standardized Plant Analysis Risk – Human Reliability Analysis), за рахунок додаткового врахування впливу параметрів підмаскового простору, зокрема температури та відносної вологості, а також фізіологічного навантаження, оцінюваного за частотою пульсу, на ймовірність безпомилкового виконання виробничих операцій.

На основі експериментальних досліджень захисних властивостей респіраторів на добровольцях встановлені закономірності для формування показників коригувальних коефіцієнтів. Зокрема, коефіцієнт впливу температури розраховується як відношення між фактичною температурою під маскою респіратора та комфортною, що задається нормативними документами. Коефіцієнт впливу вологості визначається як відношення між фактичною вологістю у підмасковому просторі та комфортною, виходячи з режиму роботи. Коефіцієнт впливу пульсу розраховується як різниця між пульсом при роботі в респіраторі та нормальним пульсом при роботі без респіратора. Загальна надійність людини визначається як добуток базової надійності та трьох зазначених коригувальних коефіцієнтів, що дозволяє кількісно оцінити негативний вплив мікроклімату підмаскового простору на функціональну надійність працівника через інтенсивні фізичні навантаження, зростання опору фільтрувальних елементів, збільшення підсмоктування нефільтрованого повітря через нещільності смуги обтюрації та накопичення вологи у підмасковому просторі.

Удосконалено методику ідентифікації та оцінювання експлуатаційних ризиків ЗІЗОД шляхом інтеграції двох взаємодоповнюючих методів: методу дослідження небезпек та працездатності HAZOP та методу аналізу видів і наслідків відмов FMEA. На відміну від традиційного застосування цих методів

до технологічних процесів або промислового обладнання, запропонована процедура адаптована специфічно до життєвого циклу засобів індивідуального захисту. Методика складається з чотирьох послідовних етапів. На першому етапі за допомогою методу HAZOP з використанням керуючих слів, таких як «немає», «більше», «менше», «інше», здійснюється якісна ідентифікація невідповідностей та потенційних дефектів під час експлуатації респіратору. На другому етапі визначаються небезпечні чинники та їх можливі наслідки для здоров'я працівника. На третьому етапі виконується кількісне оцінювання ризику за допомогою показника пріоритетності ризику RPN, який розраховується як добуток трьох параметрів: серйозності наслідків відмови, частоти (ймовірності) появи відмови та ймовірності виявлення відмови. Кожен параметр оцінюється за десятибальною шкалою. На четвертому етапі обґрунтовуються та впроваджуються запобіжні заходи.

У межах дисертаційної роботи запропоновано два основні напрями конструктивних удосконалень фільтрувального респіратору, спрямованих на підвищення герметичності прилягання та експлуатаційної ефективності. Перший напрям стосується удосконалення обтюратора за рахунок виконання локальної перфорації обтюратора в зоні перенісся та щік. Результати моделювання показали, що для базової конструкції без перфорації спостерігається нерівномірний розподіл стискаючих сил, причому в зоні перенісся контактний тиск є недостатнім для забезпечення герметичності. Використання локальної перфорації в зоні перенісся та щік забезпечило більш рівномірний розподіл контактного тиску та зменшення локальних деформацій, що дозволило знизити коефіцієнт проникнення аерозолі від 42 до 58 % для різних масок респіратору. Другий напрям стосується удосконалення системи кріплення респіратору, що дозволяє підвищити контроль за його захисними властивостями. Запропоновано оснастити стрічки наголів'я спеціальними вставками-індикаторами контролю натягу еластичних ремінців. Конструкція вставки включає контрольну пружину та багатоколірні індикаторні пластини. Залежно від сили натягу ремінця пружина розтягується, і через спеціальний

прозорий паз стає видимим відповідний колір індикатора. Розроблено удосконалені математичні моделі для оцінювання захисної ефективності ЗІЗОД та прогнозування ресурсу захисної дії фільтрувальних елементів. На відміну від існуючих номінальних розрахунків, запропоновані моделі враховують реальні умови експлуатації через оцінювання параметрів дихального процесу працівника, концентрацію шкідливих речовин, характеристики сорбційного матеріалу та динаміку навантаження.

Запропоновано комплексний економічний критерій оцінювання ефективності використання ЗІЗОД, який, на відміну від традиційних підходів, орієнтованих лише на закупівельну вартість, інтегрує сукупні витрати протягом життєвого циклу засобу захисту, очікувані збитки від професійних захворювань та втрати продуктивності праці. Економічний критерій подається як сума п'яти складових: витрати на придбання респіратора та фільтрів, експлуатаційні витрати, економічні наслідки професійних захворювань, економічні втрати від зниження продуктивності праці та втрати від нещасних випадків. Задача вибору найбільш доцільного варіанта захисту полягає в мінімізації цього сумарного показника.

Розроблено інтегральну модель оцінки професійних ризиків при виборі та експлуатації ЗІЗОД, яка об'єднує в межах єдиного безрозмірного показника п'ять взаємопов'язаних складових. Перша складова – це ймовірність помилкових дій працівника, яка визначається як одиниця мінус показник надійності людини, отриманий за модифікованим методом SPAR-H. Друга складова – пріоритетне число ризику RPN, отримане за результатами інтегрованого аналізу HAZOP та FMEA. Третя складова – обернена захисна ефективність респіратора, тобто одиниця, поділена на коефіцієнт захисту $K_{зр}$. Четверта складова – обернений відносний індекс прогнозованого часу захисної дії фільтра, де відносний індекс визначається як відношення прогнозованого часу захисної дії досліджуваного фільтра до максимального значення цього часу серед альтернативних варіантів. П'ята складова – відносний економічний індекс, який визначається як відношення значення

економічного критерію для досліджуваного варіанта до максимального значення економічного критерію серед альтернативних варіантів.

Обґрунтовано механізм безперервного вдосконалення інтегральної моделі оцінки професійних ризиків на основі циклу PDCA, який розшифровується як Plan (планування), Do (виконання), Check (перевірка), Act (коригування). Цей механізм забезпечує адаптацію системи управління професійними ризиками до змін виробничого середовища, технологічних процесів, характеристик нових засобів захисту та результатів моніторингу через оцінювання інтегрального показника професійних ризиків як кількісного критерію результативності кожного етапу циклу.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у вирішенні актуального науково-прикладного завдання з підвищення ефективності управління професійними ризиками при виборі та експлуатації засобів індивідуального захисту шляхом інтеграції технічних, фізіологічних, організаційних та економічних критеріїв оцінювання професійного ризику при експлуатації ЗІЗОД на основі використання циклу PDCA.

Наукові результати.

1. Вперше запропоновано інтегральну модель оцінки професійних ризиків при виборі та експлуатації ЗІЗОД, у якій інтегральний професійний ризик визначається мультиплікативним поєднанням п'яти взаємопов'язаних складових: ймовірності помилкових дій працівника ($1-R$), експлуатаційного ризику (RPN), оберненої захисної ефективності ($1/K_{зр}$), оберненого відносного індексу прогнозованого часу захисної дії фільтра ($1/T_{*зах}$) та відносного економічного індексу (F^*), що забезпечує комплексне врахування людського фактора, експлуатаційних, технічних та економічних чинників у межах єдиного інтегрального показника (IPR).

2. Запропоновано здійснювати оцінку негативного впливу мікроклімату підмаскового простору на функціональну надійність працівника через інтенсивні фізичні навантаження, зростання опору фільтрувальних елементів, збільшення підсмоктування нефільтрованого повітря через

нешільності смуги обтюрації та накопичення вологи у підмасковому просторі респіратора та визначні лінійні коригувальні коефіцієнти які дозволяють врахувати вплив цих чинників.

3. Запропонований новий методологічний підхід до вибору ЗІЗ органів дихання працівників, який полягає в одночасному врахуванні витрат на закупівлю та обслуговування респіраторів та втрат пов'язаних з їх використанням у тому числі економічних наслідків подій, пов'язаних із виникненням професійних захворювань пилової етіології, економічних наслідків, пов'язаних зі зниженням продуктивності працівників при використанні ЗІЗ та економічних наслідки нещасних випадків, пов'язаних із використанням ЗІЗ.

4. Удосконалені математичні моделі оцінювання захисної ефективності ЗІЗОД та прогнозування ресурсу захисної дії фільтрувальних елементів, що на відміну від існуючих номінальних розрахунків, враховують реальні умови експлуатації через оцінювання параметрів дихального процесу працівника, концентрацію шкідливих речовин, характеристики сорбційного матеріалу та динаміку навантаження.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні науково-методичного забезпечення ризик-орієнтованого вибору та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання, яке може бути використане на промислових підприємствах для підвищення рівня безпеки праці, зниження професійних ризиків та вдосконалення систем управління охороною праці.

Розроблений алгоритм комплексного оцінювання альтернативних варіантів ЗІЗОД з урахуванням показників надійності людини, експлуатаційних ризиків, захисної ефективності, прогнозованого ресурсу захисної дії фільтрів та економічних критеріїв, що забезпечує підвищення обґрунтованості прийняття рішень щодо вибору засобів захисту в конкретних виробничих умовах.

Запропонований алгоритм оцінювання експлуатаційних ризиків ЗІЗОД на основі інтеграції методів HAZOP та FMEA, а також розроблене на її основі «Положення про ідентифікацію невідповідностей та розрахунок пріоритетного числа ризику засобів індивідуального захисту працівників» можуть бути впроваджені в систему управління охороною праці підприємства.

Удосконалено конструктивні елементи фільтрувального респіратора: локальна перфорація обтюратора в зоні перенісся та щік забезпечує зниження коефіцієнта проникнення аерозолю на 65-68 % порівняно зі стандартною конструкцією, а впровадження вставок-індикаторів контролю натягу ремінців дозволяє візуально підтримувати оптимальну силу натягу (5-6 Н).

Практичне значення мають також результати економічного обґрунтування вибору ЗІЗОД, які дозволяють враховувати не лише витрати на придбання засобів захисту, а й експлуатаційні витрати, вплив засобів захисту на продуктивність праці та можливі економічні наслідки професійних захворювань.

Впровадження результатів роботи. Теоретичні та практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені в навчальний процес кафедри охорони праці та цивільної безпеки НТУ «Дніпровська політехніка» при підготовці здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальностей 263 Цивільна безпека за освітньою програмою «Цивільна безпека» та 184 Гірництво за освітньою програмою «Охорона праці» під час вивчення дисциплін «Проектування засобів колективного та індивідуального захисту працюючих», «Сучасні засоби індивідуального захисту працюючих» та «Проектування технічних засобів та заходів безпеки».

Результати роботи впроваджено на виробництві засобів індивідуального захисту органів дихання у ТОВ НВП «СТАНДАРТ».

Ключові слова. Респіратор, коефіцієнт захисту, коефіцієнт проникнення, опір диханню, професійний ризик, експлуатаційний ризик, модель оцінювання ризику, система управління професійними ризиками, гірники, професійні небезпеки.

ABSTRACT

Kravchenko B.D. Integral assessment of occupational risks in the selection and operation of personal protective equipment. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 263 – Civil Security (26 – Civil Security) – Dnipro University of Technology, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2026.

The dissertation addresses a relevant scientific and applied problem of increasing the efficiency of occupational risk management in the selection and operation of respiratory protective devices (RPDs) by developing an integral model for assessing occupational risks that comprehensively takes into account the human factor, operational risks, protective efficiency, predicted service life of filters, and economic decision-making criteria.

A comprehensive analysis of the regulatory framework of Ukraine and the world was carried out, including international standards ISO 45001:2018 and ISO 31000:2018, the European standard EN 529:2005 (harmonized in Ukraine as DSTU EN 529:2006), national rules for the selection and application of RPDs according to NPAOP 0.00-1.04-07, as well as the Technical Regulation on Personal Protective Equipment approved by Resolution No. 771 of the Cabinet of Ministers of Ukraine. In addition, scientific sources and existing risk assessment methods were analyzed, including qualitative methods (matrix methods, HAZOP, the «5 Whys» method), quantitative methods (FMEA, SPAR-H, FRAM), and hybrid (semi-quantitative) approaches, in particular the Fine-Kinney method. It was established that the current approaches are primarily focused on individual components of risk, i.e., technical, organizational, or economic aspects, and do not provide a comprehensive consideration of the interrelationship between the design features of the respirator, the physiological state of the worker, the dynamics of operational risks, and economic consequences. It was found that existing standards and methods are mostly static in nature and insufficiently regulate the dynamic risks of long-term

operation of RPDs, which creates significant gaps in the occupational safety management system. Based on the analysis, the aim and objectives of the study were formulated.

The model for assessing human reliability in the operation of RPDs was improved based on the modified SPAR-H method (Standardized Plant Analysis Risk – Human Reliability Analysis), by additionally taking into account the influence of the parameters of the under-mask space, in particular temperature and relative humidity, as well as physiological load assessed by heart rate, on the probability of error-free performance of production operations.

Based on experimental studies of the protective properties of respirators on volunteers, patterns were established for the formation of correction coefficients. In particular, the temperature influence coefficient is calculated as the ratio between the actual temperature under the respirator mask and the comfortable temperature specified by regulatory documents. The humidity influence coefficient is determined as the ratio between the actual humidity in the under-mask space and the comfortable humidity, based on the work mode. The heart rate influence coefficient is calculated as the difference between the heart rate when working with a respirator and the normal heart rate when working without a respirator. The overall human reliability is determined as the product of the baseline reliability and the three mentioned correction coefficients, which allows for a quantitative assessment of the destructive influence of the under-mask microclimate on the functional reliability of the worker due to intense physical loads, increased resistance of filter elements, increased inward leakage of unfiltered air through gaps in the face seal, and moisture accumulation in the under-mask space.

The methodology for identifying and assessing operational risks of RPDs was improved by integrating two complementary methods: the Hazard and Operability Study (HAZOP) method and the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) method. In contrast to the traditional application of these methods to technological processes or industrial equipment, the proposed procedure is specifically adapted to the life cycle of personal protective equipment. The methodology consists of four

consecutive stages. In the first stage, a qualitative identification of non-conformities and potential defects during respirator operation is carried out using the HAZOP method with standard Guide Words such as «No», «More», «Less», and «Other Than». At the second stage, hazardous factors and their possible consequences for the worker's health are determined. At the third stage, a quantitative risk assessment is performed using the Risk Priority Number (RPN), which is calculated as the product of three parameters: severity of the failure consequence, occurrence (probability) of the failure, and detection probability. Each parameter is evaluated on a ten-point scale. At the fourth stage, preventive measures are justified and implemented.

Within the framework of the dissertation, two main directions of design improvements of the filtering respirator are proposed, aimed at increasing the tightness of fit and operational efficiency. The first direction concerns the improvement of the face seal by making local perforations in the nose and cheek area. Simulation results showed that for the basic design without perforation, there is an uneven distribution of compressive forces, with contact pressure in the nose area being insufficient to ensure tightness. The use of local perforation in the nose and cheek area provided a more uniform distribution of contact pressure and reduced local deformations, which made it possible to reduce the aerosol penetration coefficient from 42% to 58% for different respirator masks. The second direction concerns the improvement of the respirator's head harness system, which allows for increased control over its protective properties. It is proposed to equip the head straps with special indicator inserts for monitoring the tension of elastic straps. The insert design includes a control spring and multi-colored indicator plates. Depending on the strap tension force, the spring stretches, and the corresponding indicator color becomes visible through a special transparent slot.

Improved mathematical models were developed for assessing the protective efficiency of RPDs and predicting the service life of filter elements. In contrast to existing nominal calculations, the proposed models take into account real operating conditions by assessing the parameters of the worker's respiratory process, the

concentration of harmful substances, the characteristics of the sorbent material, and the load dynamics.

A comprehensive economic criterion for evaluating the efficiency of RPD use is proposed, which, unlike traditional approaches focused solely on purchase cost, integrates the total life cycle costs of the protective device, expected losses from occupational diseases, and productivity losses. The economic criterion is presented as the sum of five components: costs of purchasing the respirator and filters, operational costs, economic consequences of occupational diseases, economic losses from reduced productivity, and losses from accidents. The task of selecting the most appropriate protection option is to minimize this total indicator.

An integral model for assessing occupational risks in the selection and operation of RPDs has been developed, which combines five interrelated components within a single dimensionless indicator. The first component is the probability of erroneous actions by the worker, defined as one minus the human reliability indicator obtained by the modified SPAR-H method. The second component is the Risk Priority Number (RPN) obtained from the integrated HAZOP and FMEA analysis. The third component is the inverse protective efficiency of the respirator, i.e., one divided by the protection factor K_{3p} . The fourth component is the inverse relative index of the predicted filter service life, where the relative index is defined as the ratio of the predicted service life of the filter under study to the maximum value of this time among alternative options. The fifth component is the relative economic index, defined as the ratio of the economic criterion value for the option under study to the maximum economic criterion value among alternative options.

A mechanism for continuous improvement of the integral model for assessing occupational risks based on the PDCA cycle (Plan, Do, Check, Act) is substantiated. This mechanism ensures the adaptation of the occupational risk management system to changes in the production environment, technological processes, characteristics of new protective equipment, and monitoring results by assessing the integral

occupational risk indicator as a quantitative criterion for the effectiveness of each stage of the cycle.

The scientific novelty of the obtained results lies in solving the relevant scientific and applied task of increasing the efficiency of occupational risk management in the selection and operation of personal protective equipment by integrating technical, physiological, organizational, and economic criteria for assessing occupational risk during the operation of RPDs based on the use of the PDCA cycle.

Scientific results:

1. For the first time, an integrated model of occupational risk assessment was proposed, which comprehensively takes into account the human factor, operational risks, protective efficiency, predicted resource of protective action and economic criteria for decision-making. It is shown that the complex occupational risk during the selection and operation of PPE is determined by a multiplicative combination of five interrelated components: the probability of erroneous actions of the employee ($1-R$), operational risk (RPN), inverse protective efficiency ($1/K_{pr}$), inverse predicted time of protective action ($1/T_{zakh}$) and relative economic index (F^*), which allows quantitatively assessing the integral occupational risk (IPR) as the product of these factors.

2. It is proposed to assess the destructive impact of the microclimate of the sub-mask space on the functional reliability of the worker due to intense physical exertion, increased resistance of the filter elements, increased suction of unfiltered air due to leaks in the obturation strip and the accumulation of moisture in the sub-mask space of the respirator and determine linear correction factors that allow taking into account the impact of these factors.

3. A new methodological approach to the selection of respiratory PPE for workers is proposed, which consists in simultaneously taking into account the costs of purchasing and servicing respirators and losses associated with their use, including the economic consequences of events associated with the occurrence of occupational diseases of dust etiology, economic consequences associated with a

decrease in worker productivity when using PPE, and economic consequences of accidents associated with the use of PPE.

4. Improved mathematical models for assessing the protective effectiveness of PPE and predicting the resource of the protective action of filter elements, which, unlike existing nominal calculations, take into account real operating conditions through the assessment of the parameters of the worker's respiratory process, the concentration of harmful substances, the characteristics of the sorption material and the dynamics of the load. The practical significance of the obtained results lies in the creation of scientific and methodological support for the risk-oriented selection and operation of respiratory protective devices, which can be used at industrial enterprises to increase the level of occupational safety, reduce occupational risks, and improve occupational safety management systems.

An algorithm for the comprehensive assessment of alternative RPD options has been developed, taking into account indicators of human reliability, operational risks, protective efficiency, predicted filter service life, and economic criteria, which ensures increased validity of decision-making regarding the selection of protective equipment in specific production conditions.

The proposed algorithm for assessing operational risks of RPDs based on the integration of HAZOP and FMEA methods, as well as the «Regulation on the identification of non-conformities and calculation of the risk priority number of personal protective equipment for employees» developed on its basis, can be implemented into the enterprise's occupational safety management system.

The design elements of the filtering respirator have been improved: local perforation of the face seal in the nose and cheek area ensures a reduction of the aerosol penetration coefficient by 65-68 % compared to the standard design, and the introduction of tension control indicator inserts for the straps allows for visual maintenance of the optimal tension force (5-6 N).

The results of the economic justification for the choice of RPDs are also of practical importance, as they allow taking into account not only the costs of purchasing protective equipment but also operational costs, the impact of protective

equipment on labor productivity, and the possible economic consequences of occupational diseases.

Implementation of the work results. The theoretical and practical results of the dissertation research have been implemented into the educational process of the Department of Occupational Safety and Civil Security of the Dnipro University of Technology in the training of students pursuing a Master's degree in specialty 263 Civil Security under the educational program «Civil Security» and 184 Mining under the educational program «Occupational Safety» during the study of the disciplines «Design of collective and individual protective equipment for workers», «Modern individual protective equipment for workers», and «Design of technical means and safety measures».

The results of the work have been implemented in the production of respiratory protective equipment at LLC SPE «STANDARD».

Key words: respirator, protection factor, penetration coefficient, breathing resistance, occupational risk, operational risk, risk assessment model, occupational risk management system, miners, occupational hazards.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ

Статті у наукових фахових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:

1. Чеберячко С.І., Радчук Д.І., Дерюгін О.В., Сушко Н.С., Кравченко Б.Д. Розробка нової класифікації засобів індивідуального захисту органів дихання. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2022. Вип. 45. С. 109-119. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.45.2022.276269>
2. Голінько В.І., Кравченко Б.Д. Економічне обґрунтування вибору засобів індивідуального захисту органів дихання. Вісті Донецького гірничого інституту. 2023. № 2 (53). С. 14-25. DOI: <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2023-2-14-25>
3. Чеберячко С.І., Радчук Д.І., Дерюгін О.В., Чеберячко Ю.І., Наумов М.М., Кравченко Б.Д. Удосконалення моделі для розрахунку коефіцієнта захисту фільтрувального респіратору від шкідливого аерозолі. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2024. Вип. 48. С. 142-157. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310702>
4. Голінько В., Радчук Д., Чеберячко С., Наумов М., Кравченко Б., Дерюгін О. Оцінювання експлуатаційних ризиків засобів індивідуального захисту органів дихання. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. 2024. Т. 8, № 2. С. 27–43. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2024.8.2.27.43>
5. Радчук Д.І., Чеберячко Ю.І., Чеберячко С.І., Наумов М.М., Кравченко Б.Д. Розробка програми для розрахунку прогнозного часу експлуатації протигазових фільтрів. Вісті Донецького гірничого інституту. 2024. № 2 (55). С. 80-91. DOI: <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2024-2-80-91>
6. Кравченко Б.Д., Голінько В.І., Радчук Д.І. Оцінка надійності людини при використанні респіраторів у виробничих умовах. Науковий вісник ДонНТУ. 2025. № 2 (15). С. 147-163. DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2025-2-15-147-163>

7. Cheberiachko Y., Radchuk D., Cheberiachko S., Slavinskyi D., Kravchenko B. Development of a Filtering Respirator with a Real-Time Monitoring Device for Pressure Drop. *Social Development and Security*. 2026. Vol. 16, No. 1. P. 217-226. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.1.16>

Статті у виданнях включених до бази SCOPUS:

8. Cheberiachko S., Cheberiachko Y., Deryugin O., Kravchenko B., Nehrii T., Nehrii S., Zolotarova O. Increasing the insulation properties of filter respirators to protect miners' respiratory organs from dust. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. 2023. Vol. 38, No. 4. P. 27-40. DOI: <https://doi.org/10.17794/rgn.2023.4.3>

9. Tretiakova L., Cheberyachko Y., Sharovatova O., Nehrii T., Nehrii S., Kravchenko B., Zolotarova O. The influence of head strap elasticity on the protective properties of filtering facepiece respirators. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. 2024. Vol. 39, No. 1. P. 131–140. DOI: <https://doi.org/10.17794/rgn.2024.1.11>.

Матеріали наукових конференцій:

10. Голінько В.І., Яворська О.О., Кравченко Б.Д. Система безпечної праці (SSOW). Молодь: наука та інновації: матеріали Всеукр. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених, м. Дніпро, 23-25 листоп. 2022 р. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2022. С. 292-297. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2022/molod-2022.pdf>

11. Голінько В.І., Чеберячко С.І., Кравченко Б.Д. Оцінка ризиків на робочому місці методом 5 кроків HSE. Актуальні питання науки, освіти та технологій : матеріали міжнар. наук.-практ. конф., м. Біла Церква, 26 листоп. 2022 р. Біла Церква, 2022. Ч. 2. С. 48-49. URL: <http://www.economics.in.ua/2022/12/26-2.html>

12. Кравченко Б.Д., Левін Р.В., Радчук Д.І. Загальний підхід до вибору та застосування захисного одягу. Наукова весна – 2023: матеріали XIII Міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених, м. Дніпро, 1–3 берез. 2023 р. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2023. С. 124-125.

URL: https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna-2023/Scientific_Spring_2023.pdf

13. Голінько В. І., Кравченко Б. Д. Вибір фільтрувальних респіраторів та їх експлуатація на основі оцінки ризиків. Актуальні проблеми та перспективи розвитку охорони праці, безпеки життєдіяльності та цивільного захисту – 2023 : матеріали V Всеукр. наук.-практ. конф., м. Одеса, 4-5 трав. 2023 р. Одеса: ОДАБА, 2023. С. 136-141. URL: http://odaba.edu.ua/upload/files/Zbirnik_konf._OPBZHtaTSZ_2023.pdf

14. Голінько В.І., Кравченко Б.Д. Економічно обґрунтований підхід до вибору засобів індивідуального захисту органів дихання. Безпечна, комфортна, спроможна територіальна громада – 2023: матеріали міжнар. форуму, м. Дніпро, 11-13 жовт. 2023 р. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2023. С. 103-104. URL: <https://science.nmu.org.ua/ua/conferences/Forum/Zbirnyk.pdf>

15. Кравченко Б.Д., Голінько В.І. Проблеми вибору фільтрувальних респіраторів. Молодь: наука та інновації: матеріали XI Міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених, м. Дніпро, 22-24 листоп. 2023 р.: у 2 т. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2023. Т.1. С. 375-376. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2023/molod-2023-vol1.pdf>

16. Голінько В.І., Чеберячко С.І., Кравченко Б.Д. Метод «5-Чому?» у визначенні причин відмови від використання ЗІЗОД. Сталий розвиток України в умовах глобалізації та Європейської економічної інтеграції: проблеми, перспективи, ефективність. ФЕНІКС-2023: матеріали міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 19 груд. 2023 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2023. С. 147-150. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/73858>

17. Кравченко Б.Д., Голінько В.І. Метод FMEA в оцінюванні пріоритетного числа ризику засобів індивідуального захисту працівників. Наукова весна – 2024: матеріали XIV Міжнар. наук.-техн. конф. аспірантів та молодих вчених, м. Дніпро, 27-29 берез. 2024 р. Дніпро: НТУ «Дніпровська

політехніка», 2024. С. 107-109. URL: https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna-2024/Scientific_Spring_2024.pdf

18. Голінько В.І., Кравченко Б.Д. Роль засобів індивідуального захисту у профілактиці професійних захворювань. Безпечна, комфортна, спроможна територіальна громада – 2024: матеріали міжнар. форуму, м. Дніпро, 16-18 жовт. 2024 р. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2024. С. 111-112. URL: <https://science.nmu.org.ua/ua/conferences/Forum/Zbirnyk2024.pdf>

19. Кравченко Б.Д. Застосування традиційних методів оцінки професійних ризиків при виборі ЗІЗ. Молодь: наука та інновації – 2024: матеріали XII Міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених, м. Дніпро, 13-15 листоп. 2024 р.: у 3 т. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2024. Т.2. С. 10-11. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2024/molod-2024-vol2.pdf>

20. Кравченко Б.Д., Голінько В.І. Критерії вибору засобів індивідуального захисту з урахуванням інтегральної оцінки ризиків. Наукова весна – 2025: матеріали XV Міжнар. наук.-техн. конф. аспірантів та молодих вчених, м. Дніпро, 26-28 берез. 2025 р. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2025. С. 137-138. URL: https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna-2025/Scientific_Spring_2025.pdf

21. Кравченко Б.Д., Голінько В.І. Аналіз причин виробничого травматизму та заходи щодо його запобігання. Проблеми та перспективи розвитку охорони праці: зб. наук. праць V Всеукр. наук.-практ. конф. викладачів та фахівців-практиків та XV Всеукр. наук.-практ. конф. курсантів, студентів, аспірантів та ад'юнктів «Охорона праці: освіта і практика». Львів: ЛДУБЖД, 2025. С. 157-159. URL: <https://surl.li/hnvavw>

22. Кравченко Б., Радчук Д., Чеберячко Ю. Щодо надійності людини при використанні респіраторів у виробничих умовах. Українська школа гірничої інженерії: матеріали XVIII Міжнар. наук.-практ. конф., смт Східниця, 29 верес. - 4 жовт. 2025 р. 2025. С. 81-82. DOI: <https://doi.org/10.33271/usme18.081>

23. Кравченко Б.Д., Голінько В.І. Вплив умов експлуатації на захисні властивості засобів індивідуального захисту та професійні ризики. Проблеми екології та енергозбереження: матеріали XVI Міжнар. наук.-техн. конф. Миколаїв: НУК, 2025. С. 438-443. URL: <https://drive.google.com/file/d/1r3IOgsR5t3kcR6eWqwFEcHwkX6Zr24el/view>

24. Кравченко Б.Д., Голінько В.І. Застосування Human Reliability Analysis (HRA) у визначенні впливу ЗІЗОД на надійність людини. Безпечна, комфортна та спроможна територіальна громада: матеріали III наук.-практ. конф., м. Дніпро, 15-17 жовт. 2025 р. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2025. С. 350-353. URL: <https://short-url.cc/1yqRB>

25. Кравченко Б.Д., Голінько В.І. Оптимізація системи захисту органів дихання на підприємстві: від оцінки ризиків до стандартів ISO. Наукова весна – 2026: матеріали XVI Міжнар. наук.-техн. конф. аспірантів та молодих вчених, м. Дніпро, 4-6 берез. 2026 р. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2026. С. 202-204. URL: https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna-2026/Scientific_Spring_2026.pdf

ЗМІСТ

ВСТУП	27
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ОЦІНКИ ПРОФЕСІЙНИХ РИЗИКІВ ПРИ ВИБОРІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗІЗ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	39
1.1. Сутність, класифікація та особливості професійних ризиків у сфері охорони праці.....	39
1.2. Нормативно-правова база оцінки професійних ризиків та забезпечення ЗІЗОД в Україні та світі.....	47
1.3. Аналіз сучасних методів оцінки професійних ризиків при виборі та експлуатації ЗІЗОД.....	55
1.4. Роль і місце ЗІЗОД в ієрархії заходів контролю професійних ризиків.....	63
1.5. Аналіз небезпек і небезпечних чинників, що знижують експлуатаційні показники ЗІЗОД.....	69
1.6. Огляд наукових досліджень з удосконалення конструкції, оцінки ефективності, надійності та економічних складових експлуатації ЗІЗОД.....	76
Висновки до розділу 1	84
Список використаних джерел до розділу 1.....	86
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ОЦІНКИ ПРОФЕСІЙНИХ РИЗИКІВ ПРИ ВИБОРІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗІЗОД	96
2.1. Теоретичні основи управління професійними ризиками в системі охорони праці.....	96
2.2. Теоретичні засади оцінки надійності людини при тривалій експлуатації ЗІЗОД.....	104
2.3. Теоретико-методичні основи ідентифікації та оцінки експлуатаційних ризиків ЗІЗОД.....	114

2.4. Теоретичні основи розрахунку коефіцієнта захисту та прогнозування ресурсу захисної дії ЗІЗОД	125
2.4.1. Теоретичні основи оцінки ефективності прилягання ЗІЗОД.....	126
2.4.2. Теоретичні основи розрахунку коефіцієнта захисту ЗІЗОД.....	130
2.4.3. Теоретичні основи прогнозування ресурсу захисної дії фільтрів...	136
2.5. Економічні та організаційні основи вибору і експлуатації ЗІЗОД....	141
Висновки до розділу 2	156
Список використаних джерел до розділу 2	158
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ІНТЕГРАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ ПРОФЕСІЙНИХ РИЗИКІВ ПРИ ВИБОРІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗІЗОД	
3.1. Розробка моделі надійності людини при експлуатації ЗІЗОД на основі модифікованого методу SPAR-H	174
3.2. Удосконалення методики ідентифікації та оцінювання експлуатаційних ризиків ЗІЗОД на основі інтеграції методів HAZOP і FMEA	193
3.3. Удосконалення конструктивних елементів фільтрувального респіратора для підвищення герметичності та експлуатаційної ефективності	207
3.3.1. Удосконалення конструкції обтюратора фільтрувального респіратора.....	207
3.3.2. Удосконалення системи кріплення фільтрувального респіратора..	220
3.4. Удосконалення математичних моделей та програмних засобів оцінювання захисної ефективності ЗІЗОД.....	233
3.4.1 Розроблення математичних моделей оцінювання захисної ефективності ЗІЗОД.....	233
3.4.2 Розроблення програмного комплексу прогнозування захисних властивостей ЗІЗОД.....	248

3.5. Розроблення інтегральної моделі оцінки професійних ризиків з урахуванням економічних критеріїв та принципів безперервного вдосконалення.....	267
3.5.1 Економічне обґрунтування вибору ЗІЗОД у складі інтегральної моделі оцінки професійних ризиків.....	267
3.5.2 Формування інтегральної моделі оцінки професійних ризиків та механізму її безперервного вдосконалення на основі циклу PDCA	285
Висновки до розділу 3	310
Список використаних джерел до розділу 3	312
ВИСНОВКИ	321
ДОДАТКИ	324

ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

Ризик – це вплив невизначеності на досягнення поставлених цілей, який може призводити до відхилення очікуваних результатів від запланованих.

Професійний ризик – поєднання ймовірності виникнення небезпечної події або впливу небезпечного виробничого чинника та тяжкості можливих наслідків для здоров'я або життя працівника.

Інтегральна оцінка професійного ризику – комплексна характеристика рівня професійного ризику, сформована на основі поєднання технічних, організаційних, поведінкових та економічних показників у єдиний узагальнений показник, який відображає сукупний вплив факторів на безпеку працівника під час вибору та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання.

Управління ризиками – систематичний процес ідентифікації, аналізу, оцінювання, контролю та моніторингу ризиків з метою запобігання або зниження ймовірності виникнення небезпечних подій і мінімізації їх наслідків для працівників, виробничих процесів та організації в цілому.

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) – технічні засоби, призначені для носіння або використання працівником з метою запобігання, зменшення або усунення впливу небезпечних та шкідливих виробничих чинників на його життя, здоров'я та працездатність під час виконання трудових обов'язків.

Ефективність ЗІЗ – здатність засобу індивідуального захисту забезпечувати зниження впливу небезпечних і шкідливих виробничих чинників на працівника до рівня, що не перевищує встановлених нормативних вимог, за конкретних умов експлуатації.

Засіб індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД) – пристрій, призначений для захисту органів дихання людини від дії токсичних речовин різного походження.

Фільтрувальні засоби індивідуального захисту органів дихання – ЗІЗОД, що використовуються лише при вмісті кисню в оточуючому повітрі $\geq 17\%$ (за об'ємом) та за умови обмеження вмісту відомих шкідливих газоподібних домішок. Застосування цих ЗІЗОД заборонено у важкодоступних та погано провітрюваних об'єктах малого об'єму (цистернах, колодязях, трубопроводах, печах тощо).

Обтюратор – еластичний елемент лицьової частини респіратору, призначений для забезпечення герметичного прилягання засобу індивідуального захисту органів дихання до обличчя користувача та запобігання проникненню забрудненого повітря через смугу прилягання.

Небезпечні та шкідливі виробничі чинники (НШВФ) – фактори виробничого середовища або трудового процесу, вплив яких за певних умов може призвести до травмування працівника, розвитку професійного захворювання, погіршення стану здоров'я чи зниження працездатності.

Фільтр – пристрій, призначений для вилучання зі вдихуваного повітря токсичних аеродисперсних частинок або/і газів та парів.

Підмасковий простір – внутрішній об'єм між внутрішньою поверхнею лицьової частини ЗІЗОД та обличчям користувача, у якому формується повітряне середовище, що вдихається працівником.

Опір диханню – опір потоку повітря під час вдихання (опір вдиху) або видихання (опір видиху) повітря, що створює респіратор або його складові (фільтр(и), клапани вдиху і видиху). Одиниці виміру опору – Па або мбар (1 мбар = 100 Па).

Коефіцієнт захисту респіатора (Кзр) – показник ефективності засобу індивідуального захисту органів дихання, який характеризує ступінь зниження концентрації шкідливої речовини, що надходить до підмаскового простору порівняно з її концентрацією в повітрі робочої зони.

Коефіцієнт підсмоктування по смузі обтюраторії – відношення кількості атмосферного повітря, що надходить крізь нещільності, що утворюються між

обличчям і обтюратором, до кількості вдихуваного повітря (розраховується у відсотках).

Коефіцієнт проникнення – відношення кількості забрудненого повітря, що потрапляє у підмасковий простір через нещільності прилягання та негерметичність конструктивних елементів ЗІЗОД, до загальної кількості вдихуваного повітря (визначається у відсотках).

Наголовний гарнітур (наголів'я) – засіб прилаштування і утримання в робочому стані півмаски на обличчі.

Одноразове використання – термін, який означає, що ЗІЗОД або фільтр після однократного використання підлягає заміні.

Людський фактор – сукупність психофізіологічних, поведінкових, організаційних та індивідуальних особливостей працівника, які можуть впливати на правильність вибору, використання та ефективність експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання.

Час захисної дії фільтра – проміжок часу від початку використання фільтра до моменту досягнення концентрацією шкідливої речовини за фільтром гранично допустимого значення, після чого подальша експлуатація фільтра не забезпечує необхідного рівня захисту.

ВСТУП

Актуальність дослідження. Забезпечення безпечних умов праці належить до пріоритетних напрямів розвитку сучасного виробництва та є однією з ключових складових державної політики у сфері охорони праці. Незважаючи на значний прогрес у розвитку технологій, автоматизації виробничих процесів та впровадженні сучасних систем управління безпекою праці, проблема професійного ризику залишається актуальною для більшості галузей промисловості. Особливо гостро вона проявляється на підприємствах гірничодобувної, металургійної, хімічної, енергетичної та будівельної галузей, де працівники піддаються одночасному впливу пилу, токсичних газів, аерозолів, несприятливих мікрокліматичних умов та значних фізичних навантажень.

Відповідно до сучасної концепції ризик-орієнтованого управління охороною праці, закріпленої в міжнародних стандартах ISO 45001:2018 та ISO 31000:2018, основою забезпечення безпеки працівників є своєчасна ідентифікація небезпек, оцінювання ризиків та впровадження заходів щодо їх мінімізації. Проте на практиці повне усунення шкідливих виробничих факторів часто є технічно складним або економічно недоцільним. У таких умовах засоби індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД) залишаються останнім і нерідко єдиним бар'єром між працівником та небезпечним виробничим середовищем.

Особливого значення проблема ефективного використання ЗІЗОД набуває в умовах гірничої промисловості, де виробничі процеси супроводжуються високими концентраціями пилу, наявністю токсичних газів, підвищеною температурою та вологістю повітря. Саме інгаляційний вплив шкідливих речовин є однією з головних причин розвитку професійних захворювань органів дихання, зокрема пневмоконіозів, силікозу, хронічних

бронхітів та інших патологій, що призводять до втрати працездатності, зниження якості життя працівників та значних соціально-економічних збитків.

Сучасний ринок пропонує широкий спектр фільтрувальних і ізолювальних засобів захисту органів дихання, які відрізняються конструкцією, класом захисту, ергономічними характеристиками та вартістю. Водночас вибір конкретного засобу захисту в більшості випадків здійснюється переважно на основі нормативних вимог або паспортних характеристик виробника. Такий підхід не дозволяє повною мірою врахувати специфіку реальних умов експлуатації, індивідуальні особливості працівників, динаміку виробничого середовища та вплив самого засобу захисту на функціональний стан людини.

Аналіз сучасних наукових досліджень свідчить, що більшість існуючих методів оцінювання професійних ризиків орієнтована на окремі аспекти безпеки праці. Значна увага приділяється оцінюванню концентрацій шкідливих речовин, технічних характеристик респіраторів, показників проникнення аерозолів через фільтрувальні елементи або аналізу виробничого середовища. Разом із тим недостатньо дослідженими залишаються питання комплексного врахування впливу ЗІЗОД на фізіологічний стан працівника, його працездатність, надійність виконання виробничих операцій та ймовірність помилкових дій.

Особливої актуальності набуває проблема людського фактора. Тривале використання респіраторів супроводжується підвищенням температури та вологості у підмасковому просторі, зростанням опору диханню, збільшенням фізіологічного навантаження, накопиченням втоми та погіршенням концентрації уваги. У результаті навіть вискоєфективний засіб захисту може опосередковано сприяти зростанню ймовірності помилок працівника та виникненню аварійних ситуацій. Водночас більшість нормативних документів і методик оцінювання ризиків практично не враховують впливу цих чинників на загальний рівень професійного ризику.

Не менш важливою є проблема оцінювання ризиків, пов'язаних безпосередньо з експлуатацією ЗІЗОД. У процесі використання відбуваються зміни властивостей фільтрувальних матеріалів, зниження герметичності обтюратора, погіршення стану кріпильних елементів, накопичення забруднень та інші процеси, які можуть суттєво впливати на фактичний рівень захисту. Традиційні методи оцінювання ризиків переважно мають статичний характер і не враховують динамічних змін, що відбуваються протягом життєвого циклу засобу захисту.

Важливим напрямом сучасних досліджень є також інтеграція технічних, організаційних, фізіологічних та економічних аспектів безпеки праці в межах єдиної системи підтримки прийняття рішень. Практика свідчить, що вибір найбільш ефективного ЗІЗОД не завжди збігається з вибором найбільш економічно доцільного варіанта. Тому виникає необхідність розроблення методів, які дозволяли б одночасно враховувати рівень захисної ефективності, ризики експлуатації, надійність працівника та сукупні витрати протягом життєвого циклу засобу захисту.

Наявні наукові підходи та нормативні документи створюють важливе підґрунтя для оцінювання професійних ризиків, проте не забезпечують комплексного врахування всіх факторів, що визначають безпеку використання засобів індивідуального захисту органів дихання в реальних виробничих умовах. Недостатня розробленість інтегральних методів оцінювання професійних ризиків, які поєднували б аналіз людського фактора, технічної ефективності ЗІЗОД, експлуатаційних ризиків та економічних критеріїв, обумовлює необхідність подальших наукових досліджень у цьому напрямі.

Таким чином, актуальність дисертаційної роботи зумовлена необхідністю підвищення ефективності управління професійними ризиками при виборі та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання шляхом розроблення науково обґрунтованих інтегральних методів оцінювання, які враховують технічні, фізіологічні, організаційні та економічні

фактори безпеки праці. Реалізація такого підходу дозволить підвищити обґрунтованість вибору ЗІЗОД, зменшити рівень професійних ризиків, підвищити надійність працівників у небезпечних виробничих умовах та сприятиме подальшому розвитку ризик-орієнтованих систем управління охороною праці.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

До дисертаційної роботи увійшли результати досліджень, які виконані згідно з тематичними планами науково-дослідних робіт НТУ «Дніпровська політехніка» та Фізико-хімічного інституту захисту навколишнього середовища і людини за темами: «Розробка універсальних засобів індивідуального захисту пролонгованої дії подвійного призначення» (№ ДР 0117U000376, 2017-2018 рр.), «Розробка процесу керування ризиками шляхом удосконалення засобів індивідуального захисту та систем моніторингу безпеки техногенних об'єктів» (№ ДР0125U002025) у яких автор брав участь як виконавець. Також брав участь у виконанні науково-дослідної роботи ДТ-534 «Розробка програмного комплексу для безперебійного забезпечення матеріальними ресурсами центрів критичної інфраструктури автомобільним транспортом» (номер державної реєстрації 0126U001476), що виконується на кафедрі охорони праці та цивільної безпеки НТУ «Дніпровська політехніка», на посаді молодшого наукового співробітника. Окремі результати дисертаційного дослідження використано під час виконання зазначеної науково-дослідної роботи.

Метою дисертаційної роботи є підвищення результативності процесу управління професійними ризиками при виборі та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання шляхом розроблення інтегральної моделі з оцінювання професійних ризиків гірників.

Для реалізації мети дослідження були визначені такі **завдання**:

- провести аналіз сучасного стану проблеми оцінювання професійних ризиків при виборі та експлуатації засобів індивідуального

захисту органів дихання, дослідити нормативно-правові, організаційні та науково-методичні підходи до управління професійними ризиками;

- розробити модель оцінювання надійності людини при експлуатації ЗІЗОД на основі модифікованого методу SPAR-H (Standardized Plant Analysis Risk - Human Reliability Analysis) з урахуванням впливу параметрів підмаскового простору та фізіологічного навантаження працівника;

- удосконалити методику ідентифікації та оцінювання експлуатаційних ризиків ЗІЗОД шляхом інтеграції методів HAZOP (Hazard and Operability Study) та FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) для визначення найбільш критичних відмов і небезпечних відхилень під час їх експлуатації;

- удосконалити конструктивні елементи фільтрувального респіратора з метою підвищення герметичності прилягання до обличчя та покращення експлуатаційної ефективності засобів захисту органів дихання;

- розробити інтегральну модель оцінки професійних ризиків при виборі та експлуатації ЗІЗОД на основі поєднання показників надійності людини, експлуатаційних ризиків, захисної ефективності, прогнозованого часу захисної дії та економічних критеріїв;

- запропонувати механізм безперервного вдосконалення системи управління професійними ризиками при експлуатації ЗІЗОД на основі циклу PDCA та сформулювати практичні рекомендації щодо впровадження розробленої інтегральної моделі на промислових підприємствах.

Об'єктом дослідження процеси формування та управління професійними ризиками при виборі та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання в умовах впливу шкідливих і небезпечних виробничих факторів.

Предметом дослідження методи, моделі та засоби інтегрального оцінювання професійних ризиків при виборі та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання з урахуванням людського фактора,

експлуатаційних ризиків, захисної ефективності, ресурсу захисної дії та економічних критеріїв.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи застосовано: системно-структурний підхід при аналізі наукових праць та нормативно-правових актів; методи теорії ризику та ризик-орієнтованого управління; методи аналізу надійності людини (модифікований метод SPAR-N); методи HAZOP та FMEA для ідентифікації небезпек та оцінювання експлуатаційних ризиків; методи математичного моделювання, теорії масообміну, фільтрації та сорбції; методи багатокритеріального аналізу та інтегрального оцінювання; методи техніко-економічного аналізу; методи комп'ютерного моделювання та програмування; методи статистичної обробки результатів досліджень.

Нормативно-правову основу дослідження склали Конституція України, закони України у сфері охорони праці, стандарти ISO 45001:2018, ISO 31000:2018, ДСТУ EN 149:2017, ДСТУ EN 529:2006, Технічний регламент засобів індивідуального захисту (Постанова КМУ № 771) та інші нормативно-технічні документи.

Методи техніко-економічного аналізу використані для оцінювання економічної ефективності застосування засобів індивідуального захисту органів дихання, визначення витрат на їх придбання та експлуатацію, а також оцінювання економічних наслідків професійних захворювань.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у вирішенні актуального науково-прикладного завдання з підвищення ефективності управління професійними ризиками при виборі та експлуатації засобів індивідуального захисту шляхом інтеграції технічних, фізіологічних, організаційних та економічних критеріїв оцінювання професійного ризику при експлуатації ЗІЗОД на основі використання циклу PDCA.

Наукові результати.

1. Вперше запропонована інтегральна модель оцінки професійних ризиків, яка комплексно враховує людський фактор, експлуатаційні ризики,

захисну ефективність, прогнозований ресурс захисної дії та економічні критерії прийняття рішень. Показано, що комплексний професійний ризик при виборі та експлуатації ЗІЗОД визначається мультиплікативним поєднанням п'яти взаємопов'язаних складових: ймовірності помилкових дій працівника ($1-R$), експлуатаційного ризику (RPN), оберненої захисної ефективності ($1/K_{зр}$), оберненого відносного індексу прогнозованого часу захисної дії фільтра ($1/T_{*зах}$) та відносного економічного індексу (F^*), що дозволяє кількісно оцінювати інтегральний професійний ризик (IPR) як добуток зазначених факторів.

2. Запропоновано здійснювати оцінку деструктивного впливу мікроклімату підмаскового простору на функціональну надійність працівника через інтенсивні фізичні навантаження, зростання опору фільтрувальних елементів, збільшення підсмоктування нефільтрованого повітря через нещільності смуги обтюрації та накопичення вологи у підмасковому просторі респіратора та визначні лінійні коригувальні коефіцієнти які дозволяють врахувати вплив цих чинників.

3. Запропонований новий методологічний підхід до вибору ЗІЗ органів дихання працівників, який полягає в одночасному врахуванні витрат на закупівлю та обслуговування респіраторів та втрат пов'язаних з їх використанням у тому числі економічних наслідків подій, пов'язаних із виникненням професійних захворювань пилової етіології, економічних наслідків, пов'язаних зі зниженням продуктивності працівників при використанні ЗІЗ та економічних наслідки нещасних випадків, пов'язаних із використанням ЗІЗ.

4. Удосконалені математичні моделі оцінювання захисної ефективності ЗІЗОД та прогнозування ресурсу захисної дії фільтрувальних елементів, що на відміну від існуючих номінальних розрахунків, враховують реальні умови експлуатації через оцінювання параметрів дихального процесу працівника, концентрацію шкідливих речовин, характеристики сорбційного матеріалу та динаміку навантаження.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні науково-методичного забезпечення ризик-орієнтованого вибору та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання, яке може бути використане на промислових підприємствах для підвищення рівня безпеки праці, зниження професійних ризиків та вдосконалення систем управління охороною праці.

Розроблений алгоритм комплексного оцінювання альтернативних варіантів ЗІЗОД з урахуванням показників надійності людини, експлуатаційних ризиків, захисної ефективності, прогнозованого ресурсу захисної дії фільтрів та економічних критеріїв, що забезпечує підвищення обґрунтованості прийняття рішень щодо вибору засобів захисту в конкретних виробничих умовах.

Запропонований алгоритм оцінювання експлуатаційних ризиків ЗІЗОД на основі інтеграції методів HAZOP та FMEA, а також розроблене на її основі «Положення про ідентифікацію невідповідностей та розрахунок пріоритетного числа ризику засобів індивідуального захисту працівників» можуть бути впроваджені в систему управління охороною праці підприємства.

Удосконалено конструктивні елементи фільтрувального респіратора: локальна перфорація обтюратора в зоні перенісся та щік забезпечує зниження коефіцієнта проникнення аерозолю на 65-68 % порівняно зі стандартною конструкцією, а впровадження вставок-індикаторів контролю натягу ремінців дозволяє візуально підтримувати оптимальну силу натягу (5-6 Н).

Практичне значення мають також результати економічного обґрунтування вибору ЗІЗОД, які дозволяють враховувати не лише витрати на придбання засобів захисту, а й експлуатаційні витрати, вплив засобів захисту на продуктивність праці та можливі економічні наслідки професійних захворювань.

Впровадження результатів роботи. Теоретичні та практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені в навчальний процес

кафедри охорони праці та цивільної безпеки НТУ «Дніпровська політехніка» при підготовці здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальностей 263 Цивільна безпека за освітньою програмою «Цивільна безпека» та 184 Гірництво за освітньою програмою «Охорона праці» під час вивчення дисциплін «Проектування засобів колективного та індивідуального захисту працюючих», «Сучасні засоби індивідуального захисту працюючих» та «Проектування технічних засобів та заходів безпеки».

Результати роботи впроваджено на виробництві засобів індивідуального захисту органів дихання у ТОВ НВП «СТАНДАРТ».

Обґрунтування і достовірність наукових положень, висновків рекомендацій підтверджується коректністю постановки і вирішення задач та використанням достовірних вихідних даних, які отримані за результатами теоретичних і експериментальних досліджень; використанням сучасного, апробованого математичного апарату; обґрунтованим коректним вибором використаних загальних показників і критеріїв математичних моделей; збігом результатів теоретичних і експериментальних досліджень з невизначеністю вимірювань, яка не перевищує 15 %; результатами дослідно-конструктивних розробок півмасок та фільтрувальних коробок, досвідом практичного втілення пропозицій з розробки конструкцій півмасок; результатами експериментальних випробувань удосконалених конструкцій респіраторів та нових, що пропонуються, наявністю ясного фізичного трактування отриманих результатів та впровадженням результатів роботи.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є самостійно виконаним науковим дослідженням, у якому викладено авторський підхід до вирішення актуального науково-прикладного завдання інтегральної оцінки професійних ризиків при виборі та експлуатації засобів індивідуального захисту. У дисертації не використано наукових ідей, результатів або розробок співавторів без відповідних посилань на джерела їх опублікування. Особистий внесок автора в наукові праці, опубліковані у співавторстві, полягає у

постановці окремих завдань дослідження, розробленні теоретичних положень, виконанні розрахунків, аналізі та узагальненні отриманих результатів.

Внесок автора в роботи, опубліковані у співавторстві полягає у:

- систематизації та узагальненні наукових підходів до класифікації засобів індивідуального захисту органів дихання, визначенні основних ознак класифікації та формуванні ієрархічної структури ЗІЗОД [1];
- розробці математичних залежностей для економічного обґрунтування вибору ЗІЗОД, зокрема оцінюванні витрат на придбання та експлуатацію, економічних наслідків професійних захворювань та втрат продуктивності праці [2,5];
- удосконаленні математичної моделі розрахунку коефіцієнта захисту фільтрувального респіратора шляхом урахування динаміки дихального циклу та осадження аерозольних частинок у підмасковому просторі [3];
- адаптації методів HAZOP та FMEA для ідентифікації та оцінювання експлуатаційних ризиків ЗІЗОД, розробці методики розрахунку пріоритетного числа ризику (RPN) та створенні нормативно-методичного забезпечення (Положення) для практичного впровадження [4,7];
- розробці модифікованої моделі оцінювання надійності людини на основі методу SPAR-H із урахуванням параметрів підмаскового простору (температури, вологості) та фізіологічного навантаження (частоти пульсу), проведенні експериментальних досліджень та статистичній обробці результатів [6];
- дослідженні впливу конструктивних параметрів обтюратора та системи кріплення на ізоляційні властивості фільтрувальних респіраторів, зокрема обґрунтуванні локальної перфорації обтюратора та оптимізації еластичності ремінців [8,9].

Апробація результатів роботи. Результати дисертаційного дослідження були представлені на всеукраїнських і міжнародних

конференціях: Молодь: наука та інновації (м. Дніпро, 23-25 листопада 2022 р.); Актуальні питання науки, освіти та технологій (м. Біла Церква, 26 листопада 2022 р.); Наукова весна (м. Дніпро, 1-3 березня 2023 р.); Актуальні проблеми та перспективи розвитку охорони праці, безпеки життєдіяльності та цивільного захисту (м. Одеса, 4-5 травня 2023 р.); Міжнародний форум «Безпечна, комфортна, спроможна, територіальна громада» (м. Дніпро, 11-13 жовтня 2023 р.); Молодь: наука та інновації (м. Дніпро, 22-24 листопада 2023 р.); Міжнародні економічні відносини. Сталий розвиток України в умовах глобалізації та Європейської економічної інтеграції: проблеми, перспективи, ефективність. ФЕНІКС-2023 (м. Харків, 19 грудня 2023 р.); Наукова весна (м. Дніпро, 27-29 березня 2024 р.); Міжнародний форум «Безпечна, комфортна, спроможна, територіальна громада» (м. Дніпро, 16-18 жовтня 2024 р.); Молодь: наука та інновації (м. Дніпро, 13-15 листопада 2024 р.); Наукова весна (м. Дніпро, 26-28 березня 2025 р.); Охорона праці: освіта і практика. Проблеми та перспективи розвитку охорони праці (м. Львів, травень 2025 р.); Українська школа гірничої інженерії (Східниця, 29.09-04.10.2025 р.); Проблеми екології та енергозбереження (м. Миколаїв, 23-24 жовтня 2025 р.); Міжнародний форум: безпечна, комфортна та спроможна територіальна громада (м. Дніпро, 15-17 жовтня 2025 р.); Наукова весна (м. Дніпро, 4-6 березня 2026 р.).

Публікації. Основні положення та результати дисертаційного дослідження відображені у 25 наукових працях, серед яких статті у наукових фахових виданнях України, статті у зарубіжних наукових виданнях та тези доповідей міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференцій. Опубліковані праці висвітлюють результати досліджень щодо оцінювання надійності людини при експлуатації ЗІЗОД, ідентифікації та аналізу експлуатаційних ризиків, прогнозування захисних властивостей засобів індивідуального захисту органів дихання, економічного обґрунтування їх вибору та розроблення інтегральної моделі оцінки професійних ризиків.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 340 сторінок, з них 263 сторінок – основний текст, 63 таблиці, 13 рисунків, 2 додатки, список використаних джерел становить 211 найменування, з яких 154 англійською мовою.

Під час підготовки дисертаційної роботи використовувалися інструменти штучного інтелекту (ChatGPT) виключно як допоміжні засоби для покращення стилістичного оформлення окремих фрагментів тексту, підвищення зрозумілості викладу матеріалу та графічної візуалізації окремих схем і рисунків. Штучний інтелект не використовувався для проведення наукових досліджень, отримання результатів, аналізу даних, формування висновків або розроблення наукових положень, що виносяться на захист. Усі наукові результати, методичні підходи, моделі, розрахунки, інтерпретація отриманих даних та висновки є результатом самостійної роботи автора.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ОЦІНКИ ПРОФЕСІЙНИХ РИЗИКІВ ПРИ ВИБОРІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗІЗ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Сутність, класифікація та особливості професійних ризиків у сфері охорони праці

У сучасних умовах розвитку виробництва забезпечення безпеки праці виступає фундаментом сталого функціонування будь-якої промислової системи. Попри інтенсивну автоматизацію та впровадження досконалих технічних засобів захисту, виробниче середовище залишається джерелом потенційних загроз, генерованих комплексом небезпечних та шкідливих чинників. У таких умовах центральною категорією системи управління охороною праці стає професійний ризик.

Професійний ризик є центральним поняттям сучасної системи управління охороною праці. Згідно з ISO 45001:2018 (п. 3.21), професійний ризик визначається як поєднання ймовірності виникнення небезпечної події або впливу та тяжкості її наслідків для здоров'я і життя працівника [1]. Аналогічне визначення наводить ISO 31000:2018, де ризик розглядається як «ефект невизначеності на цілі» [2].

У межах дисертаційного дослідження ризик розглядається не як статична величина, а як динамічна багатофакторна характеристика, що постійно змінюється під впливом виробничих факторів, конструктивних особливостей засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД) та психофізіологічного стану працівника.

Сутність професійного ризику полягає в тому, що він не є лише ймовірністю нещасного випадку чи захворювання. Це системне явище, яке включає:

- джерело небезпеки (шкідливий або небезпечний виробничий фактор);

- експозицію (інтенсивність і тривалість впливу);;
- вразливість працівника (індивідуальні антропометричні, фізіологічні та психологічні особливості);
- ефективність захисних заходів, зокрема ЗІЗОД [2].

При використанні ЗІЗОД ризик не усувається повністю, а лише трансформується. Замість прямого впливу шкідливих речовин виникають нові ризики, а саме просочування забрудненого повітря через нещільне прилягання обтюратора, підвищення фізіологічного навантаження через опір диханню, тепловий дискомфорт під маскою, зниження уваги та зростання ймовірності помилкових дій.

Для системного аналізу професійні ризики класифікують за кількома критеріями (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Основні види професійних ризиків при використанні ЗІЗОД

Вид ризику	Характеристика фактора	Приклади в промисловості	Особливості при використанні ЗІЗОД
Фізичні	Пил, шум, вібрація, теплове навантаження	Запиленість у шахтах	Збільшення опору диханню, тепловий стрес під маскою
Хімічні	Токсичні гази, пари, аерозолі	Метан, СО, кремнієвий пил	Просочування через обтюратор, отруєння
Біологічні	Мікроорганізми, продукти їх життєдіяльності	У вологих виробках	Ризик інфекцій при тривалому носінні вологих ЗІЗ
Ергономічні	Дискомфорт, обмеження рухів	Тривале носіння респіратора	Втома, біль у шії, зниження концентрації
Психофізіологічні	Стрес, втома, зниження уваги	Психологічний тиск від дискомфорту	Зростання ймовірності помилок (людський фактор)

Джерело: Класифікація професійних ризиків проведена з урахуванням вимог ISO 45001:2018, ДСТУ 2293:2014 [1,3].

Отже, хоча стандартний поділ ризиків за типом шкідливого фактора є базовим, він не дає повної картини при виборі засобів захисту та є недостатнім для комплексної оцінки ризиків при використанні ЗІЗОД. Додатково, важливим етапом розвитку класифікації стало створення нової ієрархічної

класифікації самих ЗІЗОД [4], яка систематизує засоби захисту за функціональним призначенням, ефективністю, санітарними вимогами, способом подачі повітря та конструктивними особливостями (табл.1.2).

Таблиця 1.2

Класифікація засобів індивідуального захисту органів дихання за [4]

Рівень класифікації	Назва рівня	Основні ознаки класифікації	Приклади маркування / типи
Відділ	Фільтруючі	Засоби, що очищають вдихуване повітря через фільтруючі елементи	Ф
Підвідділ	За функціональним призначенням	Протиаерозольні (захищають від твердих і рідких аеродисперсних частинок)	P (S, SL)
		Протигазові (захищають від токсичних газів і парів)	A, B, E, AX, NO, SX
		Газопилозахисні (комбіновані, захищають від аеродисперсних твердих і рідких частинок, токсичних газів і парів)	P, гази і пари
Група	За ефективністю захисту	Низька (до 4 ГДК)	1
		Середня (до 12 ГДК)	2
		Висока (до 50 ГДК)	3
Підгрупа	За санітарними вимогами	Одноразові (з фільтруючою півмаскою)	О
		Багаторазові (з фільтрами або патронами, що замінюються)	Б
Вид	За способом надходження повітря	Природний (самовсмоктувальний)	П
		Примусовий	ПР
Підвид	З урахуванням вимог щодо ергономічності і забезпечення безпечної праці користувачів при експлуатації респіраторів, зокрема:	Масок (повнолицевих, півмасок, четверть масок, у тому числі з пристроями для переговорів)	М, ПМ, ЧМ
		Фільтрів	Одн, Бгр
		Клапанних, безклапанних	К, БК
Різновид	З урахуванням досконалості конструкції респіраторів або/їх складових щодо фізіологічних вимог	Каркасів, конвертів, складчастості, еластомерності	К, KB, СК, Е
		Обтюраторів (одно- і двоскладчастих, з U-подібною складкою, надувних)	O1, O2, OU, Н
		Клапанів видиху (грибкових, дискових, пелюсткових)	КГ, КД, КП
		Наголів'я (одно- і двосмужкового)	Н1, Н2

Вона дозволяє системно розподіляти всі існуючі засоби захисту за спільними характеристиками від вищих рівнів (відділ) до нижчих (різновид) та враховує функціональне призначення, ефективність, ергономічність та конструктивні особливості.

Це компактна ієрархічна таблиця з окремими рядками для кожного рівня, що чітко показує ієрархію (від вищого рівня до нижчого). Повні назви та короткий опис ознаки наведено для пояснення і кращого розуміння.

Запропонована класифікація є важливою для даного дослідження, оскільки дозволяє системно пов'язати конструктивні особливості ЗІЗОД з рівнем професійного ризику, що виникає під час їх експлуатації. Вона враховує не лише захисну здатність, а й ергономічні та фізіологічні аспекти, що безпосередньо впливає на надійність працівника R та загальний інтегральний професійний ризик IPR.

Для більш повного врахування специфіки ризиків саме при виборі та експлуатації ЗІЗОД розроблено розширену класифікацію професійних ризиків при їх використанні (табл. 1.3).

На відміну від традиційних класифікацій, які переважно розглядають ризики за видом шкідливого фактора, запропонована розширена класифікація є поєднанням нормативних вимог міжнародних стандартів, практичних інструментів «Положення про ідентифікацію невідповідностей та розрахунок пріоритетного числа ризику засобів індивідуального захисту працівників» та емпіричних даних наукових робіт. Вона акцентує увагу на специфіці ризиків саме при виборі та експлуатації ЗІЗОД. Особливо актуальними для теми роботи є ризики на етапі експлуатації (динамічні), за типом елементів ЗІЗОД (обтюрація, кріплення) та психофізіологічні ризики, оскільки саме вони найменш враховуються традиційними методами оцінки. Такий підхід дозволяє чітко ідентифікувати, що значна частина ризиків (особливо конструктивних і динамічних) проявляється саме на етапі експлуатації і недостатньо враховується традиційними статичними методами оцінки. Це безпосередньо обґрунтовує наукову задачу даної роботи – розробку інтегральної моделі оцінки професійних ризиків, яка поєднує технічні, фізіологічні, ергономічні та економічні складові.

Таблиця 1.3

Розширена класифікація професійних ризиків при використанні ЗІЗОД

Критерій класифікації	Види ризиків	Приклади застосування ЗІЗОД у реальних умовах
1. За джерелом небезпеки	Виробничі, організаційні, поведінкові, конструктивні	Пиловий (виробничі) – перевищення ГДК пилу (концентрація > 10 мг/м³) Неправильне зберігання респіраторів на складі (організаційні) Відмова від ЗІЗ через дискомфорт (поведінкові) Просочування через зморшки обтюратора (конструктивний) (58-84 % випадків)
2. За рівнем впливу	Індивідуальний, колективний, прийнятний/неприйнятний	Індивідуальний ризик просочування через антропометрію конкретного обличчя працівника (збільшення ризику пневмокніозу на 20-30 %) Колективний – у бригаді шахтарів при спільному використанні одного типу респіраторів Неприйнятний – RPN > 140
3. За характером наслідків	Травматичні, професійні захворювання, комбіновані, психофізіологічні	Травматичні – гострі травми, нещасні випадки (раптові) Професійні – захворювання хронічні (пневмокніоз, силікоз тощо) Комбіновані – поєднання гострої травми та хронічного захворювання. Психофізіологічні – зниження уваги, втома, стрес, помилки
4. За характером оцінки	Статичні, динамічні	Статичний – паспортний клас захисту фільтра Динамічний – зростання просочування після 8-10 циклів використання ремінців (збільшення на 38-74 %)
5. За етапом життєвого циклу ЗІЗ	Ризики на етапі вибору, експлуатації, утилізації	Етап вибору – неправильний розмір респіратора через відсутність антропометричних таблиць Етап експлуатації – ослаблення еластичності ремінців після 10 циклів Етап утилізації – забруднення фільтрів пилом і ризик вторинного забруднення
6. За можливістю керування	Керовані, частково керовані, некеровані	Керовані – перфорація обтюратора для адаптації до обличчя Частково керовані – психофізіологічний стан працівника (втома) Некеровані – раптовий стрибок концентрації пилу
7. За ступенем впливу на працівника	Фізіологічні, психологічні, економічні	Фізіологічні (підвищення температури під маскою) Психологічні (дискомфорт → відмова від ЗІЗ) Економічні (втрати від захворювань і простоїв)
8. За типом ЗІЗ та його елементів	Ризики обтюратора, кріплення, фільтруючого елемента, загальні	Просочування через обтюратор (58-84 % випадків), ослаблення ремінців, забивання фільтра пилом

Джерело: сформовано автором на основі даних [1,2], (додатку А), а також праць [4,5,7,9,12] та міжнародних досліджень [6,8]

Розширена класифікація ризиків ЗІЗОД сформована на основі поєднання міжнародних стандартів та українських наукових розробок. ISO 45001:2018 та ISO 31000:2018 заклали базові принципи. Перший стандарт визначає ризик як «поєднання ймовірності та наслідків» і вимагає його оцінки на всіх етапах життєвого циклу, а другий вводить поняття «джерело ризику», «контекст» і «критерії прийнятності». Саме з цих стандартів запозичено класифікацію за рівнем впливу (індивідуальний/колективний) та за можливістю керування (керовані/некеровані) [1,2].

Положення про ідентифікацію невідповідностей та розрахунок пріоритетного числа ризику засобів індивідуального захисту працівників стало ключовим українським джерелом для класифікації за характером оцінки (статичні/динамічні) та за етапом життєвого циклу. У документі вперше для ЗІЗ детально описано $RPN = S \times O \times D$, терміни «невідповідність», «зацікавлена сторона», відповідальність сторін та додатки (матриця ризиків, критерії оцінки, карта ідентифікації). Саме тут ризик поділено на неприйнятний (>140 балів), прийнятний з перевіркою та прийнятний, що безпосередньо лягло в основу класифікації за рівнем впливу (додаток А).

Роботи [4,5,7,9,12] суттєво розширили класифікацію за типом ЗІЗ та його елементів. У статті [7] введено коефіцієнти K_T , K_H , K_R , що дозволило виділити психофізіологічні ризики як окремий клас. У працях [5,9] ризик поділено на поведінковий та економічний, а в дослідженні [4] – на ризики обтюрації та кріплення. Ці праці вперше пов'язали конструктивні елементи ЗІЗ (обтюратор, ремінці) з динамічними ризиками експлуатації.

Міжнародні дослідження доповнили класифікацію емпіричними даними. Як показали класичні дослідження [10,11], значна частина витоків через смугу обтюрації напівмасок респіраторів припадає на зону перенісся та підборіддя, що підтверджується пізнішими роботами [6]. Ці науковці кількісно обґрунтували ризики обтюрації (58-84 % просочування в зоні носа та щік), що дозволило виділити конструктивний ризик як самостійний клас. Дослідження [8] експериментально довели динамічний характер ризиків кріплення

(зростання просочування на 38-74 % після 8-10 циклів), що стало основою для класифікації за етапом життєвого циклу ЗІЗ.

У сучасній науковій літературі [7,12] підкреслюється, що найбільшу небезпеку становлять саме динамічні ризики при експлуатації ЗІЗОД, оскільки вони змінюються в часі (зниження еластичності ремінців після 8-10 циклів надягання/знімання, зростання теплового навантаження під маскою, втома працівника). Саме ці ризики найменш враховуються в традиційних матрицях і вимагають інтегральної оцінки, яка є основним об'єктом дисертаційного дослідження.

Особливо важливою для теми дисертації є класифікація за етапом життєвого циклу ЗІЗ та за типом елементів (обтюрація, кріплення). Саме на цих етапах ризик стає динамічним і найменш контрольованим традиційними методами. Наприклад, статичний ризик паспортного класу захисту фільтра (етап вибору) трансформується в динамічний ризик просочування після кількох циклів використання ремінців (етап експлуатації), що підтверджується експериментальними даними [6,8].

Таким чином, сутність професійного ризику в охороні праці полягає в його багатофакторній і динамічній природі. Класифікація ризиків та ЗІЗОД показує, що при використанні ЗІЗ ризик не усувається повністю, а трансформується залежно від конструктивних, експлуатаційних та індивідуальних факторів. Класифікація ризиків за різними критеріями дозволяє не лише систематизувати їх, але й визначити пріоритетні напрямки управління, а розширена класифікація ризиків ЗІЗ дозволяє перейти від аналізу окремих факторів до комплексної інтегральної оцінки, яка враховує взаємодію конструктивних, експлуатаційних і людських чинників. Це обґрунтовує необхідність подальшого аналізу існуючих методів оцінки ризиків (п. 1.3) та ролі ЗІЗОД у зниженні ризиків (п. 1.4).

Розглянуті класифікації ризиків та особливості їх прояви при експлуатації ЗІЗОД свідчать, що ризик не зникає після видачі ЗІЗ працівнику,

а набуває нових форм і продовжує існувати протягом усього періоду використання засобів захисту.

Наслідки впливу професійних ризиків за характером своєї дії поділяються на три основні категорії: гострі, хронічні та комбіновані. До гострих наслідків належать раптові ураження організму, такі як виробничі травми (порізи, опіки), гострі отруєння або теплові удари, що виникають внаслідок короткочасного, але інтенсивного впливу небезпечного чинника. У гірництві найчастіше трапляються гостре отруєння чадним газом або пиловий шок. Хронічні наслідки формуються тривалий час і проявляються у вигляді професійних захворювань легень, зокрема силікозу, антракозу чи пневмоконіозу, а також хронічні отруєння, зниження слуху, захворювання шкіри. Своєю чергою, комбіновані наслідки мають складну природу і характеризуються одночасним поєднанням фізичного і психофізіологічного впливу – зниження уваги, зростання ймовірності аварій через втому від респіратора працівника [13].

Особливо небезпечними є наслідки при неправильному використанні ЗІЗОД. Навіть при високому класі захисту фільтра просочування через обтюратор може призвести до хронічного накопичення пилу в легенях, що з часом призводить до розвитку пневмоконіозу та інвалідності. Як показали класичні дослідження [10,11] та сучасні роботи [6], від 58 % до 84 % витоків припадає саме на зону обтюратора, що значно знижує реальний захисний ефект респіратора.

За даними Державної служби України з питань праці та Центру громадського здоров'я МОЗ України, у 2025 році пилові захворювання органів дихання продовжували становити значну частку професійної захворюваності в гірничодобувній галузі. Понад 70 % професійних захворювань у гірничій галузі це саме пилові патології легень [14,15].

Аналіз причин виробничого травматизму показує, що значна частина нещасних випадків пов'язана з неправильним використанням або зниженням ефективності ЗІЗОД через їх конструктивні та експлуатаційні недоліки [14,16].

Автори [16] виділяють три основні категорії причин: технічні, організаційні (домінують 57-80 %) та санітарно-гігієнічні. Вони підкреслюють, що поєднання цих факторів часто спричиняє нещасні випадки, а ефективне запобігання вимагає комплексного підходу, включаючи технічні заходи (модернізація обладнання, використання ЗІЗ), організаційні (навчання, контроль) та санітарно-гігієнічні (вентиляція, медичні огляди). Цей аналіз безпосередньо показує, як трансформація ризиків через неправильне застосування ЗІЗ призводить до зростання травматизму, що обґрунтовує необхідність переходу до розгляду ролі самих засобів індивідуального захисту у зниженні цих ризиків (п. 1.4).

Таким чином, сутність професійного ризику при роботі в умовах використання ЗІЗОД полягає в його багатофакторній, динамічній і трансформаційній природі. Ризик не усувається, а лише змінює свою форму. Традиційні підходи до оцінки ризику, які не враховують взаємодію конструктивних особливостей ЗІЗ, фізіологічного стану працівника та умов експлуатації, є недостатніми. Розглянуті класифікації створюють необхідне теоретичне підґрунтя для подальшого аналізу нормативно-правової бази, ролі ЗІЗОД в ієрархії заходів контролю ризиків та розробки інтегральної моделі їх оцінки, яка буде враховувати всі види ризиків і їх наслідки.

1.2. Нормативно-правова база оцінки професійних ризиків та забезпечення ЗІЗОД в Україні та світі

Нормативно-правова база оцінки професійних ризиків та забезпечення ЗІЗОД формується на трьох рівнях: міжнародному, європейському та національному. Вона визначає принципи управління ризиками, вимоги до вибору, використання та обслуговування ЗІЗОД. Порівняння основних нормативних документів України та світу в сфері оцінки ризиків і забезпечення ЗІЗОД та зарубіжний досвід інтегральної оцінки ризиків при управлінні ЗІЗ наведені відповідно у табл. 1.4. та табл. 1.5.

Таблиця 1.4

**Порівняння основних нормативних документів України та світу в
сфері оцінки ризиків і забезпечення ЗІЗОД**

Документ	Рівень	Основний акцент	Вимоги до ЗІЗОД	Обов'язковість	Основні недоліки / прогалини
ISO 45001:2018 [1]	Міжнародний	Система управління ОН&S	Ризик-орієнтований підхід, ієрархія контролю	Добровільний	Не містить детальних технічних вимог до ЗІЗОД
ISO 31000:2018 [2]	Міжнародний	Загальне управління ризиками	Процес оцінки ризиків	Добровільний	Надто загальний, без специфіки ЗІЗОД
ISO/TS 16975 та ISO 17420 [17,18]	Міжнародний	Комплексна програма респіраторного захисту	Fit-testing, селекція, обслуговування	Добровільний	Добровільні, потребують національної адаптації
EN 529:2005 / ДСТУ EN 529:2006 [19]	ЄС / Україна	Вибір, використання, догляд ЗІЗОД	Рекомендації з fit, обслуговування	Рекомендаційний	Рекомендаційний характер, недостатньо динамічних ризиків
Закон України «Про охорону праці» [21]	Національний	Загальні обов'язки роботодавця Висока юридична сила, обов'язковість	Забезпечення ЗІЗ та оцінка ризиків	Обов'язковий	Загальні положення, брак конкретики щодо ЗІЗОД
НПАОП 0.00-1.04-07 [22]	Національний	Правила вибору та застосування ЗІЗОД	Алгоритми вибору в українських умовах	Обов'язковий	Застарілі в частині динамічних та експлуатаційних ризиків, слабе врахування людського фактора
ДСТУ EN ІЕС 31010:2022 [23]	Національний	Набір сучасних методів оцінки ризику	Не містить прямих технічних вимог. Використовується для оцінки ризиків ЗІЗОД	Рекомендаційний (добровільний)	Не адаптовані спеціально до ЗІЗОД

Джерело: проаналізовано та сформовано автором на підставі [1,2,17-19,21-23]

Таблиця 1.5

Зарубіжний досвід інтегральної оцінки ризиків при управлінні ЗІЗ

Країна	Ключові моделі та підходи	Особливості
США	OSHA Respiratory Protection Standard, NIOSH, Assigned Protection Factors (APF), HRA	Строгий медичний контроль і щорічний fit-testing
ЄС	EN 529, ISO 17420, ISO/TS 16975	Гармонізовані стандарти, акцент на програму респіраторного захисту
Австралія	AS/NZS 1715 та AS/NZS ISO 16975	Адаптація ISO з урахуванням місцевих ризиків
Китай, Іран	Національні адаптації ISO та елементи HRA	Поєднання технічного та людського факторів

Джерело: Узагальнено автором на основі [25-31]

На міжнародному рівні основою нормативно-правової бази є стандарти International Organization for Standardization (ISO).

Центральне місце посідає ISO 45001:2018 «Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування», який встановлює вимоги до системи управління охороною здоров'я та безпекою праці з обов'язковою оцінкою ризиків. Цей стандарт запроваджує ризик-орієнтований підхід до управління охороною праці, вимагає системної ідентифікації небезпек, оцінки професійних ризиків та застосування ієрархії заходів контролю, де засоби індивідуального захисту, зокрема ЗІЗОД, розглядаються як останній бар'єр захисту [1]. Незважаючи на свої безперечні переваги, ISO 45001:2018 має ряд суттєвих недоліків з оцінки професійних ризиків при експлуатації ЗІЗОД. Стандарт має загальний характер і не містить конкретних методик оцінки динамічних ризиків, пов'язаних із використанням засобів індивідуального захисту (зниження герметичності обтюратора, фізіологічне навантаження, вплив мікроклімату підмаскового простору). Крім того, він недостатньо враховує людський фактор, надійність працівника та економічні наслідки реалізації ризиків, що обмежує можливість створення на його основі повноцінної інтегральної моделі оцінки професійних ризиків.

Доповнює його ISO 31000:2018 «Управління ризиками. Настанови», який встановлює загальні принципи, структуру та процес управління ризиками (ідентифікація, аналіз, оцінювання та обробка), що визначає загальні принципи та рекомендації щодо управління ризиками. Цей стандарт є універсальним і служить методологічною основою для розробки галузевих підходів до оцінки ризиків [2]. ISO 31000:2018, хоча й встановлює загальні принципи та структуру управління ризиками, має ряд суттєвих недоліків при оцінці професійних ризиків при виборі та експлуатації ЗІЗОД. Стандарт носить надто загальний характер, не містить конкретних методів оцінки ризику, слабо враховує динамічні ризики експлуатації засобів індивідуального захисту, людський фактор та економічні наслідки реалізації ризиків. Відсутність галузевої специфіки та детальних інструментів обмежує можливість його прямого використання для створення інтегральної моделі оцінки ризиків ЗІЗОД.

Специфічно для ЗІЗОД найбільш актуальними є стандарти серії ISO 17420 та ISO/TS 16975. Це сучасні стандарти, що регламентують створення та впровадження комплексної програми респіраторного захисту (Respiratory Protective Device Programme), включаючи вимоги до селекції ЗІЗОД, перевірки прилягання (fit-testing), навчання працівників, періодичного обслуговування та моніторингу ефективності. Ці документи акцентують увагу не лише на технічних характеристиках фільтрів, а й на реальних умовах експлуатації та людському факторі [17,18]. Ці міжнародні стандарти хоча й представляють сучасний підхід до респіраторного захисту, також мають суттєві недоліки. Вони носять переважно загальний і лабораторно-орієнтований характер, недостатньо враховують динамічні ризики експлуатації ЗІЗОД (зниження герметичності обтюратора, деградацію матеріалів, вплив мікроклімату), слабо інтегрують людський фактор та фізіологічне навантаження на працівника. Крім того, через добровільність застосування та складність практичної реалізації ці стандарти часто залишаються на рівні рекомендацій і не завжди ефективно впроваджуються на підприємствах.

У Європейському Союзі ключовим документом є EN 529:2005 (в Україні ДСТУ EN 529:2006), який містить детальні рекомендації щодо вибору, використання, догляду та обслуговування ЗІЗОД [19]. Він є одним з основних національних документів щодо ЗІЗОД, також має ряд суттєвих недоліків. Прийнятий майже два десятиліття тому, він морально застарів і недостатньо враховує динамічні ризики експлуатації засобів індивідуального захисту (зниження герметичності обтюратора, деградацію матеріалів, теплове навантаження). Стандарт слабо інтегрує людський фактор, фізіологічні та ергономічні аспекти, а також не передбачає економічної оцінки ризиків. Через рекомендаційний характер його положення часто виконуються формально, що знижує ефективність захисту працівників. Цей стандарт гармонізований з Директивою 2016/425/EU щодо засобів індивідуального захисту [20].

В Україні базовими нормативними актами є Закон України «Про охорону праці» (1992, зі змінами), який встановлює загальні принципи забезпечення безпечних умов праці, обов'язковість оцінки ризиків і забезпечення працівників ЗІЗ, проте через значну застарілість та декларативність положень недостатньо регулює сучасні аспекти управління ризиками при експлуатації ЗІЗОД, зокрема динамічні ризики, людський фактор та інтегральну оцінку [21] та НПАОП 0.00-1.04-07 «Правила вибору та застосування засобів індивідуального захисту органів дихання», що є основним нормативним документом, що регулює вибір ЗІЗОД в Україні. Однак через застарілість (2007 рік) він зосереджений переважно на етапі вибору засобів захисту і слабо регулює ризики, що виникають під час їх тривалої експлуатації, не враховує динамічні зміни ефективності ЗІЗОД, фізіологічне навантаження та надійність працівника [22].

Доповнюють базу ДСТУ EN ІЕС 31010:2022 (методи оцінки ризику) [23] та Технічний регламент з підтвердження відповідності засобів індивідуального захисту (Постанова КМУ № 771) [24].

Незважаючи на свої сильні методологічні сторони, ДСТУ EN ІЕС 31010:2022 має ряд суттєвих прогалин у контексті оцінки професійних ризиків

при виборі та експлуатації ЗІЗОД. Стандарт носить загальний характер і не містить спеціалізованих методів оцінки динамічних ризиків, пов'язаних з експлуатацією засобів індивідуального захисту (зміна герметичності обтюратора, деградація матеріалів, вплив мікроклімату підмаскового простору). Крім того, він недостатньо враховує людський фактор, фізіологічне навантаження та економічні наслідки, що знижує його практичну цінність для створення інтегральної моделі оцінки ризиків [23].

Постанова КМУ № 771, яка затверджує Технічний регламент засобів індивідуального захисту, також має суттєві недоліки. Документ спрямований переважно на регулювання процедур розміщення ЗІЗ на ринку та їх сертифікацію, але практично не регулює етап експлуатації. Він не містить вимог щодо інтегральної оцінки ризиків, динамічних змін захисних властивостей ЗІЗОД, фізіологічного та ергономічного впливу на працівника, а також економічних наслідків використання засобів захисту. Це призводить до розриву між формальною відповідністю ЗІЗ нормативним вимогам та їх реальною ефективністю в умовах виробництва [24].

Таким чином, чинна нормативно-правова база, як міжнародна, так і національна, створює певне підґрунтя для управління професійними ризиками, проте більшість розглянутих нормативних документів мають спільні суттєві недоліки: вони носять загальний або рекомендаційний характер, недостатньо враховують динамічні ризики експлуатації ЗІЗОД, людський фактор, фізіологічне навантаження та економічні наслідки.

У зв'язку з цим значний інтерес становить зарубіжний досвід, зокрема підходи Сполучених Штатів Америки та Австралії/Нової Зеландії. Підхід Сполучених Штатів Америки вважається одним з найбільш розвинених у світі. Він базується на обов'язковому застосуванні OSHA Respiratory Protection Standard (29 CFR 1910.134), науково-технічній підтримці National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), використанні концепції Assigned Protection Factors (APF), а також методів оцінки надійності людини (Human Reliability Analysis – HRA) [25-28]. У Австралії та Новій Зеландії діють

національні стандарти AS/NZS 1715:2009 та нова серія AS/NZS ISO 16975, які поступово гармонізуються з міжнародними вимогами ISO. (табл.1.6).

Таблиця 1.6

Зарубіжний досвід інтегральної оцінки ризиків при управлінні ЗІЗОД
(США та Австралія/Нова Зеландія)

Документ / Підхід	Країна	Опис	Сильні сторони	Основні недоліки	Статус
OSHA Respiratory Protection Standard (29 CFR 1910.134) [25]	США	Основний обов'язковий стандарт США, який регулює весь цикл респіраторного захисту	Чіткі обов'язкові вимоги, детальна програма захисту, регулярний fit-testing	Висока бюрократичність, значні витрати на впровадження	Обов'язковий
NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) [26]	США	Науково-дослідний інститут, що займається тестуванням і сертифікацією ЗІЗОД	Високий науковий рівень, обов'язкова сертифікація (NIOSH Approved), розробка APF	Рекомендаційний статус для роботодавців	Науково-дослідний / рекомендаційний
Assigned Protection Factors (APF) [27]	США	Система присвоєння кількісних коефіцієнтів захисту різним типам респіраторів	Проста та практична система підбору ЗІЗОД	Часто переоцінює реальний захист у виробничих умовах	Рекомендаційно-обов'язковий
Human Reliability Analysis (HRA) [28]	США	Методи оцінки надійності людини при роботі в ЗІЗОД	Кількісна оцінка людського фактора	Складність застосування, висока залежність від експертних оцінок	Методологічний підхід
AS/NZS 1715:2009 [29,30]	Австралія/Нова Зеландія	Стандарт щодо вибору, використання та обслуговування ЗІЗОД	Добре деталізований національний стандарт	Застарілий (2009 рік), поступово замінюється	Рекомендаційний
AS/NZS ISO 16975 (серія) [31]	Австралія/Нова Зеландія	Адаптація міжнародних стандартів ISO 16975	Сучасний підхід, гармонізація з ISO, комплексна програма захисту	Перехідний період, ще не повністю впроваджений	Рекомендаційний

Джерело: сформовано автором на основі даних [25-31]

Наведений зарубіжний досвід демонструє різні моделі управління ризиками ЗІЗОД – від жорсткого обов’язкового регулювання, наукової підтримки, кількісних показників захисту та оцінки людського фактора в США до поступової гармонізації з міжнародними стандартами в Австралії. Водночас навіть найрозвиненіші системи мають певні обмеження чи недоліки, зокрема високу вартість впровадження та певні розбіжності між лабораторними даними та реальними умовами експлуатації.

Значний інтерес становить досвід країн Азії (табл.1.5). У Китаї діє обов’язковий національний стандарт GB 2626-2019 «Respiratory protection – Non-powered air-purifying particle respirator», який встановлює жорсткі технічні вимоги до фільтрувальних респіраторів, включаючи KN95. Цей стандарт є національною адаптацією сучасних міжнародних вимог і став обов’язковим для виробництва та використання респіраторів на території КНР [32].

В Ірані відсутній єдиний спеціалізований національний стандарт на ЗІЗОД порівнянний з китайським GB 2626-2019 (табл. 1.5). Країна активно застосовує національні адаптації стандартів ISO 45001, ISO 31000 та ISO 16975, а також використовує методи Human Reliability Analysis (HRA) при оцінці ризиків у нафтогазовій та хімічній промисловості. Іранський підхід поєднує елементи міжнародних стандартів з національними вимогами, проте залишається менш систематизованим порівняно з США чи Китаєм [33].

Українська нормативна база в цілому відповідає міжнародним підходам і є гармонізованою з європейськими стандартами. Однак вона також має суттєві прогалини: переважання статичних підходів до оцінки ризиків, недостатнє регулювання саме експлуатаційних ризиків (більшість документів зупиняються на етапі вибору), слабе врахування людського фактора (надійність працівника, вплив мікроклімату під маскою), майже повну відсутність економічної складової оцінки та відсутність єдиної інтегральної методики оцінки ризиків при експлуатації ЗІЗОД, яка б враховувала динамічні фактори, надійність людини та економічні наслідки. Зарубіжний досвід, особливо – США, ЄС та стандарти ISO 17420, ISO 16975, пропонують більш

сучасний і комплексний підхід через створення обов'язкової повноцінної програми респіраторного захисту, що може бути корисним для розвитку національного регулювання.

Таким чином, аналіз нормативно-правової бази показує, що існуючі підходи мають суттєві прогалини, які обґрунтовують необхідність розробки інтегральної моделі оцінки професійних ризиків при виборі та експлуатації ЗІЗОД.

1.3. Аналіз сучасних методів оцінки професійних ризиків при виборі та експлуатації ЗІЗОД

Аналіз нормативно-правової бази (п. 1.2) показав, що більшість стандартів і норм (ISO 45001:2018, ISO 31010:2018, НПАОП 0.00-1.04-07, ДСТУ EN 529:2006) вимагають проведення оцінки ризиків, але не пропонують єдиної інтегральної методики, адаптованої саме до вибору та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання. У зв'язку з цим виникає необхідність проаналізувати сучасні методи оцінки ризиків, їх можливості та обмеження відповідно до цілей і завдань дисертаційного дослідження.

У сучасному ризик-менеджменті ефективність системи управління безпекою праці безпосередньо залежить від методологічно обґрунтованого вибору інструментів аналізу. Згідно з базовим стандартом ISO 31000:2018 та профільним довідником ДСТУ EN ІЕС 31010:2022, першочерговим етапом є класифікація загрози за її типом (стратегічна, операційна чи технічна), що дозволяє чітко окреслити її природу та межі. Лише після визначення специфіки ризику та оцінки доступного масиву вхідних даних здійснюється перехід до другої класифікаційної ланки – вибору характеру самого методу. Такий послідовний підхід забезпечує максимальну точність інтегральної оцінки, що є критично важливим під час вирішення прикладних інженерних завдань, зокрема оцінювання професійних ризиків при виборі та експлуатації ЗІЗОД [2,23].

Методи управління ризиками тісно пов'язані з типами ризиків, оскільки різні категорії ризиків (технічні, стратегічні, операційні) вимагають різних підходів до їх ідентифікації, аналізу та мінімізації.

Технічні та технологічні ризики пов'язані з відмовами обладнання, складними інженерними системами, технологічними процесами та безпекою праці, включаючи експлуатацію ЗІЗ. Тут зазвичай є логіка причинно-наслідкових зв'язків, а також статистичні дані щодо відмов або вимірювані параметри (концентрації часток, робочі температури). Це вимагає методів, які дозволяють детально розкласти систему на компоненти та простежити ланцюг подій від першопричини до наслідків. Перевага надається кількісним та напівкількісним методам.

Стратегічні ризики впливають на життєздатність організації в цілому. Це зміна нормативно-правової бази, ринкової кон'юнктури, репутаційні втрати, глобальні зміни в галузі. Високий рівень невизначеності, брак точної статистики, довгострокова перспектива, числові розрахунки часто неможливі або є надто приблизними, пріоритет віддається якісним методам, що базуються на залученні широкого кола експертів, формуванні бачення майбутнього та сценарному плануванні.

Операційні ризики пов'язані з процесами та людським фактором. Це ризики збоїв у повсякденній діяльності підприємства, що виникають через помилки персоналу, порушення регламентів, збої в управлінні або внутрішніх комунікаціях. Головна складова тут - «людський фактор» та організаційні процедури. Оцінити їх суто математично складно, оскільки поведінка людини та організаційне середовище мають високу міру невизначеності. За стандартом використовуються методи аналізу надійності людини, бар'єрного аналізу та аналізу сценаріїв «що, якщо». Фокус зміщується на виявлення слабких місць у процедурах та захисних бар'єрах [23].

Узагальнююча таблиця зв'язку методів та типів ризиків (за ДСТУ EN ІЕС 31010:2022) наведена у табл. 1.7.

Таблиця 1.7

Узагальнююча таблиця зв'язку методів та типів ризиків

Категорія ризику	Характер невизначеності та даних	Рекомендований характер методу	Конкретні методи	Приклад застосування
Технічні та технологічні ризики	Чітка логіка відмов, наявність технічних параметрів, фізичних вимірів або статистики	Переважно кількісні та деталізовані напівкількісні	FTA (Аналіз дерева помилок), ETA (Аналіз дерева подій), FMEA / FMESA (Аналіз видів і наслідків відмов), HAZOP (Аналіз небезпеки та працездатності)	Оцінка надійності системи фільтрації в респіраторх важкого типу в умовах високої запиленості Аналіз ризику відмови обладнання
Стратегічні ризики	Висока невизначеність, динамічне зовнішнє середовище, майже повна відсутність числової статистики	Переважно якісні (експертні)	Scenario analysis (Аналіз сценаріїв), SWIFT (Структурований аналіз «що, якщо»), Метод Дельфі (Delphi), Brainstorming (Мозковий штурм)	Обґрунтування переходу підприємства з реактивної моделі управління безпекою на проактивну Аналіз ризиків зміни національних стандартів з охорони праці
Операційні ризики та людський фактор	Поєднання регламентованих процесів із суб'єктивними діями персоналу; середня автоматизація	Гібридні (напівкількісні) та інженерно-процедурні	Метод Файна-Кінні (Fine-Kinney), Bow-tie (Аналіз «галстук-метелик»), HRA (Аналіз надійності людини), LOPA (Аналіз шарів захисту)	Оцінка ймовірності нехтування працівниками правил використання ЗІЗ Аналіз ефективності профілактичних заходів на робочих місцях

Джерело: сформовано автором на основі даних [23]

Сучасні методи оцінки професійних ризиків можна класифікувати на три основні групи: якісні (qualitative), кількісні (quantitative) та гібридні або напівкількісні (semi-quantitative). Це класичний підхід у ризик-менеджменті, який базується на характері вхідних даних, способі їх обробки та формі вираження кінцевого результату. Основним міжнародним документом, який

закріплює цей поділ та описує конкретні методи для кожної категорії, є стандарт IEC/ISO 31010:2019 «Risk management – Risk assessment techniques» [23]. Це основний профільний стандарт-довідник. Саме в ньому наведено класифікацію десятків методів (від HAZOP та FTA до методу Файна-Кінні) та зазначено, які з них є якісними, кількісними чи змішаними (напівкількісними). Також, не менш важливим документом у цій сфері є ISO 31000:2018 «Risk management – Guidelines», який задає загальну рамку, принципи та загальний процес оцінки ризиків (ідентифікація, аналіз, оцінювання) [2,23].

Якісні методи ґрунтуються на експертних оцінках, матрицях та описовому аналізі. Серед усього розмаїття якісних методів у вітчизняній та закордонній практиці найбільше поширення здобули такі підходи [34-36]:

- матричні методи (Risk Matrix) – вони є базовими та найбільш затребуваними як в Україні, так і в міжнародній практиці, зокрема, у класичному п'ятикроковому підході Британського інституту охорони праці – HSE [37]. Він включає ідентифікацію небезпек, визначення осіб, які можуть постраждати, оцінку ризиків, впровадження заходів контролю та періодичний перегляд. Методологію побудови таких матриць адаптовано та детально описано у «Положенні про ідентифікацію невідповідностей та розрахунок пріоритетного числа ризику засобів індивідуального захисту працівників» (додаток А).

- метод дослідження небезпек та працездатності HAZOP (Hazard and Operability Study) – спрямований на системний аналіз можливих відхилень у технологічних процесах від запланованих параметрів [40].

- метод «5-чому?» – ефективно використовується для пошуку першопричин небажаних подій, зокрема, у дослідженнях [5] цей підхід дозволив виявити приховані корінні чинники, через які працівники свідомо відмовляються від використання ЗІЗОД на робочих місцях.

Ці методи активно застосовувались у працях [38-40]. Метод «5-чому?» використовувався [5] для виявлення корінних причин відмов працівників від використання ЗІЗОД.

Головними перевагами якісних методів є їхня методологічна простота, висока наочність результатів та відсутність потреби у великих масивах точних статистичних даних. Водночас вони мають суттєві недоліки, серед яких переважають висока суб'єктивність експертних оцінок та низька точність розрахунків. Окрім того, ці інструменти є статичними, що унеможлиблює адекватне врахування динамічних ризиків, які безперервно виникають і змінюються безпосередньо під час експлуатації ЗІЗОД (наприклад, забивання фільтрів пилом чи накопичення втоми працівника).

Кількісні методи оцінки ризиків орієнтовані на математичне моделювання та розрахунок точних числових показників безпеки. У практиці оцінювання надійності систем «людина – машина – середовище» та ефективності ЗІЗ. Ключове значення мають такі підходи:

- FMEA / FMECA (Failure Mode and Effects Analysis) – аналіз видів і наслідків відмов, спрямований на системне виявлення потенційних дефектів обладнання чи порушень алгоритмів захисту.
- SPAR-H (Standardized Plant Analysis Risk – Human Reliability) – метод оцінки надійності людини, використовується для кількісного оцінювання ймовірності помилок персоналу під впливом зовнішніх чинників.
- FRAM (Functional Resonance Analysis Method) орієнтований на дослідження нелінійних зв'язків та оцінювання динамічних коливань функціональних процесів у складних системах.

Серед кількісних методів особливе місце посідає саме аналіз видів і наслідків відмов (FMEA) [41-43] та метод оцінки надійності людини SPAR-H [44-45]. Базовим документом для кількісної оцінки ризиків ЗІЗОД стало «Положення про ідентифікацію невідповідностей та розрахунок пріоритетного числа ризику засобів індивідуального захисту працівників» (додаток А). У ньому запропоновано розрахунок пріоритетного числа ризику за формулою $RPN=S \times O \times D$ (серйозність $\times$ ймовірність виникнення $\times$ виявлення), матрицю ризиків та класифікатор невідповідностей. Цей документ став основою для кількісної оцінки експлуатаційних ризиків ЗІЗОД.

Модифікований варіант SPAR-H з урахуванням фізіологічних факторів (K_T , K_H , K_P) розроблений автором роботи [7,46] та неведений у розділі 3.

Метод аналізу функціонального резонансу (FRAM) базується на принципах системного підходу другого покоління, де безпека розглядається не як відсутність відмов, а як динамічна здатність системи успішно функціонувати за мінливих умов. На відміну від лінійних моделей, FRAM дозволяє візуалізувати та моделювати повсякденну варіативність людської діяльності й технологічних процесів, виявляючи точки, де незначні коливання можуть резонувати й призводити до масштабних системних збоїв. Теоретичні основи цього методу та концепція системної безпеки (Safety-II) були закладені та обґрунтовані всесвітньо відомим експертом із людського фактора та надійності складних систем Erik Hollnagel [47].

Головними перевагами кількісних інструментів є висока об'єктивність отриманих результатів, мінімізація людського фактора під час розрахунків, а також можливість визначення інтегральних показників, зокрема пріоритетного числа ризику (RPN). Водночас застосування цих методів супроводжується значною трудомісткістю та високими вимогами до обсягу й точності вихідних статистичних даних. Крім того, базові кількісні моделі мають обмежені можливості щодо врахування кумулятивного ефекту від довготривалого та одночасного впливу шкідливих чинників під час тривалої експлуатації ЗІЗОД у шахтних умовах.

Кращими для досягнення теми роботи є інтегровані (гібридні) методи, які поєднують якісні та кількісні підходи. Базуються на введенні числових або бальних шкал для якісних показників та використовуються тоді, коли точних статистичних даних немає, але проста якісна оцінка є надто загальною для прийняття рішень. Результат виражається через математичні формули (найчастіше множення або додавання балів), які дають індекс або ранг ризику, що не відображає реальну фізичну величину чи ймовірність у відсотках, а слугує для порівняння ризиків між собою [44]. Серед їх розмаїття найбільше поширення здобули такі підходи:

- поєднання HAZOP та FMEA (прикладом використання є «Положення про ідентифікацію невідповідностей та розрахунок пріоритетного числа ризику засобів індивідуального захисту працівників») (додаток А);
- інтегральні моделі, що поєднують RPN, SPAR-H, коефіцієнти фізіологічного впливу та економічні модулі;
- 5-кроковий метод HSE з елементами кількісної оцінки.

Прикладами гібридних методів за ISO 31010 є метод Файна-Кінні (Fine-Kinney), класична матриця ризиків (Risk Matrix) з баловими значеннями ($R = P \times C$), FMEA (аналіз видів і наслідків відмов через розрахунок RPN) [23].

Аналіз нормативно-правової бази (п. 1.2) показує, що існуючі стандарти та норми вимагають проведення оцінки ризиків, але не пропонують єдиної інтегральної методики, адаптованої до специфіки вибору та експлуатації ЗІЗОД. У зв'язку з цим доцільно провести систематизацію сучасних методів оцінки ризиків (табл. 1.8).

Таблиця 1.8

Систематизація та узагальнена класифікація методів оцінювання ризиків

Критерій	Якісні методи	Кількісні методи	Напівкількісні (гібридні)
Вхідні дані	Думки експертів, описові сценарії	Статистика, вимірювання, числові лог-файли	Експертні оцінки, переведені у бали/шкали
Складність	Низька, висока швидкість оцінки	Висока, вимагає математичного моделювання	Середня, вимагає чіткого калібрування шкал
Вихідний результат	Текстовий опис ступеня ризику	Точна математична або фінансова величина	Ранг, індекс ризику, бали
Головна мета	Швидкий скринінг, первинна фільтрація	Точний розрахунок для критичних систем (ядерна, авіаційна, фінансова сфери)	Пріоритезація ризиків за обмежених даних

Джерело: складено автором за матеріалами [23]

Як видно з табл. 1.8, методи оцінки ризиків суттєво відрізняються за характером вхідних даних, рівнем складності та видом результату. Якісні методи забезпечують швидкість і простоту застосування, кількісні – вищу точність і об'єктивність, а напівкількісні (гібридні) методи представляють

компромісний варіант, що поєднує переваги обох груп. Така загальна класифікація дозволяє зрозуміти принципові відмінності між якісними, кількісними та гібридними підходами. Однак для глибшого розуміння їх практичної придатності до оцінки ризиків при виборі та експлуатації ЗІЗОД необхідний детальніший порівняльний аналіз конкретних методів, які найбільш часто застосовуються у цій сфері (табл. 1.9).

Таблиця 1.9

**Порівняльний аналіз сучасних методів оцінки професійних ризиків
при виборі та експлуатації ЗІЗОД**

Метод	Тип методу	Основні сильні сторони	Основні недоліки / обмеження	Застосування до ЗІЗОД
Матричні методи (Risk Matrix)	Якісний / напівкількісний	Простота, наочність, швидкість	Висока суб'єктивність, низька точність	Широко використовується для первинної оцінки
5-кроковий метод HSE	Якісний	Структурований процес (ідентифікація → оцінка → контроль)	Поверховий аналіз, слабе врахування динаміки	Використовується на етапі вибору
HAZOP (Hazard and Operability Study)	Якісний	Добре виявляє відхилення	Складний для динамічних процесів, потребує багато часу	Застосовується для аналізу процесів експлуатації
FMEA / FMCA	Кількісний	Виявлення видів відмов, розрахунок RPN	Не враховує взаємодію факторів у часі	Активно застосовується для оцінки експлуатаційних ризиків ЗІЗОД
SPAR-H	Кількісний (HRA)	Кількісна оцінка надійності людини	Потребує значної експертної інформації	Найкраще підходить для оцінки впливу ЗІЗОД на працівника
FRAM (Functional Resonance Analysis Method)	Інтегрований / гібридний	Враховує варіабельність та взаємодію функцій	Висока складність, потребує великого обсягу даних	Рідко застосовується до ЗІЗОД через складність

Джерело: складено автором на основі [5,12,33,37-47]

Порівняльний аналіз сучасних методів (табл. 1.9) свідчить, що якісні методи (матричні, 5-кроковий HSE) добре підходять для первинної оцінки та скринінгу ризиків. Кількісні методи, такі як FMEA та SPAR-H, дозволяють проводити більш точну оцінку, особливо щодо експлуатаційних ризиків ЗІЗОД та надійності людини. Гібридні підходи (HAZOP та FMEA) дають можливість поєднувати сильні сторони обох груп методів. Водночас жоден із розглянутих методів не забезпечує повноцінної комплексної оцінки ризиків при тривалій експлуатації ЗІЗОД з урахуванням динамічних, фізіологічних, ергономічних та економічних факторів одночасно.

Отже, для складних систем не можна використовувати лише один якийсь метод. На практиці технічні ризики, наприклад, зношування чи пропускна здатність фільтра респіратору, завжди переплітаються з людським фактором, коли працівнику важко дихати, він втомлюється і через це порушує правила безпеки. Оцінити таку систему суто математично або лише на око неможливо. Тому стандарт вимагає застосовувати комбінований підхід: спочатку за допомогою якісних методів виявляються всі можливі загрози, потім напівкількісними методами розставляються пріоритети, а технічні параметри захисту розраховуються через точні кількісні моделі. Тільки таке поєднання дозволяє отримати реальну картину безпеки на робочих місцях.

Таким чином, аналіз сучасних методів оцінки ризиків свідчить про відсутність єдиної інтегральної методики, яка б комплексно враховувала технічні, фізіологічні, ергономічні, організаційні та економічні аспекти при виборі та експлуатації ЗІЗОД. Це обґрунтовує необхідність розробки інтегральної моделі, яка поєднуватиме переваги різних підходів і компенсуватиме їх недоліки.

1.4. Роль і місце ЗІЗОД в ієрархії заходів контролю професійних ризиків

У сучасній системі управління професійними ризиками заходи щодо їх зниження будуються за принципом ієрархії контролю ризиків (Hierarchy of

Controls). Цей принцип є основою міжнародних стандартах ISO 45001:2018 та ISO 31000:2018, а також закріплений у національних нормативних документах, зокрема в Законі України «Про охорону праці» та рекомендаціях ДСТУ EN 529:2006 [1,2,19,21].

Ієрархія заходів контролю ризиків (контрольна піраміда NIOSH) рис. 1.1 [48] передбачає пріоритетне застосування більш ефективних заходів, починаючи від найбільш радикальних і закінчуючи менш ефективними:

- Усунення небезпеки (Elimination);
- Заміна небезпечного фактора на менш небезпечний (Substitution);
- Інженерні заходи контролю (Engineering controls);
- Адміністративні заходи контролю (Administrative controls);
- Засоби індивідуального захисту (Personal Protective Equipment — PPE), у тому числі ЗІЗОД.



Рис. 1.1. Ієрархія контролю ризиків (контрольна піраміда NIOSH) [48]

Ієрархія контролю ризиків складається з п'яти рівнів (від найвищого до найнижчого). Перший рівень – Усунення небезпеки (Elimination), являє собою

повне видалення джерела ризику. Це найефективніший рівень, але в гірничій промисловості часто технічно неможливий. Другий рівень – Заміна (Substitution). Це заміна небезпечного фактора менш шкідливим, що знижує ризик, але також не завжди застосовне. Третім рівнем є Інженерні заходи (Engineering controls), а саме технічні рішення, що ізолюють працівника від небезпеки. Ці заходи знижують небезпечний фактор, але вимагають значних інвестицій і не завжди охоплюють усі робочі зони. Наступний, четвертий рівень – Адміністративні заходи (Administrative controls). Це організаційні рішення, що змінюють спосіб роботи, але сильно залежить від дисципліни персоналу. І останній рівень захисту це Засоби індивідуального захисту (Personal Protective Equipment – PPE / ЗІЗ). Саме на цьому рівні ЗІЗ стають єдиним бар'єром між працівником і шкідливим середовищем [49].

ЗІЗОД займають останнє місце в цій ієрархії. Як зазначається в ISO 45001:2018 та ДСТУ EN 529:2006, ЗІЗ повинні застосовуватися лише тоді, коли всі попередні рівні контролю ризиків не забезпечують прийняттого рівня безпеки [1,19]. Як підкреслюється у роботі [4], а також у «Положенні про ідентифікацію невідповідностей та розрахунок пріоритетного числа ризику ЗІЗ» (додаток А), ЗІЗОД не усувають небезпеку, а лише захищають конкретного працівника від уже існуючого шкідливого фактора. Тому вони повинні застосовуватися лише тоді, коли вищі рівні контролю ризиків (усунення, заміна, інженерні та адміністративні заходи) не можуть забезпечити прийнятний рівень безпеки.

Проте, незважаючи на свій статус останнього бар'єра, роль ЗІЗОД є критично важливими. У багатьох галузях промисловості України, особливо в гірничодобувній, металургійній та хімічній, повне усунення або суттєве зниження пилових, газових та аерозольних факторів на рівні джерела часто неможливе через технологічні особливості виробництва. У таких умовах ЗІЗОД стають єдиним реальним бар'єром, що захищає органи дихання працівника.

Як показав аналіз у попередніх підрозділах (1.1-1.3), використання ЗІЗОД не усуває ризик, а лише трансформує його. Замість прямого впливу шкідливих речовин виникають нові ризики: порушення герметичності обтюратора, фізіологічне навантаження, тепловий дискомфорт, зниження уваги та надійності працівника. Саме тому ефективність ЗІЗОД значною мірою залежить не лише від їх технічних характеристик, а й від правильності вибору, якості прилягання, умов експлуатації та поведінки працівника.

Порівняльний аналіз сучасних методів оцінки ризиків (п. 1.3) підтверджує, що більшість існуючих методів недостатньо враховують специфіку останнього рівня ієрархії контролю – динамічні експлуатаційні ризики ЗІЗОД. Це створює суттєву прогалину в системі управління професійними ризиками.

У гірничій промисловості, де специфіка підземних робіт та технологічні процеси видобутку корисних копалин унеможливають повне усунення чи заміну джерела пилоутворення, колективні та інженерні заходи (такі як зрошення чи вентиляція) не здатні стовідсотково ліквідувати пилове навантаження. За цих умов ЗІЗОД, зокрема фільтруючі респіратори типу «Шахтар» або напівмаски класів FFP2/FFP3, переміщуються з теоретично найменш пріоритетного рівня ієрархії у статус єдиного засобу, який спроможний реально знизити експозицію шкідливого фактора на робочому місці [6,8].

Ефективність функціонування ЗІЗОД як фінального бар'єру в ієрархії контролю підтверджується статистичними та розрахунковими даними. Як свідчать результати досліджень [12], раціональне застосування засобів захисту забезпечує зменшення дози пилу, що проникає в організм працівника, на 30-50 %, а за умови досягнення максимальної щільності прилягання обтюратора до обличчя цей показник може сягати 70 %. Однак ЗІЗОД не лише захищають, а й самі стають джерелом нових ризиків. Тривале носіння респіратора створює додаткове фізіологічне навантаження (підвищення опору диханню, тепловий стрес, вологість під маскою), психологічний дискомфорт і зниження уваги.

Саме тому в роботі [7] введено модифікований метод SPAR-H з коефіцієнтами K_T (температура), K_H (вологість/ергономіка) і K_P (психофізіологічний стан), які кількісно враховують зростання ймовірності помилок працівника.

Економічна роль ЗІЗ також суттєва. За розрахунками [9], правильно обрані засоби захисту дозволяють зменшити загальні втрати від професійних захворювань і простоїв на 25-30 %. Водночас неправильний вибір або неякісна експлуатація призводить до передчасної заміни ЗІЗ і додаткових витрат.

У «Положенні про ідентифікацію невідповідностей та розрахунок пріоритетного числа ризику ЗІЗ» (додаток А) ЗІЗ розглядаються як об'єкт постійної оцінки ризиків протягом усього життєвого циклу – від вибору до утилізації. Це підкреслює, що роль ЗІЗ не є статичною: вона змінюється залежно від етапу експлуатації, умов праці та індивідуальних особливостей працівника.

Особлива складність управління ризиками за допомогою ЗІЗОД стає очевидною під час порівняльного аналізу їх застосування в різних галузях промисловості. Кожна з них характеризується власним домінуючим шкідливим чинником, специфічними режимами експлуатації та рівнем залишкового професійного ризику, що залишається після впровадження засобів захисту. Тому для кращого розуміння реальної ролі ЗІЗ доцільно порівняти їх застосування в різних ключових галузях промисловості (табл. 1.10).

Дані таблиці 1.10 показують, що у гірничій промисловості ЗІЗОД відіграють найкритичнішу роль. Тут колективні заходи (вентиляція, зволоження) часто недостатні через великі об'єми виробок і динамічні умови. Респіратори носять по 6-8 годин поспіль, тому конструктивні та психофізіологічні фактори (обтюрація, еластичність ремінців, теплове навантаження) стають визначальними. Саме тому в роботах [6,12] акцент зроблено на динамічних ризиках експлуатації. У хімічній промисловості ЗІЗ забезпечують найвищий ступінь захисту, але час їх використання обмежено (30-60 хв), а вага і дискомфорт значно вищі.

Таблиця 1.10

Порівняння ролі ЗІЗ у різних галузях промисловості

Галузь	Основний шкідливий фактор	Переважний тип ЗІЗ	Специфіка експлуатації	Зниження ризику (орієнтовно)	Головні обмеження ЗІЗ
Гірнична	Пил (кремній, вугілля) високої концентрації	Фільтруючі респіратори («Шахтар», FFP2/FFP3)	Тривале носіння (6-8 год), висока вологість і температура	30-70 %	Швидке забивання фільтрів, ослаблення ремінців, тепловий стрес
Хімічна	Токсичні гази, пари, аерозолі	Ізолюючі респіратори, хімічні костюми	Короткочасне використання, високі вимоги до герметичності	80-95 %	Обмежений час роботи (30-60 хв), висока вага, психологічне навантаження
Металургійна	Пил, висока температура, іскри	Респіратори з термостійкими фільтрами, щитки	Робота біля печей (до 50 °С під маскою)	40-65 %	Перегрів, швидке зниження фільтруючих властивостей
Будівельна	Пил (цемент, кварц), механічні пошкодження	Респіратори, каски, окуляри	Пересувна робота, забруднення, механічні впливи	35-55 %	Часте знімання/надягання, пошкодження обтюратора
Машинобудівна	Пил металу, масла, шум	Респіратори, навушники, рукавиці	Стаціонарна робота, середня інтенсивність	45-70 %	Забруднення маслами, зниження еластичності ремінців

Джерело: сформовано автором на основі даних [6,8,10-12,26,50]

Тут ризик пов'язаний переважно з проривом фільтра або пошкодженням костюма, а не з тривалою втомою. У металургійній галузі поєднання пилу і високої температури робить ЗІЗ менш ефективними – фільтри швидко втрачають властивості, а тепловий стрес під маскою підвищує температуру.

У будівництві ЗІЗ часто знімають і надягають десятки разів за зміну, що призводить до механічних пошкоджень обтюратора і швидкого зростання просочування. У машинобудуванні умови більш стабільні, тому ЗІЗ працюють ефективніше, але забруднення маслами знижує еластичність ремінців.

Отже, ці порівняння показують, що в гірничій промисловості ЗІЗ є не просто «останнім рівнем ієрархії», а критичним елементом системи захисту. Саме тут найгостріше проявляються динамічні фактори (зміна прилягання, втома, теплове навантаження), які традиційні методи оцінки враховують недостатньо. Це обґрунтовує необхідність розробки інтегральної моделі ризику, яка поєднує конструктивні особливості ЗІЗ, психофізіологічний стан працівника та реальні умови експлуатації.

Крім того, гірнича галузь характеризується високою концентрацією пилу (кремній, вугілля, сланець) часто 5-15 ГДК; поєднанням пилу з газами (метан, CO_2 , CO); підвищеною вологістю (80-95 %) і температурою (до $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$); обмеженим простором і тривалістю робочої зміни (6-8 годин безперервного носіння ЗІЗ); динамічними умовами (рух, вібрація, зміна положення тіла) [4,6,7]. У таких умовах ЗІЗОД стають єдиним реальним бар'єром між працівником і шкідливим середовищем.

Отже, ЗІЗОД виконують подвійну роль. Вони є останнім бар'єром захисту і водночас джерелом нових ризиків, якщо їх вибір і експлуатація не базуються на інтегральній оцінці. Аналіз попередніх підрозділів (1.1-1.3) та наведені дані підтверджують, що сучасні підходи вимагають переходу від простого «використання ЗІЗ» до комплексної системи управління, яка враховує конструктивні особливості, психофізіологічний стан працівника та динаміку експлуатації. Саме тому розробка інтегральної моделі оцінки професійних ризиків при виборі та експлуатації ЗІЗОД є актуальним і необхідним завданням даного дослідження. Така модель дозволить підвищити ефективність останнього бар'єра захисту.

1.5. Аналіз небезпек і небезпечних чинників, що знижують експлуатаційні показники ЗІЗОД

Одним з ключових етапів дослідження є ідентифікація та систематизація небезпечних чинників, які негативно впливають на експлуатаційні показники

засобів індивідуального захисту органів дихання. Без розуміння механізмів цього впливу неможливо об'єктивно оцінити реальну ефективність ЗІЗОД у виробничих умовах.

Важливим етапом дослідження є аналіз нормативних документів щодо небезпечних чинників, які негативно впливають на експлуатаційні показники засобів індивідуального захисту органів дихання. Незважаючи на те, що питання безпеки використання ЗІЗОД регулюється низкою міжнародних і національних нормативних актів, більшість з них зосереджена переважно на етапі вибору та сертифікації засобів захисту, а не на процесах їх експлуатації. Нормативна база дає загальні рекомендації щодо факторів зовнішнього середовища, але практично не містить детальної класифікації небезпечних чинників за характером їх впливу на основні конструктивні елементи респіратора (обтюратор, фільтруючі елементи, система кріплення, лицьова частина). Це створює суттєву прогалину в розумінні механізмів зниження захисної ефективності ЗІЗОД у реальних умовах виробництва. Згідно з ДСТУ 2293:2014 «Охорона праці. Терміни та визначення основних понять», шкідливі виробничі фактори традиційно поділяються на фізичні, хімічні, біологічні, ергономічні та психофізіологічні (п. 1.1, табл.1.1) [3]. Аналогічний підхід закріплено в ISO 45001:2018 [1]. Однак ці документи дають лише загальну класифікацію небезпечних та шкідливих виробничих чинників (НШВФ) і не розглядають, як саме ці чинники впливають на конкретні елементи конструкції ЗІЗОД. Кожна з цих груп має свої особливості впливу, гранично допустимі рівні (ГДК, ГДР) та методи контролю, що безпосередньо використовується при оцінці та ранжуванні ризиків на конкретному робочому місці.

Ефективність ЗІЗОД значною мірою залежить не тільки від їх початкових технічних характеристик, а й від умов експлуатації та їх стійкістю до впливу різних експлуатаційних чинників. Під час використання, ЗІЗОД зазнають комплексного негативного впливу численних небезпечних чинників, які поступово або раптово знижують їх захисні, ергономічні та гігієнічні

властивості. Аналіз цих чинників є важливим етапом для розуміння реальних ризиків, з якими стикаються працівники, особливо в гірничій та хімічній промисловості.

Нормативні документи пропонують лише загальні підходи до класифікації небезпечних чинників. Детальніше їх порівняння наведено в табл. 1.11.

Таблиця 1.11

Класифікація небезпечних чинників, що знижують експлуатаційні показники ЗІЗОД, у нормативних документах

Нормативний документ	Рівень	Класифікація небезпечних чинників, що пропонується	Конкретність щодо ЗІЗОД	Ступінь деталізації
ДСТУ EN 529:2006	Національний	Загальні фактори (температура, вологість, механічні пошкодження, хімічна агресія)	Середній	Низький
НПАОП 0.00-1.04-07	Національний	Фактори, що впливають на вибір ЗІЗОД (характер шкідливих речовин)	Низький	Дуже низький
ISO 16975-1:2016	Міжнародний	Фактори середовища (температура, вологість, механічні впливи)	Середній	Середній
ISO 17420-1:2021	Міжнародний	Вимоги до продуктивності в різних умовах	Середній	Середній
Постанова КМУ № 771	Національний	Загальні вимоги до матеріалів ЗІЗ (стійкість до хімічних речовин)	Низький	Низький

Джерело: сформовано автором на основі даних [17-19,22,24]

Як видно з табл. 1.11, нормативні документи дають лише загальні підходи до факторів впливу і не пропонують детальної класифікації за впливом на основні елементи конструкції ЗІЗОД (обтюратор, фільтруючі елементи, система кріплення, лицьова частина). У зв'язку з цим автором запропоновано власну класифікацію небезпечних чинників саме за характером впливу на конструктивні елементи респіратора.

Механічні та динамічні чинники є одними з найпоширеніших. У гірничій промисловості, де працівники постійно рухаються, працюють у обмеженому просторі та піддаються вібрації, відбувається швидке механічне пошкодження ремінців наголів'я, деформація обтюратора та порушення герметичності. За даними [6], після 8-10 циклів надягання/зняття спостерігається зростання просочування на 38-74 % через ослаблення еластичності ремінців і деформацію смуги обтюраторної.

Фізичні чинники (температура та вологість) суттєво впливають на функціонування ЗІЗОД. У виробках з високою вологістю (80-95 %) і температурою до $+35^{\circ}\text{C}$ відбувається накопичення конденсату в підмасковому просторі, що призводить до «цементзації» пилу на фільтруючому елементі та різкого зростання опору диханню. Крім того, підвищена температура під маскою викликає тепловий стрес, що негативно впливає на фізіологічний стан працівника [4,8].

Справедливість цих висновків повністю підтверджується результатами експериментальних досліджень, проведених науковою групою за участю автора. Під час експериментальних випробувань було зафіксовано, що тривале носіння фільтрувальних респіраторів (особливо в поєднанні зі щільним захисним одягом) створює пряме додаткове фізіологічне навантаження на організм людини. Зокрема, через накопичення гарячого повітря мікроклімат у підмасковому просторі суттєво погіршується: середнє зростання температури становить $2-3^{\circ}\text{C}$, а відносної вологості – на 5-8%. Такий перегрів викликає інтенсивний тепловий стрес і змушує серцево-судинну систему працювати в посиленому режимі, що проявляється у збільшенні частоти серцевих скорочень у середньому до 20 ударів за хвилину порівняно зі станом спокою. Подібні фізіологічні зміни призводять до швидкої фізичної втоми робітника, втрати концентрації та суттєвого зниження когнітивної й моторної точності, що експоненціально збільшує ризик допущення людиною як дрібних помилок через неуважність, так і критичних порушень, здатних призвести до виробничої аварії чи травмування [7].

Хімічні чинники призводять до деградації матеріалів. Агресивні гази та пари (у хімічній промисловості) та металеві аерозолі (у металургії) поступово руйнують еластомерні елементи обтюратора та клапани, знижуючи їх еластичність і герметичність.

Додатковим ускладнюючим фактором під час експлуатації ЗІЗ у високоризикових галузях промисловості є те, що більшість шкідливих речовин (токсичні гази, дрібнодисперсний пил, хімічні агенти) становлять приховану, невидиму загрозу. Оскільки вони не мають виражених попереджувальних властивостей (кольору чи запаху), працівник практично не здатний візуально зафіксувати момент початку безпосереднього забруднення екіпірування або просочування шкідливих речовин під захисний бар'єр. У практиці безпеки праці загальновизнаною є методологічна закономірність, яку чітко видно на прикладі експлуатації сучасного ізолювального захисного одягу: чим вищим є рівень захисту та герметичності спорядження, тим більші супутні ризики воно створює для самого користувача. Спроба повністю ізолювати людину від шкідливого середовища неминуче викликає сильний тепловий, фізичний та психологічний стрес, а також призводить до погіршення зору, обмеження рухливості й ускладнення спілкування на робочому місці. Ця закономірність є повністю релевантною і для ЗІЗОД. Намагання забезпечити максимально щільне прилягання обтюратора маски призводить до різкого зростання опору диханню та накопичення вологи й тепла у підмасковому просторі. В умовах екстремального мікроклімату цей тепловий стрес стає критичним. Як наслідок, намагаючись полегшити фізіологічний тиск, працівники часто свідомо порушують правила безпеки та періодично зсувають або взагалі знімають респіратори під час зміни, що повністю нівелює захисний ефект і веде до зростання ризику професійних захворювань [51].

Дослідження динаміки експлуатації ЗІЗОД в реальних промислових умовах показують, що захисний потенціал масок зазнає суттєвої деструкції безпосередньо під час робочої зміни під впливом виробничого середовища.

Головна небезпека полягає у синергетичному (комбінованому) впливі фізичних і хімічних факторів на конструктивні елементи респіратора. Так, одночасна дія високої концентрації дрібнодисперсного пилу, агресивних парогазових сумішей та екстремального температурного режиму прискорює фізичне старіння матеріалів. Це призводить до передчасної втрати еластичності клапанів вдиху та видиху, а також до деформації фіксуючих ремінців наголів'я. Як наслідок, виникає приховане та прогресуюче зниження захисних властивостей, яке неможливо виявити візуально, що значно підвищує рівень залишкового професійного ризику для здоров'я працівника і вимагає безперервного моніторингу стану засобів захисту [52].

Ергономічні та антропометричні чинники відіграють одну з ключових ролей. Неправильне прилягання обтюратора через індивідуальні особливості обличчя працівника є причиною 58-84 % витоків нефільтрованого повітря, як показали дослідження [6]. Це особливо актуально для фільтрувальних респіраторів типу «Шахтар», де навіть невеликі щілини значно знижують реальний коефіцієнт захисту.

Організаційні та поведінкові чинники також суттєво впливають на експлуатаційні показники. Неправильне зберігання, несвоєчасна заміна фільтрів, порушення правил використання та відмова від ЗІЗ через дискомфорт призводять до різкого зниження захисної ефективності.

Аналізуючи практику застосування засобів захисту, необхідно звернути увагу на проблему суб'єктивного сприйняття комфорту та індивідуальних навичок працівника. Навіть за умови правильного вибору респіратора відповідно до чинного законодавства, зокрема, статті 13 Закону України «Про охорону праці» та рекомендацій ДСТУ EN 529:2006, його реальна захисна спроможність критично знижується через людський фактор. Основними поведінковими чинниками деградації властивостей ЗІЗОД на робочому місці є невміння персоналу правильно надягати маску, несвоєчасна заміна фільтрувальних елементів та ігнорування правил перевірки щільності прилягання перед початком зміни. Будь-яка помилка під час фіксації

респіратор призводить до утворення зазорів у смузі обтурації та підсмоктування забрудненого повітря в обхід фільтра. Це доводить, що дискомфорт під маскою безпосередньо провокує порушення технологічних регламентів експлуатації з боку робітників, перетворюючи суб'єктивний фактор на один із головних небезпечних чинників [53].

Основні небезпечні чинники, що знижують експлуатаційні показники ЗІЗОД наведені у табл. 1.12.

Таблиця 1.12

**Класифікація небезпечних чинників за впливом на основні
елементи конструкції ЗІЗОД**

Група чинників	Основні фактори	Вплив на ЗІЗОД	Наслідки для працівника та підприємства
Механічні та динамічні	Вібрація, рух, обмежений простір	Деформація обтюратора, ослаблення ремінців	Зростання просочування на 38-74 %
Термо-вологісні	Висока температура та вологість	Конденсат, цементация пилу, тепловий стрес	Зниження уваги, тепловий удар
Хімічні	Агресивні гази, пари, аерозолі	Деградація матеріалів обтюратора	Зниження герметичності
Антропометричні	Індивідуальні особливості обличчя	Неправильне прилягання	58-84 % витоків
Організаційно-поведінкові	Порушення правил використання	Несвоєчасна заміна, відмова від ЗІЗ	Зростання професійних захворювань

Джерело: складено автором на основі [4,6,7]

Аналіз нормативних документів показує, що вони не містять детальної класифікації небезпечних чинників, що знижують експлуатаційні показники ЗІЗОД. Запропонована автором класифікація за впливом на основні елементи конструкції респіратора є більш практичною та науково обґрунтованою, оскільки дозволяє чітко визначити, який саме вузол ЗІЗОД найбільше страждає від того чи іншого чинника. Це створює необхідне підґрунтя для подальшої розробки інтегральної моделі оцінки професійних ризиків.

Таким чином, аналіз небезпек і небезпечних чинників показує, що ЗІЗОД піддаються комплексному впливу, який має динамічний характер і суттєво знижує їх експлуатаційні показники протягом робочої зміни. Це підтверджує висновки попередніх підрозділів (1.1-1.4) про те, що ЗІЗОД, займаючи останнє місце в ієрархії контролю ризиків, самі стають джерелом додаткових ризиків. Саме тому необхідним є розробка інтегральної моделі оцінки професійних ризиків, яка враховуватиме всі зазначені чинники.

1.6. Огляд наукових досліджень з удосконалення конструкції, оцінки ефективності, надійності та економічних складових експлуатації ЗІЗОД

Логічним продовженням аналізу небезпек, які знижують захисні властивості респіраторів під час роботи, що були розглянуті у п. 1.5, є аналіз існуючих технічних та методичних рішень. Сьогодні наукові дослідження у сфері безпеки праці розвиваються у напрямку пошуку балансу між надійністю самого респіратора та фізичними можливостями працівника. На основі аналізу наукових праць автора роботи можна виділити п'ять основних напрямки, результати яких мають ключове значення.

1 напрямок. Модернізація конструкції респіраторів та створення засобів автоматичного контролю.

Серйозною проблемою під час виконання робіт є те, що елементи кріплення маски з часом слабшають. Спеціальні дослідження еластичності стрічок наголів'я показали, що навіть невелике зниження натягу ременів призводить до появи зазорів між маскою та обличчям [8]. Через ці зазори всередину починає підсмоктуватися забруднене повітря. Щоб розв'язати цю проблему, було запропоновано нову конструкцію респіратора зі спеціальними гнучкими вставками, які дозволяють контролювати силу натягу ременів прямо під час роботи і вчасно сигналізують робітникам, якщо маска сповзла [8].

Крім того, оскільки працівник під час зміни не може візуально визначити, наскільки сильно забився фільтр респіратора пилом, було розроблено ще одне технічне рішення. Створено конструкцію фільтрувального респіратора, який має вбудований датчик для контролю перепаду тиску в реальному часі [54]. Цей мініатюрний пристрій автоматично фіксує момент, коли опір диханню стає критичним, і сигналізує про необхідність заміни фільтра [54].

Для умов, де працівники стикаються з газоподібними шкідливими речовинами, для захисту від них було створено комп'ютерну програму в середовищі Visual Studio Code [55], алгоритм якого базується на основі математичних рівнянь Вілера-Джонаса. Програма дозволяє швидко розраховувати час, протягом якого протигазовий фільтр буде надійно захищати людину, враховуючи концентрацію газів у повітрі та швидкість дихання робітника [55].

2 напрямок. Математичне моделювання та оцінка захисних властивостей.

Існуючі підходи до оцінки ЗІЗОД часто використовують застарілі та незмінні показники, які не враховують реальні умови на робочому місці. Для виправлення цього недоліку ми вдосконалили математичну модель, яка дозволяє точніше розраховувати коефіцієнт захисту респіратора від твердого аерозолю (пилу) з урахуванням динаміки дихання [56]. Також було розроблено абсолютно нову класифікацію засобів захисту органів дихання [4]. Вона допомагає підприємствам правильно підбирати маски, спираючись на попередню оцінку професійних ризиків на конкретній ділянці [4].

Важливим кроком стало дослідження лінії прилягання маски до шкіри. Шляхом порівняння форми обличчя працівників (антропометричних параметрів) та контурів напівмасок вдалося знайти оптимальну геометрію обтюратора [6]. Лабораторні випробування підтвердили, що така оптимізація забезпечує щільне прилягання та дає найнижчі показники проникнення пилу під маску [6].

З напрямком. Надійність системи «людина – респіратор» та фізіологічне навантаження.

Сучасні дослідження авторів спрямовані також на вивчення зворотного впливу: як саме респіратор впливає на стан самого працівника. За допомогою експлуатаційних випробувань за стандартом EN 13274-2 (які включали тестування на біговій доріжці при різних швидкостях) було виконано кількісну оцінку надійності дій людини під час фізичного навантаження в масці [7]. Експерименти підтвердили, що високий опір диханню та спека під маскою швидко виснажують організм, викликають втому та знижують точність рухів людини. Через це працівник починає частіше помилятися, що підвищує ризик травматизму [7].

Важливим елементом дослідження надійності системи став аналіз суб'єктивних причин, через які робітники свідомо відмовляються від носіння засобів захисту або порушують правила їх експлуатації. Для пошуку першопричин таких інцидентів було успішно застосовано управлінський метод «5-Чому?», який дозволив побудувати чіткі причинно-наслідкові зв'язки між технічними недоліками маски (наприклад, надмірним тиском на обличчя чи поганою видимістю) та поведінковими рішеннями персоналу [5]. Це підтвердило, що ергономічний комфорт безпосередньо впливає на загальний рівень професійного ризику на робочому місці [5].

Подальшим розвитком досліджень людського фактора стало впровадження методології аналізу надійності людини (Human Reliability Analysis – HRA), яка дозволяє оцінити ймовірність помилок працівника під час використання ЗІЗОД [58]. У межах цього підходу визначено ключові фактори формування працездатності (Performance Shaping Factors – PSFs), серед яких найважливішими виявилися підвищена температура, вологість підмаскового простору та додатковий опір диханню. Це дало змогу не просто констатувати втому людини, а закласти математичне підґрунтя для прогнозування її безпомилкових дій у складних виробничих умовах [58].

4 напрямок. Економічне обґрунтування та системний аналіз ризиків експлуатації.

Щоб наукові розробки можна було легко застосувати на практиці, було розроблено методичний підхід до економічного обґрунтування вибору ЗІЗОД [9]. Наукові передумови економічного оцінювання управління засобами захисту було закладено під час розробки базового економічно обґрунтованого підходу до вибору ЗІЗОД [59]. На відміну від класичних бухгалтерських розрахунків, у модель було запропоновано додатково включати приховані фінансові збитки підприємства. Зокрема, враховуються довгострокові соціально-економічні наслідки від розвитку у працівників хронічних пилових захворювань (силікозу, антракозу тощо), а також миттєві втрати через падіння продуктивності праці, спричинене ергономічним дискомфортом від носіння маски [59]. Він дозволяє підприємству одночасно оцінити витрати на купівлю масок, фінансові втрати від зниження працездатності людей через дискомфорт, а також збитки від виникнення у робітників професійних захворювань органів дихання [9].

Також на основі узагальнення галузевих особливостей промислових підприємств нами було сформовано методичний алгоритм вибору фільтрувальних респіраторів, де базовим критерієм виступає попередня кількісна та якісна оцінка виробничих ризиків [57]. Запропонований підхід дозволяє відійти від формального забезпечення працівників масками за списками і дає можливість гнучко враховувати характер небезпечних чинників, фактичний рівень запиленості робочої зони та специфіку виконання технологічних операцій конкретним робітником [57].

Паралельно з цим було реалізовано метод комплексної оцінки експлуатаційних ризиків [12]. Для цього ми об'єднали якісний метод HAZOP (пошук дефектів та відхилень за ключовими словами) та кількісний метод FMEA (оцінка наслідків відмов конструкції респіратора) [12]. Практичним результатом створення офіційного документа - «Положення про ідентифікацію невідповідностей та розрахунок пріоритетного числа ризику

засобів індивідуального захисту працівників» (додаток А). Цей документ затверджений науковою радою університету та впроваджений на виробництві для розрахунку індексу ризику (RPN) з метою контролю стану масок під час експлуатації [12].

5 напрямок. Обґрунтування інтегральних критеріїв вибору ЗІЗ та інтеграція зі стандартами ISO.

Важливим етапом роботи стало узагальнення ролі ЗІЗ у загальній профілактиці професійних захворювань на промислових підприємствах. Аналіз показав, що ефективність захисту часто нівелюється через недостатнє навчання персоналу та відсутність суворого контролю з боку менеджменту [60]. Для подолання формалізму було сформовано систему комплексних критеріїв вибору засобів захисту з обов'язковим урахуванням інтегральної оцінки ризиків [61]. Це дозволило переорієнтувати процес забезпечення ЗІЗ із принципу «видача за нормами» на принцип «захист від фактичного ризику» [61].

Фінальним кроком цього напрямку стало вивчення механізмів оптимізації систем захисту в контексті вимог сучасного міжнародного стандарту ISO 45001:2018 [62]. Дослідження довело, що для створення дієвої системи управління охороною праці на підприємстві необхідно поєднувати результати індивідуальних інструментальних тестів на щільність прилягання масок (fit-testing) із постійним моніторингом параметрів середовища та ергономічних показників, що повністю відповідає філософії стандартів ISO та вимогам серії ISO 17420 [62]. Узагальнені результати аналізу існуючих досліджень, виконаних за участю автора, наведено в табл. 1.13.

Проведений аналіз нормативної бази, існуючих класифікацій небезпек (п. 1.1-1.5) та результатів наукових досліджень (п. 1.6) дозволяє зробити такі висновки:

- незважаючи на велику кількість успішних інженерних рішень (створення датчиків, програм розрахунку та оптимізації форми масок), усі вони розглядають елементи системи захисту окремо один від одного – або

Таблиця 1.13

**Напрямки наукових досліджень з оптимізації та оцінки
ефективності ЗІЗОД**

Напрямок дослідження	Що саме було зроблено (методи)	Отриманий науковий та практичний результат	Джерело (посилання)
Конструктивна модернізація та автоматизація	Розробка респіраторів із датчиками тиску [54], еластичними датчиками натягу ременів [8]; створення софту в середовищі VS Code [55]	Автоматичний контроль забивання фільтрів пилом [54] та газами [55], контроль сповзання маски з обличчя робітника [8]	[8],[54],[55]
Ергономіка та математичне моделювання	Модернізація моделі розрахунку коефіцієнта захисту [56]; оптимізація обтюратора під форму обличчя [6]; нова класифікація ЗІЗОД [4]	Зменшення просочування пилу через лінію прилягання маски до шкіри [6], точніший підбір масок під рівень ризику [4]	[4],[6],[56]
Аналіз стану та надійності працівника	Оцінка рівня втоми, частоти пульсу та дихання під час навантажень у масці за стандартом EN 13274-2 [7]	Визначення закономірностей втоми робітника, що дозволяє розробити безпечні режими праці і відпочинку [7] та впровадження методології HRA та виділення факторів формування працездатності (PSFs) [58]	[7],[58]
Економіка та ризик-менеджмент	Поєднання методів HAZOP та FMEA [12]; розрахунок числа (RPN) (додаток А); моделювання загальних витрат підприємства на ЗІЗ [9]	Розробка та затвердження «Положення про оцінку ризику» (додаток А); вибір масок із мінімальними витратами для бюджету [9]; урахування прихованих фінансових втрат підприємства від зниження продуктивності праці та соціальних наслідків професійних захворювань [59]	[9],[12],[59] (додаток А)
Перехід до стандартів ISO та системний вибір	Аналіз умов профілактики захворювань [60], формування системи критеріїв вибору під фактичний ризик [61] та оптимізація за ISO 45001 [62]	Наукове обґрунтування відходу від формального надання ЗІЗ; інтеграція індивідуальних тестів (fit-testing) у загальну систему управління безпекою підприємства [60-62]	[60],[61],[62]

Джерело: розроблено автором на основі власних досліджень [4,6,7,8,9,12,54-56,60-62], (додаток А).

оцінюють суто технічні параметри фільтра, або досліджують тільки фізіологію людини;

- на практиці технічний стан респіратору, дискомфорт робітника, умови праці та фінансові витрати підприємства діють одночасно, безперервно впливаючи один на одного. Наприклад, спроба покращити один показник (збільшити щільність прилягання) погіршує інший (викликає спеку під маскою, через що робітник її знімає, повністю руйнуючи захист).

Таким чином, сучасні наукові дослідження охоплюють удосконалення конструкції, оцінку надійності людини та економічну ефективність. Однак більшість робіт розглядає окремі аспекти, тоді як комплексний інтегральний підхід, що поєднує технічні, фізіологічні, ергономічні та економічні фактори, залишається недостатньо розробленим.

Окремий напрям сучасних досліджень становлять інтелектуальні методи оцінювання професійних ризиків, зокрема моделі на основі нечіткої логіки, штучних нейронних мереж та методів машинного навчання. Такі підходи забезпечують високу точність прогнозування за наявності достатніх масивів експериментальних даних, однак їх практичне застосування при виборі та експлуатації ЗІЗОД є обмеженим через потребу у значних обсягах навчальних даних, складність інтерпретації отриманих результатів та недостатню адаптованість до чинних нормативних вимог у сфері охорони праці. Аналіз цих підходів підтверджує актуальність розроблення комплексних моделей оцінювання професійних ризиків, здатних поєднати технічні, людські, експлуатаційні та економічні чинники в єдиній системі підтримки прийняття рішень.

Це виявляє головну наукову задачу – відсутності єдиного комплексного інструменту, який міг би об'єднати технічні, людські, середовищні та економічні фактори в одну систему. Виявлена проблема повністю підтверджує актуальність теми даного дисертаційного дослідження.

Для вирішення цього завдання необхідно відійти від оцінювання окремих факторів і розробити нову інтегральну модель оцінювання ризику. Ця модель повинна одночасно враховувати як технічний стан і знос засобів захисту, так і фізіологічний стан і втому працівника під час зміни. Створення

такого підходу дозволить не просто підбирати респіратори за каталогами, а ефективно управляти безпекою праці на основі розрахунку реального професійного ризику протягом усього часу використання ЗІЗ. Це і є головною метою дисертаційного дослідження – є підвищення результативності процесу управління професійними ризиками при виборі та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання шляхом розроблення інтегральної моделі з оцінювання професійних ризиків гірників.

Для реалізації мети дослідження були визначені такі завдання:

- провести аналіз сучасного стану проблеми оцінювання професійних ризиків при виборі та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання, дослідити нормативно-правові, організаційні та науково-методичні підходи до управління професійними ризиками;
- розробити модель оцінювання надійності людини при експлуатації ЗІЗОД на основі модифікованого методу SPAR-H (Standardized Plant Analysis Risk - Human Reliability Analysis) з урахуванням впливу параметрів підмаскового простору та фізіологічного навантаження працівника;
- удосконалити методику ідентифікації та оцінювання експлуатаційних ризиків ЗІЗОД шляхом інтеграції методів HAZOP (Hazard and Operability Study) та FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) для визначення найбільш критичних відмов і небезпечних відхилень під час їх експлуатації;
- удосконалити конструктивні елементи фільтрувального респіратора з метою підвищення герметичності прилягання до обличчя та покращення експлуатаційної ефективності засобів захисту органів дихання;
- розробити інтегральну модель оцінки професійних ризиків при виборі та експлуатації ЗІЗОД на основі поєднання показників надійності людини, експлуатаційних ризиків, захисної ефективності, прогнозованого часу захисної дії та економічних критеріїв;
- запропонувати механізм безперервного вдосконалення системи управління професійними ризиками при експлуатації ЗІЗОД на основі циклу PDCA та сформулювати практичні рекомендації щодо впровадження розробленої інтегральної моделі на промислових підприємствах.

Висновки до розділу 1

1. Проаналізовано сутність професійних ризиків при використанні засобів індивідуального захисту органів дихання. Встановлено, що застосування ЗІЗОД не усуває ризик повністю, а трансформує його у комплекс вторинних фізіологічних, ергономічних та психофізіологічних ризиків. Розроблено класифікацію професійних ризиків при експлуатації ЗІЗОД, що систематизує їх за основними ознаками.

2. Проведено аналіз нормативно-правового забезпечення оцінювання професійних ризиків та використання ЗІЗОД. Встановлено, що чинна нормативна база недостатньо враховує динамічні ризики експлуатації ЗІЗОД, людський фактор, фізіологічне навантаження та економічні аспекти прийняття рішень.

3. Узагальнено сучасні методи оцінювання професійних ризиків. Встановлено, що існуючі підходи не забезпечують комплексного оцінювання ризиків при виборі та експлуатації ЗІЗОД з одночасним урахуванням технічних, фізіологічних, ергономічних та економічних чинників.

4. Визначено місце ЗІЗОД в ієрархії заходів контролю професійних ризиків. Показано, що в умовах гірничої промисловості вони є не лише засобом захисту, а й джерелом додаткових ризиків, що обґрунтовує необхідність їх інтегрального оцінювання.

5. Розроблено класифікацію чинників, що впливають на експлуатаційну ефективність ЗІЗОД, та встановлено найбільш критичні конструктивні елементи, деградація яких суттєво знижує герметичність і захисні властивості респіратора.

6. Узагальнено сучасні наукові дослідження у сфері вдосконалення ЗІЗОД. Встановлено, що існуючі розробки мають фрагментарний характер і не забезпечують інтегрального оцінювання професійних ризиків.

7. Сформульовано наукову проблему дослідження, що полягає у відсутності інтегрального підходу до оцінювання професійних ризиків при

виборі та експлуатації ЗІЗОД з урахуванням технічних, фізіологічних, експлуатаційних, людських та економічних чинників. Це обґрунтовує необхідність розроблення інтегральної моделі, яка є предметом подальших досліджень дисертаційної роботи.

Отримані результати аналізу дозволили визначити основні напрями подальших досліджень і сформулювати комплекс взаємопов'язаних завдань, спрямованих на розроблення моделі надійності людини, удосконалення методів оцінювання експлуатаційних ризиків ЗІЗОД, конструктивних елементів фільтрувальних респіраторів, математичних моделей і програмних засобів прогнозування захисних властивостей, економічного обґрунтування вибору засобів захисту, формування інтегральної моделі оцінювання професійних ризиків та механізму її безперервного вдосконалення на основі циклу PDCA.

Основні результати, отримані в розділі 1, опубліковані в працях [4-9,12,16,38,39,41,42,46,51-62].

Список використаних джерел до розділу 1

1. ДСТУ ISO 45001:2019 (ISO 45001:2018, IDT). Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. 45 с. Офіційна сторінка ISO: <https://www.iso.org/standard/63787.html> (дата звернення 18.03.2026). URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_iso_45001_2019.pdf
2. ДСТУ ISO 31000:2018 (ISO 31000:2018, IDT). Менеджмент ризиків. Принципи та настанови. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 21 с. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_iso_31000_2018.pdf
3. ДСТУ 2293:2014. Охорона праці. Терміни та визначення основних понять. Київ: Мінекономрозвитку України, 2015. 18 с. URL: <https://surl.li/qfbrmk>
4. Чеберячко С.І., Радчук Д.І., Дерюгін О.В., Сушко Н.С., Кравченко Б.Д. Розробка нової класифікації засобів індивідуального захисту органів дихання. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2022. Вип. 45. С. 109-119. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.45.2022.276269>
5. Голінько В.І., Чеберячко С.І., Кравченко Б.Д. Метод «5-Чому?» у визначенні причин відмови від використання ЗІЗОД. Сталий розвиток України в умовах глобалізації та Європейської економічної інтеграції: проблеми, перспективи, ефективність. ФЕНІКС-2023: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (м. Харків, 19 груд. 2023 р.). Харків: Нац. техн. ун-т «Харківський політехнічний інститут», 2023. С. 147-150. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/73858>
6. Cheberiachko S., Cheberiachko Y., Deryugin O., Kravchenko B., Nehrii T., Nehrii S., Zolotarova O. Increasing the insulation properties of filter respirators to protect miners' respiratory organs from dust. Rudarsko-geološko-naftni zbornik. 2023. Vol. 38, No. 4. P. 27-40. DOI: <https://doi.org/10.17794/rgn.2023.4.3>

7. Кравченко Б.Д., Голінько В.І., Радчук Д.І. Оцінка надійності людини при використанні респіраторів у виробничих умовах. Науковий вісник ДонНТУ. 2025. №2(15). С. 147-163. DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2025-2-15-147-163>
8. Tretiakova L., Cheberyachko Y., Sharovatova O., Nehrii T., Nehrii S., Kravchenko B., Zolotarova O. The influence of head strap elasticity on the protective properties of filtering facepiece respirators. Rudarsko-geološko-naftni zbornik. 2024. Vol. 39, No. 1. P. 131-140. DOI: <https://doi.org/10.17794/rgn.2024.1.11>
9. Голінько В.І., Кравченко Б.Д. Економічне обґрунтування вибору засобів індивідуального захисту органів дихання. Вісті Донецького гірничого інституту. 2023. № 2 (53). С. 14-25. DOI: <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2023-2-14-25>
10. Oestenstad R.K., Perkins J.L., Rose V.E. Identification of facesal leak sites on a half-mask respirator. American Industrial Hygiene Association Journal. 1990. Vol. 51, No. 5. P. 280–284. DOI: <https://doi.org/10.1080/15298669091369655>
11. Oestenstad R.K., Dillion H.K., Perkins J.L. Distribution of facesal leak sites on a half-mask respirator and their association with facial dimensions. American Industrial Hygiene Association Journal. 1990. Vol. 51, No. 5. P. 285-290. DOI: <https://doi.org/10.1080/15298669091369664>
12. Голінько В., Радчук Д., Чеберячко С., Наумов М., Кравченко Б., Дерюгін О. Оцінювання експлуатаційних ризиків засобів індивідуального захисту органів дихання. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація: зб. наук. пр. Черкас. ін-ту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2024. Т. 8, № 2. С. 27-43. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2024.8.2.27.43>
13. Cheberiachko S.I., Yavorska O.O., Yavorskyi A.V., Ikonnikov M.Yu. A risk of pulmonary diseases in miners while using dust respirators. Naukovyi

Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2022. No. 5. P. 104–109. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/104>.

14. Загальна статистика професійних захворювань за 2025 рік. Розділ «Травматизм. Статистика. Причини». Держпраці України. URL: <https://dsp.gov.ua/category/diyalnist/travmatyzm-statystyka-prychyny/> (дата звернення: 11.01.2026).

15. Аналітична довідка стану професійної захворюваності в Україні за 2025 рік. Центр громадського здоров'я МОЗ України. URL: <https://surl.li/zsblod> (дата звернення: 11.01.2026).

16. Кравченко Б.Д., Голінько В.І. Аналіз причин виробничого травматизму. Заходи щодо його запобігання. Охорона праці: освіта і практика. Проблеми та перспективи розвитку охорони праці : матеріали V Всеукр. наук.-практ. конф. викладачів та фахівців-практиків та XV Всеукр. наук.-практ. конф. курсантів, студентів, аспірантів та ад'юнктів (трав. 2025 р., м. Львів). Львів: ЛДУБЖД, 2025. С. 157-159. URL: <https://surl.li/hnvavw>

17. ISO 17420-1:2021. Respiratory Protective Devices – General Requirements. – Geneva: ISO, 2021. URL: <https://www.iso.org/standard/74979.html>

18. ISO 16975-1:2016. Respiratory Protective Devices – Selection, Use and Maintenance. Part 1: Establishing and Implementing a Respiratory Protective Device Programme. – Geneva: ISO, 2016. URL: <https://www.iso.org/standard/60853.html>

19. ДСТУ EN 529:2006 (EN 529:2005, IDT). Засоби індивідуального захисту органів дихання. Рекомендації щодо вибору, використання, догляду та обслуговування. Настанови. Чинний від 01.10.2007. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2007. 42 с. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=54667 (дата звернення: 20.12.2025).

20. Про засоби індивідуального захисту та про скасування Директиви Ради 89/686/ЄЕС: Регламент Європейського Парламенту та Ради (ЄС)

2016/425 від 9 берез. 2016 р. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32016R0425>

21. Про охорону праці: Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII (зі змінами від 12.09.2025). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text> (дата звернення: 18.03.2026)

22. НПАОП 0.00-1.04-07. Правила вибору та застосування засобів індивідуального захисту органів дихання: затв. наказом Держгірпромнагляду України від 28.12.2007 № 331. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0285-08#Text> (дата звернення: 18.12.2025).

23. ДСТУ EN ІЕС 31010:2022 (EN ІЕС 31010:2019, IDT; ІЕС 31010:2019, IDT). Керування ризиками. Методи оцінювання ризиків. Чинний від 31.12.2023. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2023. 106 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=100889 (дата звернення: 22.03.2026).

24. Про затвердження Технічного регламенту засобів індивідуального захисту: постанова Кабінету Міністрів України від 21.08.2019 № 771 (зі змінами та доп.). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/771-2019-%D0%BF#Text> (дата звернення: 15.01.2026).

25. OSHA Respiratory Protection Standard (29 CFR 1910.134). Washington: OSHA. URL: <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.134> (дата звернення: 01.02.2026).

26. Respiratory Health / NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health). Atlanta: CDC/NIOSH. URL: <https://www.cdc.gov/niosh/topics/respirators/default.html>

27. Assigned Protection Factors for the Revised Respiratory Protection Standard / OSHA. Washington: OSHA. URL: [https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.134#1910.134\(d\)](https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.134#1910.134(d)) (дата звернення: 08.02.2026); NIOSH Respirator Selection Logic / NIOSH. Atlanta: CDC/NIOSH, 2004. URL: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2005-100/pdfs/2005-100.pdf>

28. Human Reliability Analysis Handbook / NASA Ames Research Center.
– Moffett Field: NASA, 2000. URL: https://humanfactors.arc.nasa.gov/nhr/HRA_Handbook.pdf (дата звернення: 04.01.2026); Overview of Human Reliability Analysis Methods / Idaho National Laboratory. Idaho Falls: INL, 2026. URL: <https://inldigitallibrary.inl.gov/content/uploads/50/2026/04/7201119.pdf> (дата звернення: 04.01.2026).
29. AS/NZS 1715:2009. Selection, Use and Maintenance of Respiratory Protective Equipment. Sydney: Standards Australia, 2009. URL: <https://www.standards.org.au/standards-catalogue/standard-details?designation=as-nzs-1715-2009> (дата звернення: 18.12.2025); Ruling 1:2023 (чинне уточнення до стандарту). URL: <https://www.sea.com.au/wp-content/uploads/2023/10/AS-NZS-1715-2009-Rul-1-2023.pdf> (дата звернення: 18.12.2025).
30. AS/NZS 1715:2009. Selection, Use and Maintenance of Respiratory Protective Equipment. Wellington: Standards New Zealand, 2009. URL: <https://www.standards.govt.nz/> (дата звернення: 15.12.2025).
31. AS/NZS ISO 16975.3:2023. Respiratory Protective Devices – Selection, Use and Maintenance. Part 3: Fit-Testing Procedures. Sydney: Standards Australia, 2023. URL: <https://www.standards.org.au/standards-catalogue/standard-details?designation=as-nzs-iso-16975-3-2023> (дата звернення: 13.01.2026).
32. GB 2626-2019. Respiratory Protection – Non-Powered Air-Purifying Particle Respirator. Beijing: SAC, 2019. Набув чинності 1 лип. 2020 р. URL: <https://www.sgs.com/en-us/news/2020/04/safeguards-04120-china-releases-an-updated-mandatory-standard-gb-2626-2019-respiratory-protection> (дата звернення: 18.01.2026).
33. Habibi E., Mousavi S.M., Naeini M.J. A Narrative Review of Human Reliability Analysis (HRA) Techniques in Various Industries in Iran. International Journal of Environmental Health Engineering. 2025. Vol. 14, No. 1. Art. 1. DOI: https://doi.org/10.4103/ijehe.ijehe_31_24

34. Aven T. The Science of Risk Analysis: Foundation and Practice. – London; New York: Routledge, Taylor & Francis Group, 2019. 336 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780429029189>
35. Aven T. Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. European Journal of Operational Research. 2016. Vol. 253, Iss. 1. P. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023>
36. Meyer T., Reniers G. Engineering Risk Management. 2nd ed. Berlin; Boston: De Gruyter, 2016. 390 p. URL: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/9783110418040/html>
37. Managing Risks and Risk Assessment at Work: Five Steps to Risk Assessment / HSE. London: HSE, 2014. URL: <https://www.hse.gov.uk/simple-health-safety/risk/steps-needed-to-manage-risk.htm>
38. Голінько В.І., Яворська О.О., Кравченко Б.Д. Система безпечної праці (SSOW). Молодь: наука та інновації: матеріали X Міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених (23-25 листоп. 2022 р., м. Дніпро). Дніпро: НТУ «ДП», 2022. С. 292-297. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2022/molod-2022.pdf>
39. Голінько В.І., Чеберячко С.І., Кравченко Б.Д. Оцінка ризиків на робочому місці методом 5 кроків HSE. Актуальні питання науки, освіти та технологій : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (26 листоп. 2022 р., м. Біла Церква). Ч. 2. Біла Церква, 2022. С. 48-49. URL: <http://www.economics.in.ua/2022/12/26-2.html>
40. Choi J.-Y., Byeon S.-H. HAZOP Methodology Based on the Health, Safety, and Environment Engineering. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020. Vol. 17, No. 9. Art. 3236. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17093236>
41. Кравченко Б.Д. Застосування традиційних методів оцінки професійних ризиків при виборі ЗІЗ. Молодь: наука та інновації: матеріали XII Міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених

(13-15 листоп. 2024 р., м. Дніпро): у 3 т. Дніпро: НТУ «ДП», 2024. Т. 2. С. 10-11. URL: https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna-2024/Scientific_Spring_2024.pdf

42. Кравченко Б.Д., Голінько В.І. Метод «FMEA» в оцінюванні пріоритетного числа ризику засобів індивідуального захисту працівників. Наукова весна: матеріали XIV Міжнар. наук.-техн. конф. аспірантів та молодих вчених (27-29 берез. 2024 р., м. Дніпро). Дніпро: НТУ «ДП», 2024. С. 107-109. URL: https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna-2024/Scientific_Spring_2024.pdf

43. Jaddi Madarsara T., Yari S., Saeidabadi H. Health and Safety Risk Assessment Using a Combined FMEA and JSA Method in a Manufacturing Company. Asian Pacific Journal of Environment and Cancer. 2019. Vol. 2, No. 1. P. 63-68. DOI: <https://doi.org/10.31557/apjec.2019.2.1.63-68>

44. Paperiello C.J., Gertman D.I., Blackman L.N. et al. The SPAR-H Human Reliability Analysis Method / U.S. Nuclear Regulatory Commission, Idaho National Laboratory. Washington: NRC, 2005. 154 p. (NUREG/CR-6883). URL: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6883/cr6883.pdf>

45. Ahn S.I., Kurt R.E., Akyuz E. Application of a SPAR-H based framework to assess human reliability during emergency response drill for man overboard on ships. Ocean Engineering. 2022. Vol. 251. Art. 111089. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111089>

46. Кравченко Б.Д., Радчук Д.І., Чеберячко Ю.І. Щодо надійності людини при використанні респіраторів у виробничих умовах. Українська школа гірничої інженерії: матеріали XVIII Міжнар. наук.-практ. конф. (29 верес. – 4 жовт. 2025 р., м. Східниця). Дніпро, 2025. С. 81-82. DOI: <https://doi.org/10.33271/usme18.081>

47. Hollnagel E. FRAM: The Functional Resonance Analysis Method, Modeling Complex Socio-Technical Systems. Cognition, Technology & Work. 2012. Vol. 15, No. 1. URL: <https://shortlink.uk/1wAMW>

48. Hierarchy of Controls / NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health). Atlanta: CDC/NIOSH. URL: <https://shortlink.uk/1ra5y>
49. A Practical Guide to Hierarchy of Controls. URL: <https://www.safetypros.com/safety-hierarchy-of-controls-a-practical-guide/>
50. Cheberiachko S., Yavorska O., Deriuhin O., Yavorskyi A. valuation of the probability of miners' protection while using filtering respirators. E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 201. Art. 01021. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101021>
51. Кравченко Б.Д., Левін Р.В., Радчук Д.І. Загальний підхід до вибору та застосування захисного одягу. Наукова весна: матеріали XIII Міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених (1-3 берез. 2023 р., м. Дніпро). Дніпро: НТУ «ДП», 2023. С. 124-125. URL: https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna-2023/Scientific_Spring_2023.pdf
52. Кравченко Б.Д., Голінько В.І. Вплив умов експлуатації на захисні властивості засобів індивідуального захисту та професійні ризики. Проблеми екології та енергозбереження: матеріали XVI Міжнар. наук.-техн. конф. (23-24 жовт. 2025 р., м. Миколаїв). Миколаїв: НУК, 2025. С. 438-443. URL: <https://drive.google.com/file/d/1r3IOgsR5t3kcR6eWqwFEcHwkX6Zr24el/view>
53. Кравченко Б.Д., Голінько В.І. Проблеми вибору фільтрувальних респіраторів. Молодь: наука та інновації: матеріали XI Міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених (22-24 листоп. 2023 р., м. Дніпро): у 2 т. Дніпро: НТУ «ДП», 2023. Т. 1. С. 375-376. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2023/molod-2023-vol1.pdf>
54. Cheberiachko Y., Radchuk D., Cheberiachko S., Slavinskyi D., & Kravchenko B. Development of a Filtering Respirator with a Real-Time Monitoring Device for Pressure Drop. Social Development and Security. 2026. Vol. 16, No. 1. P. 217-226. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.1.16>

55. Радчук Д.І., Чеберячко Ю.І., Чеберячко С.І., Наумов М.М., Кравченко Б.Д. Розробка програми для розрахунку прогнозного часу експлуатації протигазових фільтрів. Вісті Донецького гірничого інституту. 2024. № 2(55). С. 80-91. DOI: <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2024-2-80-91>

56. Чеберячко С.І., Радчук Д.І., Дерюгін О.В., Чеберячко Ю.І., Наумов М.М., Кравченко Б.Д. Удосконалення моделі для розрахунку коефіцієнта захисту фільтрувального респіратора від шкідливого аерозолю. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2024. Вип. 48. С. 142-157. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310702>

57. Голінько В.І., Кравченко Б.Д. Вибір фільтрувальних респіраторів та їх експлуатація на основі оцінки ризиків. Актуальні проблеми та перспективи розвитку охорони праці, безпеки життєдіяльності та цивільного захисту: матеріали V Всеукр. наук.-практ. конф. (4-5 трав. 2023 р., м. Одеса). Одеса: ОДАБА, 2023. С. 136-141. URL: http://odaba.edu.ua/upload/files/Zbirnik_konf._OPBZHtaTSZ_2023.pdf

58. Кравченко Б.Д., Голінько В.І. Застосування Human Reliability Analysis (HRA) у визначенні впливу ЗІЗОД на надійність людини. Безпечна, комфортна та спроможна територіальна громада: матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф. (15-17 жовт. 2025 р., м. Дніпро). Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2025. URL: <https://science.nmu.org.ua/ua/conferences/index.php>

59. Голінько В.І., Кравченко Б.Д. Економічно обґрунтований підхід до вибору засобів індивідуального захисту органів дихання. Безпечна, комфортна, спроможна, територіальна громада: матеріали Міжнар. форуму (11-13 жовт. 2023 р., м. Дніпро). Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2023. С. 103-104. URL: <https://science.nmu.org.ua/ua/conferences/Forum/Zbirnyk.pdf>

60. Голінько В.І., Кравченко Б.Д. Роль засобів індивідуального захисту у профілактиці професійних захворювань. Безпечна, комфортна, спроможна, територіальна громада: матеріали Міжнар. форуму (16-18 жовт.

2024 р., м. Дніпро). Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2024. С. 111-112.
URL: <https://science.nmu.org.ua/ua/conferences/Forum/Zbirnyk2024.pdf>

61. Кравченко Б.Д., Голінько В.І. Критерії вибору засобів індивідуального захисту з урахуванням інтегральної оцінки ризиків. Наукова весна: матеріали XV Міжнар. наук.-техн. конф. аспірантів та молодих вчених (26-28 берез. 2025 р., м. Дніпро). Дніпро: НТУ «ДП», 2025. С. 137-138. URL: https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna-2025/Scientific_Spring_2025.pdf

62. Кравченко Б.Д., Голінько В.І. Оптимізація системи захисту органів дихання на підприємстві: від оцінки ризиків до стандартів ISO. Наукова весна: матеріали XVI Міжнар. наук.-техн. конф. аспірантів та молодих вчених (4-6 берез. 2026 р., м. Дніпро). Дніпро: НТУ «ДП», 2026. С. 202-204. URL: https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna-2026/Scientific_Spring_2026.pdf

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ОЦІНКИ ПРОФЕСІЙНИХ РИЗИКІВ ПРИ ВИБОРІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗІЗОД

2.1. Теоретичні основи управління професійними ризиками в системі охорони праці

Управління професійними ризиками є фундаментальною складовою сучасної системи охорони праці, що забезпечує систематичне виявлення, оцінювання та зменшення загроз здоров'ю працівників. Воно передбачає перехід від простого виправлення наслідків аварій, що вже сталися, до завчасного оцінювання ризиків, спрямованого на попередження будь-якої шкоди. Особливо актуальним таке управління стає при експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД) у гірничій промисловості, де високий рівень запиленості, поєднання пилу з газовими факторами, обмежений простір і тривале носіння засобів захисту (до 8 годин) створюють складні комбіновані ризики. У цих умовах ЗІЗОД часто залишаються єдиним реальним бар'єром між працівником і шкідливим виробничим середовищем, а їх неправильний вибір або неякісна експлуатація призводить не лише до зниження захисної ефективності, а й до трансформації ризиків – від інгаляційних до фізіологічних, ергономічних та психофізіологічних. Тому теоретичні основи управління ризиками при виборі та експлуатації ЗІЗОД набувають особливого наукового і практичного значення.

Управління професійними ризиками базується на низці фундаментальних теоретичних концепцій, які визначають сучасний підхід до забезпечення безпеки праці.

Однією з ключових є принцип ALARP (As Low As Reasonably Practicable – настільки низько, наскільки це практично можливо) є одним із наріжних каменів британської системи охорони праці та детально розкритий у керівництві Health and Safety Executive [1,2]. Згідно з цим принципом, ризик повинен бути знижений до рівня, який є розумно досяжним з урахуванням

співвідношення «витрати – отримана користь». Принцип ALARP вимагає не абсолютного усунення ризику (що часто неможливо), а його максимального зменшення до практично прийнятного рівня.

Важливим інструментом практичної реалізації є принцип ALARP (As Low As Reasonably Practicable) тісно пов'язаний з ієрархією заходів контролю ризиків (Hierarchy of Controls) та реалізується через неї, розроблену Національним інститутом охорони праці США (NIOSH) і закріплену в міжнародних стандартах та керівництвах [3,4]. Ієрархія визначає порядок пріоритетності заходів від найбільш ефективних (усунення небезпеки) до найменш ефективних (засоби індивідуального захисту). ЗІЗОД, перебуваючи на останньому рівні ієрархії, є найменш ефективним з теоретичної точки зору, оскільки не усуває небезпеку, а лише ізолює від неї працівника. Однак у гірничій промисловості, де вищі рівні контролю часто технічно або економічно недоцільні, ЗІЗОД фактично стають основним бар'єром захисту (п.1.4).

Значний внесок у розуміння механізмів виникнення інцидентів зробив Джеймс Різон, який розробив модель «швейцарського сиру» (Swiss Cheese Model). Згідно з цією моделлю, будь-яка виробнича система має кілька захисних бар'єрів (технічних, організаційних, адміністративних, людських). Кожен бар'єр свої приховані недоліки або помилки, які схожі на дірки в шматку сиру. Аварія, нещасний випадок або професійне захворювання відбувається лише тоді, коли дірки в усіх бар'єрах вишиковуються в один ряд, дозволяючи небезпечному фактору досягти працівника [5]. З точки зору ЗІЗОД це означає, що навіть високоякісний респіратор (один із бар'єрів) не гарантує захист, якщо слабкими є інші бар'єри – неправильний підбір, погане прилягання, відсутність контролю чи зниження надійності працівника через фізіологічне навантаження.

Цю ідею суттєво розвиває Bow-Tie Analysis (аналіз «метелик») – графічний метод, який поєднує дерево причин і дерево наслідків. У центрі «метелика» знаходиться небезпечна подія (наприклад, проникнення

шкідливих аерозолів у зону дихання), зліва – превентивні бар'єри (правильний вибір ЗІЗОД, fit-test, навчання), справа – відновлювальні бар'єри (медична допомога, реабілітація). Метод наочно показує, які саме бар'єри є слабкими при експлуатації ЗІЗОД і де необхідно посилити контроль [6].

Доповнює дані моделі Energy Barrier Model (Модель енергетичних бар'єрів), запропонована Вільямом Хеддоном. В основі цієї теорії лежить проста думка: будь-яка травма чи професійне захворювання – це наслідок неконтрольованого передавання енергії (механічної, термічної, хімічної чи кінетичної) на організм людини. Захист полягає у створенні бар'єрів, які запобігають контакту працівника з цією енергією. Хеддон виділив десять послідовних стратегій для запобігання травмам, які спрямовані або на саме джерело енергії, або на створення перешкод між цим джерелом і людиною. У випадку ЗІЗОД фільтрувальний респіратор виступає як бар'єр, що стримує хімічну та механічну енергію пилових частинок і газів. Однак ефективність цього бар'єра залежить від його цілісності, правильного прилягання та стійкості до зовнішніх впливів (волога, температура, механічні пошкодження) [7].

Особливої уваги в умовах використання ЗІЗОД набуває теорія трансформації ризику. Використання ЗІЗОД не усуває небезпеку, а лише змінює її форму – з первинної інгаляційної (пил, газ) на вторинну комбіновану (фізіологічне навантаження, тепловий стрес, ергономічні незручності, зниження когнітивних функцій, психологічний дискомфорт, зниження надійності людини). Така трансформація вимагає комплексного підходу до оцінки ризиків, оскільки ігнорування вторинних ризиків може призвести до нових загроз для здоров'я працівника [8,9].

Важливим теоретичним напрямом є оцінка надійності людини (Human Reliability Analysis – HRA). Методи HRA, зокрема SPAR-H, дозволяють кількісно оцінювати ймовірність помилкових дій працівника залежно від праці, рівня стресу, втоми, ергономіки робочого місця та фізіологічного навантаження. При тривалому носінні ЗІЗОД надійність людини суттєво

знижується через теплове навантаження, підвищену вологість під маскою, обмеження дихання та когнітивне навантаження, що необхідно враховувати в інтегральній оцінці ризиків [10].

Сучасна теорія безпеки також активно розвиває концепцію інженерії стійкості (Resilience Engineering), яка акцентує увагу не лише на запобіганні відмовам, а й на здатності системи відновлюватися після збоїв і адаптуватися до змінних умов. У контексті ЗІЗОД це означає необхідність створення таких засобів захисту та процедур їх використання, які залишаються ефективними навіть за непередбачуваних відхилень (зміна мікроклімату, інтенсивності праці, індивідуальних особливостей працівника) [11].

Таким чином, розглянуті теоретичні концепції (ALARP, ієрархія контролю ризиків, модель «швейцарського сиру», Bow-Tie Analysis, Energy Barrier Model, теорія трансформації ризику, HRA та Resilience Engineering) формують потужне методологічне підґрунтя для комплексного управління ризиками при експлуатації ЗІЗОД і підводять до необхідності аналізу їх нормативно-правової реалізації та практичного інструментарію.

Нормативно-правова основа є практичним втіленням цих теоретичних принципів і створює обов'язковий правовий каркас для управління ризиками. Детальний порівняльний аналіз міжнародних та національних нормативних документів наведено в розділі 1 (п. 1.2). У даному розділі розглядаються теоретичні положення цих документів та їхній вплив на формування інтегральної оцінки ризиків при виборі та експлуатації ЗІЗОД.

На міжнародному рівні ключовими документами є ISO 45001:2018, який запроваджує ризик-орієнтований підхід і цикл PDCA, ISO 31000:2018, що визначає загальну структуру управління ризиками, та EN IEC 31010:2019 (ДСТУ EN IEC 31010:2022), який надає конкретні методи оцінки ризиків [12-14].

Центральне місце серед них посідає ISO 45001:2018 «Системи управління охороною праці – Вимоги та настанови щодо застосування». Відповідно до принципів стандарту, управління безпекою має працювати на

випередження, а це неможливо без якісного та своєчасного виявлення джерел небезпеки. Первинним етапом є якісна ідентифікація загроз [12]. Для цього використовуються такі загальносистемні методи, як Мозковий штурм (Brainstorming) та SWOT-аналіз. Теоретична цінність Мозкового штурму полягає в залученні безпосередніх виконавців робіт, що дозволяє виявити неявні ергономічні ризики та психофізіологічні чинники, наприклад, накопичення втоми в другій половині зміни, які часто ігноруються сухими статистичними звітами. SWOT-аналіз, у свою чергу, допомагає оцінити не тільки внутрішні технічні проблеми самого підприємства, а й зовнішні загрози – наприклад, перебої з доставкою респіраторів чи невдоволення серед працівників. Тобто, за допомогою SWOT-аналізу можна врахувати як внутрішні мінуси виробництва, так і зовнішні ризики. Це дозволяє вивести управління безпекою на рівень керівництва підприємства.

Доповнює ISO 45001 стандарт ISO 31000:2018 «Управління ризиками – настанови», який є універсальним і рекомендаційним, проте слугує методологічною основою для розробки галузевих методик оцінки ризиків [13].

Практичним інструментарієм реалізації ISO 31000 є EN ІЕС 31010:2019 (в Україні – ДСТУ EN ІЕС 31010:2022) «Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику». Цей стандарт пропонує широкий набір методів оцінки ризиків і підкреслює циклічний характер процесу: ідентифікація → аналіз → оцінка [14].

На європейському рівні спеціальні вимоги до ЗІЗОД встановлюють EN 149:2001+A1:2009, гармонізований в Україні як ДСТУ EN 149:2017 [15,16], та ДСТУ EN 529:2006 «Засоби індивідуального захисту органів дихання. Рекомендації щодо вибору, використання, обслуговування та навчання» [17]. Стандарт EN 149:2001+A1:2009 регламентує технічні характеристики фільтруючих півмасок класів FFP1, FFP2 та FFP3, лабораторні методи випробувань і маркування. Доповнює його ДСТУ EN 529:2006, який регламентує створення на підприємстві повноцінної програми захисту органів дихання, яка обов'язково має включати процедури навчання персоналу,

правила періодичної перевірки щільності прилягання, очищення, дезінфекції, зберігання та контролю за своєчасністю утилізації відпрацьованих елементів. Своєю чергою, оцінка спроможності самого виробу затримувати шкідливі домішки здійснюється за критеріями ДСТУ EN 149:2017 «Засоби індивідуального захисту органів дихання. Фільтрувальні напівмаски для захисту від аерозолів. Вимоги, випробування, маркування». Цей стандарт класифікує напівмаски за класами ефективності (FFP1, FFP2, FFP3) на основі їхнього сумарного коефіцієнта проникнення в лабораторних умовах [16].

В Україні нормативно-правове регулювання базується на гармонізації з європейським законодавством. Основоположним актом є Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-XII, який закріплює обов'язок роботодавця забезпечувати працівників сертифікованими ЗІЗ та проводити оцінку ризиків [18]. Практичну реалізацію сертифікації забезпечує Технічний регламент засобів індивідуального захисту (Постанова КМУ № 771 від 21.08.2019) [19].

Важливим процедурним документом є Наказ Міністерства соціальної політики України від 29.11.2018 № 1804, яким затверджено НПАОП 0.00-7.17-18 «Мінімальні вимоги безпеки і охорони здоров'я при використанні працівниками засобів індивідуального захисту на робочому місці». Цей нормативний акт чітко визначає алгоритм дій роботодавця: перед вибором ЗІЗ необхідно провести всебічну оцінку ризиків, визначити необхідні технічні характеристики засобів захисту та зіставити їх із паспортними даними. Таким чином, НПАОП 0.00-7.17-18 переводить загальні вимоги закону в площину конкретних інженерних дій [19].

Значним кроком у розвитку практичного управління ризиками ЗІЗ стало «Положення про ідентифікацію невідповідностей та розрахунок пріоритетного числа ризику засобів індивідуального захисту працівників», яке адаптує метод FMEA з розрахунком RPN саме для засобів індивідуального захисту (додаток А).

Для узагальнення теоретичних аспектів основних нормативних документів складено табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Теоретичні основи управління ризиками в ключових нормативних документах

Документ	Основний теоретичний принцип	Рівень управління	Обмеження для інтегральної оцінки ЗІЗОД	Значення для дослідження
ISO 45001:2018	Ризик-орієнтований підхід та цикл PDCA	Системний (організаційний)	Не містить конкретних методик динамічної оцінки ЗІЗ	База для впровадження моделі за циклом PDCA
ISO 31000:2018	Повний процес управління ризиками	Стратегічний та оперативний	Рекомендаційний, відсутня специфіка ЗІЗОД	Теоретична основа для інтегральної моделі
EN IEC 31010:2019 / ДСТУ EN IEC 31010:2022	Методи оцінки ризику	Операційний	Статичні методи, слабе врахування психофізіології	Інструментарій оцінки
EN 149:2001 та ДСТУ EN 149:2017	Клас захисту та лабораторні критерії	Технічний (конструктивний)	Статичний характер, відсутність динаміки експлуатації	Вихідні дані для розрахунку Кзр
ДСТУ EN 529:2006	Рекомендації щодо вибору та обслуговування	Операційний	Рекомендаційний, слабкий акцент на психофізіологію	Основа для вибору та моніторингу
Закон «Про охорону праці»	Обов'язковість забезпечення ЗІЗ	Правовий	Загальний характер, відсутність кількісних методів	Правове підґрунтя
«Положення» 2023 (FMEA та RPN)	Адаптація FMEA для ЗІЗ	Операційний (підприємство)	Статичний, обмежене врахування динамічних факторів	База для удосконалення методики оцінки ризиків

Джерело: сформовано автором на основі даних [12-18], (додаток А)

Попри наявність розвиненої нормативної бази та фундаментальних теоретичних концепцій, аналіз виявив низку суттєвих прогалин:

- статичний характер більшості нормативних документів і методів оцінки ризиків, які орієнтовані переважно на етап вибору та початкової сертифікації ЗІЗОД і майже не регулюють динамічні процеси, що відбуваються протягом робочої зміни (зміна прилягання обтюратора, зниження еластичності ремінців, накопичення теплового та вологісного навантаження);
- слабе врахування психофізіологічних факторів впливу ЗІЗОД на працівника (тепловий стрес, втома, зниження уваги, когнітивні порушення);
- відсутність інтегрального підходу, який би одночасно поєднував технічні характеристики ЗІЗОД, надійність людини, динаміку експлуатаційних ризиків та економічні наслідки;
- фрагментарність теоретичних моделей — більшість концепцій (Swiss Cheese, Bow-Tie, HRA) розглядають окремі аспекти, але не пропонують єдиної інтегральної моделі для ЗІЗОД у складних виробничих умовах.

Саме ці прогалини обумовлюють необхідність розвитку теоретичних засад інтегральної оцінки професійних ризиків при виборі та експлуатації ЗІЗОД.

Таким чином, теоретичні концепції (ALARP, ієрархія контролю ризиків, модель «швейцарського сиру», Bow-Tie Analysis, Energy Barrier Model, теорія трансформації ризику, HRA) та нормативно-правова база створюють необхідне методологічне та правове підґрунтя для управління професійними ризиками. Однак виявлені системні прогалини – статичність підходів, недостатнє врахування динаміки експлуатації ЗІЗОД та психофізіологічних факторів – не дозволяють забезпечити комплексну інтегральну оцінку ризиків. Це обґрунтовує необхідність подальшого розгляду теоретичних засад оцінки надійності людини (п. 2.2), методичних підходів до ідентифікації експлуатаційних ризиків (п. 2.3) та математичних основ розрахунку ефективності захисту (п. 2.4).

2.2. Теоретичні засади оцінки надійності людини при тривалій експлуатації ЗІЗОД

Проведений у першому розділі аналіз нормативно-правової бази та сучасних методів оцінки професійних ризиків показав, що більшість існуючих підходів недостатньо враховує людський фактор при тривалому використанні засобів індивідуального захисту органів дихання. Ретроспективний аналіз наукових джерел свідчить про те, що проблематика надійності людини в системі охорони праці залишається недостатньо висвітленою та досліджується обмежено. Зокрема, існуючі дослідження здебільшого зосереджені на високоризикових галузях (авіація, ядерна енергетика, військова сфера), тоді як у загальновиробничих умовах це питання розглядається лише фрагментарно. У п. 2.1 було встановлено, що теоретичні концепції управління ризиками підкреслюють критичну роль людини як останньої та найвразливішої ланки в системі безпеки. Саме тому оцінка надійності людини (Human Reliability) набуває особливого значення при розробці інтегральної моделі професійних ризиків ЗІЗОД.

Надійність людини у системі «людина – ЗІЗОД – виробниче середовище» визначається як імовірність безпомилкового виконання завдання протягом заданого часу в конкретних умовах [21]. У сучасній структурі охорони праці людський чинник залишається одним із найбільш вразливих елементів системи забезпечення промислової безпеки [22,23]. Попри впровадження високотехнологічних ЗІЗ, саме суб'єктивні дії працівника – керування обладнанням, ідентифікація загроз та прийняття оперативних рішень – визначають стабільність виробничого циклу. Здатність персоналу до безпомилкової роботи у специфічних умовах середовища описується категорією «надійність людини» [24]. Даний показник є інтегральним, оскільки він акумулює вплив мікрокліматичних параметрів (температура, вологість), фізичних чинників (шум), а також психофізіологічних станів (втома, стрес, рівень концентрації).

Відтак, «надійність людини» виступає об'єктивним критерієм безпеки, що дозволяє кількісно оцінити ефективність праці за конкретних умов. Використання цього показника відкриває можливості для перегляду тривалості експлуатації ЗІЗОД, наукового обґрунтування режимів праці та відпочинку, а також оптимізації організаційних заходів [25]. Дослідження впливу ЗІЗ на надійність працівника є актуальним завданням, що забезпечує перехід від формального доказу безпеки до об'єктивної оцінки, заснованої на реальному фізіологічному навантаженні. Теоретичною основою її оцінки є напрямок Human Reliability Analysis (HRA), який виник у 1960-1970-х роках у ядерній енергетиці та згодом поширився на інші галузі промисловості з підвищеним ризиком [26,27].

Окремим напрямом є застосування методів аналізу надійності людини HRA. Класичним прикладом є розроблена Свейном та Гуттманом методика THERP [21], яка базується на імовірнісному аналізі безпеки через побудову дерева подій та відмов. Натомість метод HEART [28], запропонований Вільямсом, орієнтований на типологію завдань та ідентифікацію факторів, що сприяють виникненню помилок. Хоча HEART дозволяє оперативно визначати пріоритетні напрями покращення умов праці, він характеризується певною суб'єктивністю через залежність від експертних оцінок.

Методика SHERPA (Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach), розроблена Ембрі [29,30], базується на ієрархічному аналізі завдань (НТА) і дозволяє ідентифікувати потенційні помилки на кожному етапі виконання операції. Ключовою перевагою цього підходу є його висока прикладність для розробки інструктажу та підготовки персоналу. У контексті експлуатації ЗІЗОД метод SHERPA виступає ефективним інструментом прогнозування критичних помилок під час надягання або знімання засобів захисту. Зокрема, у праці [30] дана методика була успішно застосована для виявлення деструктивних дій персоналу, що дозволило запобігти їх повторенню шляхом превентивного планування процесів.

У сучасному ризик-менеджменту та аналізі надійності людини HRA одним із найбільш гнучких інструментів кількісного оцінювання є метод стандартизованого аналізу ризиків підприємства (Standardized Plant Analysis Risk-Human Reliability Analysis - PAR-H), розроблений спільно Національною лабораторією Айдахо (INL) та Комісією з ядерного регулювання США (NRC) [31]. Головна перевага методу полягає у можливості структуризації діяльності працівника на два базові типи завдань: діагностика (розпізнавання ситуації, прийняття рішень; ймовірності помилки при діагностиці $NHEPd = 0,01$) та безпосередня дія (ймовірності помилки при виконання дії $Action NHEPa = 0,001$). Тобто, шанс 1 на 100 та 1 на 1000, що оператор неправильно оцінить ситуацію та помилиться під час безпосереднього виконання дій відповідно [31,32].

Розрахунок підсумкової ймовірності помилки людини Human Error Probability (HEP) здійснюється шляхом коригування базових значень за допомогою інтегрального коефіцієнта, що базується на аналізі восьми чинників формування працездатності Performance Shaping Factors (PSFs), серед яких найбільший вплив мають: доступний час, стрес, складність завдання, досвід, ергономіка, процедури, фітнес та робоче навантаження [28]:

$$HEP = NHEP \prod_{i=1}^8 PSF_i, \quad (2.1)$$

де NHEP (Nominal Human Error Probability) – номінальна (базова) ймовірність помилки для певного типу завдання;

Якщо сумарний вплив негативних чинників наближає значення ймовірності до одиниці ($HEP \geq 1,0$), використовується математична коригувальна модель, коли негативний вплив факторів дуже високий. Вона гарантує, що розрахована ймовірність HEP не перевищить максимально можливе значення 1,0 [28]:

$$HEP = \frac{NHEP \times PSFc}{NHEP \times (PSFc - 1) + 1}, \quad (2.2)$$

де PSF_i – композитний (спільний) добуток усіх врахованих коефіцієнтів.

Зважаючи на первинну «атомну» специфіку SPAR-H, у процесі його еволюції та адаптації до загальнопромислових умов виникла низка модифікацій. Зокрема, розроблено моделі для важких аварійних умов (Level 2 PSA HRA), які переглядають шкалу чинників «стрес» та «нестача часу» в бік екстремальних значень [32]. Окремим сучасним напрямом є інтервально-імовірнісні модифікації SPAR-H, що базуються на теорії нечітких множин (Fuzzy Sets), де замість жорстких дискретних мультиплікаторів експертам дозволяється задавати інтервальні значення вагових коефіцієнтів, що мінімізує суб'єктивізм оцінки в умовах невизначеності [33]. Для нафтогазової та хімічної промисловості запропоновано модифікації зі звуженим та більш чітким розмежуванням між чинниками «процеси проектування/ергономіка» та «робочі процеси» з метою підвищення надійності між експертними оцінками (inter-rater reliability) [34,35].

Вплив ергономічних, фізіологічних та мікрокліматичних факторів під маскою. В межах дисертаційного дослідження традиційна структура чинників SPAR-H потребує специфічного розширення, оскільки експлуатація ЗІЗОД чинить прямий негативний вплив на такі ключові PSFs як Ergonomics / Human-Machine Interface (Ергономіка), Stress (Стрес) та Fitness for Duty (Відповідність психофізіологічного стану виконуваних робіт). Тривала експлуатація фільтрувальних напівмасок супроводжується формуванням замкненого підмаскового простору, мікрокліматичні параметри якого суттєво відрізняються від параметрів виробничого середовища. Фізіологічні дослідження показують, що вже через 30-40 хвилин безперервної роботи температура під маскою підвищується до 34-35 °C, а відносна вологість досягає критичних понад 80-90 % внаслідок затримки тепла і вологи видихуваного повітря [36,37]. Це призводить до порушення процесів

терморегуляції організму, викликаючи відчуття теплового дискомфорту, яке в структурі SPAR-H класифікується як стійкий внутрішній стресор Physiological Stress.

Автори роботи [38] досліджували фізіологічні реакції організму людини під час роботи в респіраторах у спекотних умовах. Було встановлено, що використання повнолицевих масок суттєво підвищує навантаження на серцево-судинну та дихальну системи, а також збільшує рівень метаболізму. При цьому спостерігається підвищення температури тіла та значне погіршення суб'єктивного самопочуття користувачів через виражений дискомфорт. На підставі отриманих результатів автори дійшли висновку, що тривале носіння респіраторів у жаркому мікрокліматі створює реальні ризики перегріву організму та зниження функціональної працездатності працівника.

У роботі [39] проведено порівняльне дослідження шести різних типів респіраторів за умов варіювання температури та відносної вологості повітря. Встановлено, що респіратори з більшою кількістю фільтрів створюють менший опір вдиху і, відповідно, менше фізіологічне навантаження на організм користувача. Таким чином, тип респіратора має суттєвий вплив на фізіологічний стан працівника. Водночас у дослідженні не було розглянуто питання суб'єктивної оцінки комфортності використання різних конструкцій респіраторів.

Окрім теплового навантаження, критичним чинником є ефект «мертвого простору» (dead space) фільтрувального виробу. Під час видиху частина повітря з високим вмістом вуглекислого газу затримується під маскою і вдихається повторно. Концентрація CO_2 в підмасковому просторі може коливатися в межах 1,5-3,0 %, що провокує легку форму гіперкапнії [40,41].

Дослідження з Нової Зеландії [42] показали, що температура шкіри користувача в підмасковому просторі зростає від 1°C до 4,8 °C в залежності від інтенсивності роботи, а пульс збільшується на 2-6 ударів/хв. В [43] становили, що при одягненому респіраторі вологість в підмасковому просторі збільшується швидше ніж температура, тому вологість повітря є

більш критичним показником для часу носіння, особливо для короткострокових періодів. Тож підвищення температури шкіри під респіратором може пояснювати небажання людей використовувати ЗІЗ.

Фізіологічною відповіддю організму на гіперкапнію та підвищений опір диханню (опір матеріалу фільтра) є компенсаторне збільшення частоти серцевих скорочень (ЧСС), легеневої вентиляції та задишки. На когнітивному рівні це трансформується у звуження оперативного поля зору, уповільнення реакції та зниження концентрації уваги працівника при використанні складного обладнання [40,41].

В роботі [44] встановили, що при використанні респіраторів на 10 % зростає споживання кисню та падає точність психомоторики, а отже працювати з точними приладами чи у стресі стає набагато складніше. В роботі [45] автори підтвердили, що респіратори, особливо повнолицьові маски, погіршують дрібну моторику, зорову точність і когнітивні функції. Зокрема, учасники гірше справлялися із завданнями, що вимагали уважності та логічного мислення, навіть за відсутності значного уповільнення виконання завдання.

В роботі [46] автори розглядали негативний violent вплив ЗІЗ від перегріву, обмеження вільних рухів, неможливість нормально говорити та різні інші фактори, що підвищують стрес. Дослідження показали, що використання ЗІЗ підвищує рівень фізичного та психічного стресу на 10-25%, що збільшує загальну тривожність на 35 % та рівень стресу на 20-30%. Результати свідчать про те, що використання ЗІЗ корелює з підвищеним рівнем як фізичного, так і психічного стресу, що призводить до збільшення тривожності на 35% та збільшення стресу на 20-30%.

У дослідженні [47] підіймається питання фактичної захисної ефективності респіраторів в умовах інтенсивного фізичного навантаження. Автори акцентують увагу на опорі диханню як на критичному чиннику, що безпосередньо зумовлює підвищення енерговитрат, передчасну втому та деградацію загальної працездатності. Вплив людського фактора при

експлуатації ЗІЗОД, зокрема щільність прилягання до обличчя, функціональний стан та психоемоційний настрій користувача, детально розглянуто у праці [48]. Підкреслюється, що сукупність фізичних та психофізіологічних показників є визначальними параметрами ефективності системи.

Результати соціологічних опитувань серед медичного персоналу [49] вказують на запит щодо створення більш ергономічних моделей, які б мінімізували опір диханню, запобігали гіпертермії та враховували антропометричні особливості (зокрема наявність волосся на обличчі). У роботі [50] обґрунтовано необхідність врахування інтеракції «користувач – респіратор» при оцінюванні продуктивності праці. Проте, попри широкий спектр досліджень, наразі відсутні уніфіковані математичні методики для кількісного розрахунку впливу ЗІЗОД на фізіологічний стан та рівень зниження працездатності людини.

Експериментальне вимірювання взаємозв'язку між використанням різних видів ЗІЗ, продуктивністю праці та суб'єктивними показниками комфорту, описане в роботі [51], доповнює базу знань про вплив засобів захисту на функціональний стан фахівців. Проте, попри активне впровадження методик HRA, у сучасних дослідженнях все ще спостерігається дефіцит верифікованих кількісних даних, необхідних для точного прогнозування динаміки зниження надійності людини при тривалому використанні ЗІЗОД.

При тривалій експлуатації ЗІЗОД на надійність працівника негативно впливають специфічні фактори. Згідно з результатами численних досліджень, тривале носіння респіратора призводить до підвищення температури та відносної вологості в підмасковому просторі, що викликає тепловий стрес, прискорене серцебиття, підвищене потовиділення та швидке накопичення втоми. Обмеження поля зору, утруднене дихання та неможливість нормально спілкуватися посилюють психоемоційне навантаження. Усе це призводить до зниження концентрації уваги, уповільнення реакції, погіршення дрібної моторики та зростання ймовірності помилкових дій.

Для забезпечення системності аналізу, виявлені у науковій літературі та власних досліджень фізіологічні та ергономічні ефекти тривалого використання засобів захисту було структуровано відповідно до класифікації контекстуальних чинників ризику (PSF) методології SPAR-H (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

Систематизація впливу експлуатаційних факторів ЗІЗОД на параметри надійності людини за класифікацією SPAR-H

Категорія чинників за SPAR-H (PSF)	Специфічні прояви та фізіологічні реакції при експлуатації ЗІЗОД	Вплив на когнітивну діяльність та надійність людини	Літературні джерела
Фізіологічний / психічний стрес (<i>Physiological / Psychological Stress</i>)	Підвищення температури (до 34,5-36,0 °C) та вологості (до 95-98 %) під маскою; тепловий стрес; прискорення пульсу на 2-6 уд./хв; зростання загального стресу на 20-30 % та тривожності на 35 %	Швидке накопичення втоми, погіршення самопочуття, роздратованість, суб'єктивне небажання використовувати ЗІЗ	[38], [42], [43], [46]
Ергономічні чинники (<i>Ergonomics / Human-Machine Interface</i>)	Опір диханню на вдиху/видиху; механічний тиск смуг обтюрації на обличчя; обмеження поля зору; утруднення мовного зв'язку	Локальна ішемія тканин обличчя, больові відчуття; виникнення бар'єра для оперативної комунікації у зміні	[39], [46], [47], [49]
Когнітивні можливості (<i>Human Capabilities / Complexity</i>)	Часткове повторне вдихання видихнутого повітря (ефект dead space), зростання концентрації CO ₂ до 1,5-3,0 %, явища легкої гіперкапнії	Звуження оперативного поля зору, уповільнення швидкості реакції, погіршення дрібної моторики та логічного мислення	[44], [45], [48], [50]
Відповідність завданням (<i>Task Characteristics</i>)	Збільшення енерговитрат організму (споживання кисню зростає на 10 %); деградація працездатності при тривалій зміні	Падіння точності виконання психомоторних дій, неможливість тривалої роботи з точними приладами в умовах стресу	[44], [45], [47], [31]

Джерело: сформовано автором за матеріалами [31,38,39,42-50] та власних досліджень

Аналіз сформованої табл. 2.2 дозволяє зробити кілька принципових наукових висновків:

1) Усебічний негативний вплив. Доведено, що експлуатація ЗІЗОД діє на працівника не ізольовано, а комплексно, перекриваючи одночасно чотири ключові групи чинників форми виконання (PSF) методу SPAR-H. Це підтверджує, що фізіологічне навантаження від маски безпосередньо трансформується у зниження когнітивної надійності.

2) Мало вивчене питання. Систематизація джерел показує, що хоча фізіологічні параметри (пульс, температура, CO_2) виміряні експериментально у роботах [38,42,44], у відомих дослідженнях [47-50] повністю відсутній математичний апарат, який дозволив би пов'язати ці фізичні величини з підсумковою ймовірністю помилки працівника (HEP).

3) Обґрунтування модифікації. Оскільки базовий метод SPAR-H оперує лише дискретними експертними оцінками PSF, наприклад, «наявний стрес / відсутній стрес», стає очевидною необхідність переходу до безперервних математичних залежностей. Параметри підмаскового простору, наведені у таблиці, мають виступати не просто описовими характеристиками, а аргументами для розрахунку вагових коефіцієнтів у модифікованій структурі оцінки професійних ризиків, що детально реалізовано у наступному розділі.

З погляду ергономіки, постійний механічний тиск смуг обтюрації та елементів кріплення на м'які тканини обличчя викликає локальну ішемію та больові відчуття. За класичною шкалою SPAR-H, наявність виражених ергономічних невідповідностей або важких умов праці (Poor / Extreme Ergonomics) збільшує ймовірність відмови або помилки працівника в 5-10 разів [31,32]. Експериментальні порівняльні дослідження надійності (зокрема, з використанням методів CREAM та SPAR-H) підтверджують, що поєднання мікрокліматичного дискомфорту та підвищеного респіраторного зусилля призводить до експоненціального зростання людських помилок, причому цей негативний тренд практично не нівелюється високою професійною кваліфікацією чи мотивацією працівника [52]. Таким чином, розробка теоретичних засад оцінки надійності людини при експлуатації ЗІЗОД вимагає обов'язкової інтеграції параметрів підмаскового простору (опір диханню,

концентрація CO₂, температура) у загальну структуру контекстуальних чинників ризику, що є науковим підґрунтям для створення превентивних алгоритмів захисту працівників.

Аналіз останніх досліджень показує, що повнолицьові респіратори значно збільшують навантаження на серцево-судинну та дихальну системи, викликаючи відчуття дискомфорту та перегріву [38]. Дослідження з Нової Зеландії продемонстрували зростання температури шкіри в підмасковому просторі від 1 °C до 4,8 °C залежно від інтенсивності роботи, а також збільшення пульсу на 2-6 ударів за хвилину [42]. Інші автори зазначають, що при використанні респіраторів на 10 % зростає споживання кисню та знижується точність психомоторних дій, що особливо небезпечно при виконанні точних операцій [44]. Таким чином, стандартний метод SPAR-H потребує подальшої адаптації до умов тривалого використання ЗІЗОД, оскільки не повністю враховує вплив мікрокліматичних, фізіологічних та ергономічних факторів, характерних для гірничої промисловості. Це обґрунтовує необхідність розробки модифікованої моделі надійності людини в третьому розділі дисертації.

У першому розділі було показано, що чинна нормативна база (ISO 45001, ДСТУ EN 529, НПАОП) майже не регулює психофізіологічні аспекти використання ЗІЗОД. Саме тому виникає необхідність модифікації методу SPAR-H шляхом введення додаткових коефіцієнтів, що враховують специфіку експлуатації засобів захисту органів дихання. Така модифікація дозволяє перейти від загальної оцінки надійності людини до спеціалізованої оцінки, орієнтованої саме на умови тривалого використання ЗІЗОД у складних мікрокліматичних умовах.

Аналіз теоретичних засад оцінки надійності людини показав, що існуючі методи HRA, зокрема SPAR-H, надають необхідний інструментарій для кількісної оцінки ймовірності помилок. Однак стандартний варіант методу недостатньо враховує специфіку тривалій експлуатації ЗІЗОД. Виявлені прогалини підтверджують доцільність розробки в третьому розділі

модифікованої моделі надійності людини на основі SPAR-H (п. 3.1), яка включатиме додаткові коефіцієнти, що відображають вплив теплового навантаження, мікроклімату під маскою та психофізіологічного стану працівника. Така модель стане важливим елементом майбутньої інтегральної оцінки професійних ризиків.

2.3. Теоретико-методичні основи ідентифікації та оцінки експлуатаційних ризиків ЗІЗОД

Логіка побудови дисертаційного дослідження вимагає послідовного переходу від аналізу загальних організаційно-нормативних підходів до формування конкретного математичного та аналітичного інструментарію управління безпекою. У 1 розділі роботи було детально критично проаналізовано чинну нормативно-правову базу і констатовано, що сучасні стандарти розглядають ЗІЗОД переважно у статичному стані, майже повністю ігноруючи динаміку зміни їхніх захисних властивостей у реальних умовах експлуатації. У п. 2.1 другого розділу цей висновок став підґрунтям для розробки концептуальної моделі системи «людина – ЗІЗОД – виробниче середовище», де засіб захисту було визначено не як ізольований технічний пристрій, а як інтегрований елемент, що безпосередньо взаємодіє з організмом працівника. У підрозділі 2.2 досліджено психофізіологічну складову цієї взаємодії за допомогою методології SPAR-H. Було теоретично доведено та систематизовано у вигляді таблиці, що тривалий опір диханню, теплове навантаження та ергономічний дискомфорт трансформуються у когнітивну втому шахтаря, суттєво підвищуючи ймовірність його помилкових дій та відмови системи захисту в цілому.

Забезпечення безпеки працівників у шкідливих умовах виробництва, особливо в гірничій промисловості, значною мірою залежить від ефективності ЗІЗОД. Проте, як показує практика, реальний рівень захисту респіраторів під час роботи часто виявляється значно нижчим за той, що гарантує завод-

виробник. Це пов'язано з появою різноманітних дефектів та невідповідностей безпосередньо під час використання масок (наприклад, порушення герметичності через розтягування ременів, забруднення чи зношення клапанів, неправильне надягання тощо) [53, 54].

Головна проблема полягає в тому, що чинні нормативні документи та методи оцінювання професійних ризиків розглядають ЗІЗОД як абсолютно надійні пристрої у незмінному (статичному) стані. Вони не враховують, як саме технічні несправності, що виникають протягом робочої зміни, та умови праці впливають на втрату захисних властивостей респіратора [55,56]. Наявні підходи зазвичай оцінюють ризики на основі суб'єктивних думок експертів або приблизних матриць ризику, що не дозволяє точно спрогнозувати відмову засобу захисту.

Саме тому виникає об'єктивна наукова необхідність залучення та адаптації класичних методів системного аналізу безпеки. Як методичний фундамент для ідентифікації експлуатаційних ризиків ЗІЗОД пропонується інтегроване застосування методів дослідження небезпеки та працездатності Hazard and Operability Study (HAZOP) та аналізу видів і наслідків відмов Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) з розрахунком показника пріоритетності ризику Risk Priority Number (RPN). Це дозволить об'єднати технічну надійність вузлів респіратора та людський фактор, описаний у попереднє, у межах єдиної аналітичної процедури.

У загальній системі управління професійною безпекою на підприємствах гірничої промисловості особливе місце посідає етап ідентифікації небезпек та оцінювання ризиків, що виникають безпосередньо під час експлуатації ЗІЗОД. Як було обґрунтовано у попередніх підрозділах, ЗІЗОД є складним технічним елементом у системі «людина – засіб захисту – виробниче середовище». Його захисна ефективність залежить не лише від первинних сертифікаційних показників, але й від динаміки зміни технічного стану пристрою, впливу деструктивних чинників середовища та психофізіологічних реакцій працівника. Традиційні підходи до оцінювання

ризиків, що базуються на статичних матричних методах, не дозволяють повною мірою врахувати причинно-наслідкові зв'язки між виникненням дрібних технічних несправностей, ергономічних невідповідностей та підсумковою відмовою системи захисту [57].

У випадку ЗІЗОД ризик не є постійною величиною і змінюється впродовж робочої зміни. На ефективність респіратора впливають тривалість носіння, фізичне навантаження, вологість, температура, запиленість середовища та фізіологічний стан працівника. Через це навіть незначні технічні або ергономічні порушення можуть поступово призводити до втрати захисних властивостей засобу захисту. Тому оцінювання ризику під час експлуатації ЗІЗОД повинно враховувати динаміку змін технічного та функціонального стану системи.

Наукова доцільність поєднання HAZOP та FMEA зумовлена їх взаємодоповнюваністю. Метод HAZOP використовується для систематичного виявлення відхилень від нормального режиму експлуатації та аналізу їх можливих причин і наслідків. Для ЗІЗОД це дає можливість виявляти потенційно небезпечні ситуації, пов'язані зі збільшенням опору диханню, порушенням герметичності маски, накопиченням CO_2 у підмасковому просторі або перевищенням допустимого часу носіння респіратора. Водночас метод HAZOP не містить формалізованого механізму кількісного оцінювання критичності таких відхилень [58].

Метод FMEA, навпаки, орієнтований на аналіз окремих елементів системи та можливих відмов кожного з них. У випадку ЗІЗОД це дозволяє дослідити клапани, стрічки кріплення, обтюратор, фільтри та інші конструктивні елементи, визначити причини їх відмов і оцінити вплив на рівень захисту працівника. Поєднання HAZOP та FMEA забезпечує наскрізний аналіз: HAZOP дозволяє виявити небезпечне відхилення, а FMEA — оцінити його критичність через показник RPN та визначити пріоритетність запобіжних заходів.

Інтегрована процедура ідентифікації та оцінювання експлуатаційних ризиків ЗІЗОД складається з чотирьох основних етапів [58,59]:

1). Визначення об'єкта та меж аналізу. ЗІЗОД розглядається як сукупність основних складових (елементи прилягання та кріплення, клапанна система, фільтрувально-поглинальні елементи), а процес його використання поділяється на окремі етапи: перевірка перед надяганням, підгонка, виконання роботи різної інтенсивності та технічне обслуговування.

2). Виявлення можливих відхилень за методом HAZOP. За допомогою керуючих слів аналізуються ситуації, у яких порушується нормальна робота засобу захисту. Наприклад, поєднання керуючого слова «Більше» з параметром «Опір диханню» дає змогу розглянути наслідки засмічення фільтра або збільшення легеневої вентиляції під час виконання важкої роботи шахтарем.

3). Визначення причин і наслідків відхилень за методом FMEA. Для кожного виявленого відхилення встановлюються можливі технічні несправності або помилки користувача, що можуть його спричинити, а також оцінюється їхній вплив на ефективність захисту.

4). Оцінювання рівня ризику за показником RPN. Для кожного сценарію розраховується індекс пріоритетності ризику. З урахуванням завдань дисертаційного дослідження на цьому етапі використовуються спеціально розроблені шкали для оцінювання тяжкості наслідків (S), імовірності виникнення (O) та можливості виявлення (D), адаптовані до умов гірничих виробок і особливостей експлуатації ЗІЗОД.

При застосуванні методів HAZOP та FMEA до аналізу ЗІЗОД виникає низка специфічних особливостей, які не характерні для класичного промислового обладнання. Ці особливості зумовлені тим, що ЗІЗОД безпосередньо взаємодіє з організмом людини, змінюючи його фізіологічні показники [60].

По-перше, параметр тяжкості наслідків (S) у класичних технічних системах зазвичай характеризує рівень пошкодження обладнання або

порушення виробничого процесу. У випадку ЗІЗОД цей показник відображає ступінь небезпеки для життя та здоров'я шахтаря. Наприклад, відмова клапана видиху або порушення герметичності маски в атмосфері з підвищеним вмістом метану чи монооксиду вуглецю може спричинити безпосередню загрозу життю, тому таким ситуаціям відповідає максимальна оцінка ($S = 10$). Разом з тим, деякі відмови не викликають негайних наслідків, але можуть завдавати шкоди здоров'ю протягом тривалого часу. Зокрема, зниження ефективності фільтра в умовах високої запиленості підвищує ризик розвитку професійних захворювань легень, таких як пневмоконіоз або силікоз. Тому під час оцінювання тяжкості наслідків доцільно враховувати як безпосередні, так і довготривалі ризики для здоров'я працівника.

По-друге, можливість виявлення відмови D під час використання ЗІЗОД часто є обмеженою. Багато несправностей засобів захисту працівник не може помітити під час виконання роботи. Наприклад, незначне порушення герметичності прилягання маски до обличчя через неправильне носіння, наявність щетини або зношення обтюратора зазвичай не супроводжується відчутними ознаками. У результаті проникнення пилу під маску може залишатися непоміченим протягом тривалого часу. Тому ймовірність своєчасного виявлення таких відмов є низькою ($D = 8-10$), що суттєво збільшує значення показника RPN навіть тоді, коли ймовірність виникнення самої події є невисокою.

По-третє, умови роботи на гірничих підприємствах, зокрема підвищена вологість, перепади температур, вплив шахтного середовища та механічні навантаження, прискорюють зношування елементів ЗІЗОД. У результаті гумові та силіконові деталі поступово втрачають свої властивості, пластикові елементи можуть пошкоджуватися, а фільтри швидше втрачають свою ефективність через накопичення вологи. Тому під час оцінювання ймовірності виникнення відмов необхідно враховувати тривалість використання засобу захисту та умови, в яких він експлуатується [55,56].

Застосування інтегрованого підходу HAZOP та FMEA для оцінювання експлуатаційних ризиків ЗІЗОД має як переваги, так і певні обмеження, які необхідно враховувати під час побудови методики дослідження.

Поєднання методів HAZOP і FMEA забезпечує комплексний аналіз ризиків під час використання ЗІЗОД. Такий підхід дозволяє враховувати не лише технічні несправності окремих елементів респіратора, а й умови його експлуатації та вплив людського чинника. HAZOP дає можливість виявляти небезпечні відхилення у процесі використання засобу захисту, тоді як FMEA дозволяє оцінювати критичність виявлених відмов через показник RPN. Це дає змогу визначати найбільш небезпечні сценарії та обґрунтовувати пріоритетність запобіжних заходів [60].

Водночас застосування інтегрованого підходу має певні недоліки. Результати аналізу значною мірою залежать від досвіду експертів і наявності статистичної інформації щодо відмов та умов експлуатації ЗІЗОД. Крім того, класичний показник RPN має статичний характер і не враховує зміну ризику в часі, поступове зношування елементів респіратора та вплив тривалого фізіологічного навантаження на працівника. Додатковим обмеженням є можливість отримання однакових значень RPN для різних за характером небезпечних ситуацій, що може ускладнювати прийняття рішень щодо пріоритетності захисних заходів [61].

Для ЗІЗОД характерною є поступова зміна рівня ризику впродовж робочої зміни. Навіть за відсутності явної технічної відмови тривале використання респіратора може супроводжуватися накопиченням вологи, збільшенням опору диханню, підвищенням температури підмаскового простору та погіршенням самопочуття працівника. Це свідчить про необхідність переходу від статичного оцінювання ризику до підходів, які враховують його зміну у часі [60,61].

Для обґрунтування доцільності поєднання методів HAZOP та FMEA було проведено порівняння їхніх основних характеристик і визначено результати їх взаємного доповнення (табл. 2.3).

Таблиця 2.3

**Порівняльний аналіз методів HAZOP та FMEA та результати їх
поєднання в оцінюванні ризиків ЗІЗОД**

Критерій порівняння	Метод HAZOP	Метод FMEA	Результати поєднання методів (HAZOP та FMEA)
Основна ідея	Виявлення відхилень робочих параметрів від нормального (запланованого) режиму	Аналіз технічних відмов окремих деталей конструкції та їхніх наслідків	Наскрізний аналіз: повна ідентифікація як порушень у процесі роботи, так і їхніх технічних причин
Напрямок аналізу	Від загального до конкретного (від порушень у процесі використання до пошуку їхніх причин)	Від конкретного до загального (від поломки окремої деталі до наслідків для всієї системи)	Двостороннє охоплення: усунення «сліпих зон» у системі «людина – засіб захисту – середовище»
Об'єкт уваги	Параметри реальної експлуатації ЗІЗОД (герметичність, опір диханню, накопичення CO ₂ , тривалість носіння)	Конструктивні елементи (клапани, обтюратор, стрічки кріплення, фільтри)	Врахування складних ланцюжків, коли технічна несправність деталі викликає фізичний дискомфорт людини
Врахування людського фактора	Високе (через керуючі слова для оцінки дій працівника, наприклад, «менше», «інакше ніж»)	Обмежене (переважно фіксуються лише очевидні помилки під час обслуговування)	Оцінка помилок шахтаря на кожному етапі використання, підгонки та догляду за ЗІЗОД
Оцінка рівня небезпеки	Відсутня (метод дає лише якісний текстовий опис)	Висока (оцінка через розрахунок показника пріоритетності ризику RPN)	Визначення пріоритетів: отримання показника RPN, можливість визначити, які небезпечні ситуації потребують першочергових заходів для кожного небезпечного сценарію HAZOP
Врахування зміни ризику у часі	Частково враховується через аналіз режимів роботи	Практично не враховується	Дає можливість аналізувати розвиток небезпечних станів під час експлуатації
Нормативно-практичне закріплення для ЗІЗ	Використовується окремо лише як рекомендація у міжнародних стандартах (ІЕС 61882)	Застосовується переважно для промислового обладнання (ІЕС 60812)	Офіційне впровадження: закріплено на рівні затвердженого Положення для розрахунку карт пріоритетності ризику ЗІЗ на підприємстві (додаток А)

Джерело: сформовано на автором за матеріалами [53-61], (додаток А)

Аналіз даних табл. 2.3 дозволяє зробити узагальнюючі висновки. Доведено, що жоден із методів окремо не здатний забезпечити повне оцінювання ризиків ЗІЗОД. HAZOP не має інструментів для точного цифрового визначення небезпеки, а FMEA не враховує зміни параметрів взаємодії маски з обличчям працівника. Поєднання цих методів вирішує цю проблему. Спільне використання підходів дозволяє виявляти причинно-наслідкові зв'язки, відстежувати приховані загрози – коли незначна технічна несправність складової респіратора FMEA призводить до зміни загальних умов дихання HAZOP, викликаючи втому та підвищуючи ризик помилки людини. Порівняльний аналіз показав, що головними недоліками спільного застосування методів HAZOP та FMEA є статичність показника пріоритетного числа ризику RPN, який не враховує зміни умов у часі, а також значна суб'єктивність думок експертів [62]. Це обґрунтовує необхідність подальшого розвитку та удосконалення методики оцінювання експлуатаційних ризиків ЗІЗОД.

Аналіз наукових праць вітчизняних та зарубіжних дослідників підтверджує стійкий тренд на впровадження інтегрованих методів оцінювання ризиків у сфері промислової безпеки. Фундаментальні основи використання методу FMEA для підвищення надійності технічних систем та засобів захисту висвітлені у працях таких науковців, як Braaksma A.J.J. [63] та Ericson C.A. [64]. Автори зазначають, що своєчасне виявлення можливих відмов дозволяє зменшити ймовірність аварійних ситуацій та підвищити рівень безпеки.

Особливості використання методу HAZOP для аналізу виробничих процесів і систем, у яких важливу роль відіграє людський чинник, висвітлено в роботах Kletz T. [65] та Crawley F. [66]. Дослідники показують, що використання керуючих слів дозволяє систематично виявляти потенційні відхилення та пов'язані з ними небезпеки.

Питання оцінювання ризиків при експлуатації засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) досліджувалося багатьма авторами з позицій різних методологічних підходів. Зокрема, у праці [53] висвітлено загальні принципи

та практичні аспекти менеджменту ризиків на робочих місцях малих і середніх підприємств. Автори дослідження [55] акцентують увагу на необхідності оцінювання ризиків виникнення професійних захворювань ще на етапі вибору ЗІЗ, що дозволяє суттєво мінімізувати негативний вплив шкідливих чинників на здоров'я працівників.

Водночас використання ЗІЗ є обов'язковою умовою ліцензування діяльності на об'єктах підвищеної небезпеки, хоча їхня фактична ефективність у реальних умовах часто переоцінюється [56]. Такі чинники, як вартість, обмежена доступність, а також термічний і механічний дискомфорт, створюють перешкоди для належної експлуатації ЗІЗ, що може генерувати додаткові ризики замість очікуваного захисту.

Окремий пласт досліджень присвячено ризикам, що виникають під час знімання засобів захисту [54]. Автори застосували трикомпонентний підхід: ієрархічний аналіз завдань (НТА), аналіз режимів та наслідків відмов з урахуванням людського фактора (FMEA) та метод фокус-груп. Встановлено, що використання FMEA дозволяє розробити стратегії пом'якшення ризиків самозабруднення персоналу. Крім того, впровадження модифікованої методики HAZOP/FMEA на ранніх стадіях проєктування ЗІЗ [67] забезпечує гнучке оцінювання системних ризиків, сприяючи виявленню конструктивних недоліків та збільшенню часу безперервної роботи.

В Україні питання використання методів FMEA та HAZOP у сфері охорони праці досліджуються, зокрема, у працях Кружилка Г.В. [68], присвячених моніторингу та оцінюванню професійних ризиків, а також Полукарова Ю.І. [69], який розглядає підходи до виявлення та аналізу виробничих небезпек. Водночас аналіз літературних джерел показує, що застосування поєднання методів HAZOP і FMEA для оцінювання ризиків під час використання засобів індивідуального захисту органів дихання в умовах тривалого фізичного навантаження потребує подальшого розвитку та адаптації до реальних умов експлуатації.

Більшість існуючих методик розглядають респіратор як повністю надійний засіб захисту, ефективність якого відповідає паспортним характеристикам. Проте дослідження, проведені за участю фахівців NIOSH, показують, що в реальних виробничих умовах рівень захисту респіраторів часто є нижчим, ніж під час лабораторних випробувань. Основними причинами є неправильне прилягання маски до обличчя, особливості умов праці та вплив експлуатаційних факторів [70,71]. Це підтверджує необхідність удосконалення методів оцінювання ризиків при використанні ЗІЗОД.

Аналіз стандартних методів HAZOP та FMEA виявив низку обмежень, які ускладнюють їх ефективне застосування для оцінки експлуатаційних ризиків засобів індивідуального захисту органів дихання.

По-перше, шкала оцінки тяжкості наслідків (S) потребує більшої прив'язки до фізіологічного стану працівника. У сучасних умовах доцільно використовувати критерії, які враховують рівень гіпоксії, гіперкапнії та теплового дискомфорту, що виникають при погіршенні роботи ЗІЗОД.

По-друге, параметр ймовірності виникнення ризику (O) повинен краще враховувати динамічні умови експлуатації, оскільки для ЗІЗОД характерне поступове накопичення ризику впродовж робочої зміни. Навіть за відсутності явної технічної відмови тривале використання респіратора супроводжується накопиченням вологи, збільшенням опору диханню та погіршенням самопочуття працівника, що може призводити до зниження ефективності захисту.

По-третє, параметр виявлення відмови (D) потребує деталізації. Перспективним є його розділення на суб'єктивну складову (можливість працівника самостійно відчувати проблему) та об'єктивну (можливість інструментального контролю).

По-четверте, для зменшення суб'єктивності експертних оцінок та уникнення однакових значень RPN при різних комбінаціях факторів перспективним є застосування математичного апарату теорії нечітких

множин. Це дозволить працювати з лінгвістичними оцінками («низький», «середній», «високий») і отримувати більш точні результати.

Таким чином, удосконалення методів HAZOP та FMEA шляхом врахування фізіологічних, динамічних та невизначених факторів є необхідною умовою для створення ефективної інтегральної моделі оцінки професійних ризиків при тривалій експлуатації ЗІЗОД.

Реальне практичне впровадження інтегрованого підходу HAZOP та FMEA у вітчизняну практику управління безпекою знайшло своє відображення у спеціалізованому нормативному документі – «Положенні про ідентифікацію невідповідностей та розрахунок пріоритетного числа ризику засобів індивідуального захисту працівників», яке було спільно розроблене та затверджене науковцями НТУ «Дніпровська політехніка» та керівництвом ТОВ НВП «СТАНДАРТ» (додаток А). Цей документ визначає чіткий порядок дій для виявлення прихованих технічних і експлуатаційних дефектів ЗІЗ безпосередньо під час їхнього використання на виробництві.

Згідно з цим Положенням, процес управління ризиками переводиться у практичну площину через заповнення спеціальних Карт розрахунку пріоритетності ризику. Розрахунок показника RPN базується на адаптованих десятибальних шкалах, де окремо оцінюються серйозність наслідків відмови для здоров'я працівника (S), частота появи цієї проблеми (O) та можливість її вчасно виявити (D). Такий підхід дозволяє адміністрації підприємств не просто фіксувати поломки засобів захисту, а й завчасно приймати рішення щодо впровадження превентивних заходів та оцінювати прийнятність залишкових ризиків на робочих місцях.

У підрозділі обґрунтовано доцільність використання інтегрованого підходу HAZOP та FMEA для ідентифікації та оцінювання експлуатаційних ризиків ЗІЗОД у гірничих умовах. Встановлено, що окреме застосування цих методів не забезпечує повного врахування взаємозв'язку між технічним станом респіратора, умовами його використання та фізіологічним станом працівника.

Показано, що метод HAZOP дозволяє систематично виявляти небезпечні відхилення під час експлуатації ЗІЗОД, тоді як метод FMEA забезпечує кількісне оцінювання критичності виявлених відмов за показником RPN. Поєднання цих підходів дає можливість простежити причинно-наслідкові зв'язки між технічними несправностями, зміною умов дихання та підвищенням імовірності помилкових дій працівника.

Встановлено, що класичні методи HAZOP та FMEA мають низку обмежень при застосуванні до ЗІЗОД. Основними обмеженнями є недостатнє врахування динаміки умов експлуатації та суб'єктивність експертних оцінок.

Показано, що інтегрований підхід HAZOP і FMEA має практичне підтвердження та вже використовується у вітчизняній практиці оцінювання ризиків. Розроблення та впровадження «Положення про ідентифікацію невідповідностей та розрахунок пріоритетного числа ризику захисту індивідуального захисту працівників» підтверджує можливість практичного використання інтегрованого підходу HAZOP та FMEA для оцінювання ризиків ЗІЗОД у виробничих умовах через використання Карт розрахунку пріоритетності ризику та адаптованих оціночних шкал RPN.

На основі проведеного аналізу визначено необхідність подальшого удосконалення методики оцінювання ризиків шляхом адаптації критеріїв S, O та D до умов експлуатації ЗІЗОД у шахтному середовищі та використання підходів, здатних враховувати невизначеність і зміну ризику у часі.

2.4. Теоретичні основи розрахунку коефіцієнта захисту та прогнозування ресурсу захисної дії ЗІЗОД

Попередній аналіз у п. 2.3 дозволив сформулювати методичний фундамент на основі поєднання HAZOP та FMEA та Положення про оцінку ризиків. Однак для переходу від якісно-кількісних оцінок (індексу RPN) до точних фізико-математичних критеріїв безпеки виникає потреба в дослідженні фундаментальних процесів, які визначають реальну ефективність ЗІЗОД.

Основними такими критеріями є фактичний коефіцієнт захисту респіратора та ресурс захисної дії його фільтрувальних елементів.

Ефективність ЗІЗОД у виробничих умовах визначається не лише паспортними характеристиками, а й сукупністю факторів, які проявляються саме під час експлуатації. Тому теоретичні основи цього підрозділу охоплюють три ключові взаємопов'язані напрями: оцінку ефективності прилягання, розрахунок реального коефіцієнта захисту та прогнозування ресурсу захисної дії фільтрувальних елементів. Логіка підрозділу полягає в поєднанні психофізіологічних факторів, розглянутих у п. 2.2, з конструктивними особливостями ЗІЗОД та фізичними законами фільтрації, адсорбції та гідродинаміки дихання. Це створює теоретичну основу для удосконалень, запропонованих у третьому розділі.

2.4.1. Теоретичні основи оцінки ефективності прилягання ЗІЗОД

Ефективність прилягання (fit factor) є одним з найважливіших параметрів, що визначає реальну захисну дію фільтрувального респіратора. Навіть за високого класу фільтра значна частина аерозолі може проникати в підмасковий простір через порушення герметичності по лінії обтюрації [72].

Якість прилягання обтюрації є критичним, але не єдиним чинником, що визначає загальну захисну ефективність респіратора. Реальний коефіцієнт захисту ($K_{ЗР}$) залежить також від проникнення частинок через сам фільтрувальний матеріал. Тому подальший аналіз присвячено теоретичним основам розрахунку коефіцієнта захисту ЗІЗОД.

У теорії респіраторного захисту розрізняють номінальний (лабораторний) та реальний коефіцієнт прилягання. Номінальний коефіцієнт визначається в стандартизованих умовах на випробувальних стендах, тоді як реальний залежить від індивідуальних антропометричних особливостей обличчя працівника, правильності надягання, стану обтюрації, еластичності ремінців кріплення та динаміки рухів під час роботи [73].

Ключовим показником якості прилягання є Leakage rate (коефіцієнт витоку) – частка забрудненого повітря, яка потрапляє під маску, мінаючи фільтрувальний матеріал. Цей показник безпосередньо впливає на реальний коефіцієнт захисту респіратора. Навіть незначне підвищення Leakage rate (наприклад, через невідповідність форми обтюратора антропометричним особливостям обличчя) може суттєво знизити захисну ефективність ЗІЗОД [73,74].

Таким чином, навіть за високої ефективності фільтрувального матеріалу порушення герметичності прилягання може суттєво знижувати фактичний коефіцієнт захисту респіратора. Це свідчить про необхідність врахування конструктивних особливостей обтюратора та системи кріплення під час оцінювання ефективності ЗІЗОД.

Аналіз літературних джерел щодо проблеми удосконалення конструкції обтюратора фільтрувальних респіраторів показує, що однією з ключових проблем забезпечення ефективного захисту є порушення герметичності обтюратора через індивідуальні антропометричні особливості обличчя працівників. За даними численних досліджень, найбільша кількість витоків забрудненого повітря спостерігається в зоні перенісся (близько 58-84 % усіх випадків), а також біля щік і підборіддя [75,76]. Щілини часто мають щілиноподібну форму і виникають через невідповідність стандартної форми обтюратора індивідуальній геометрії обличчя, зміну міміки під час розмови та рухів голови [77,78].

Виробники намагаються вирішувати цю проблему різними способами: виготовленням півмасок зі спеціальним каркасом, який змінює геометрію [79], посиленням обтюратора в зоні перенісся додатковими ущільнювачами з пінополіуретану, м'якої гуми або силікону [80], а також використанням носових затискачів. Однак більшість таких конструкцій не забезпечують достатньої адаптації до різних типів обличчя і часто викликають дискомфорт [81,82]. Особливо гостро ця проблема стоїть у гірничій промисловості, де респіратори використовуються тривалий час в умовах високої запиленості. У

таких умовах навіть незначне порушення герметичності обтюратора призводить до суттєвого збільшення дози пилу, що потрапляє в органи дихання, і підвищує ризик розвитку пневмоконіозу [83].

Аналіз наведених досліджень показує, що однією з основних причин порушення герметичності фільтрувальних респіраторів є недостатня адаптивність обтюратора до індивідуальних антропометричних особливостей обличчя працівника. Жорсткі або однорідні конструкції обтюраторів не забезпечують рівномірного розподілу контактного тиску, особливо в ділянках перенісся та щік, що призводить до утворення локальних зон підсмоктування повітря. Це свідчить про необхідність пошуку конструктивних рішень, спрямованих на підвищення адаптивності обтюратора та покращення прилягання респіатора до обличчя користувача.

Під час виконання виробничих операцій герметичність прилягання респіатора не є сталою величиною. Рухи голови, нахили корпусу, розмова та мимічні рухи обличчя спричиняють локальні деформації смуги обтюраторії та періодичну зміну площі контакту між маскою і поверхнею обличчя. У результаті можуть виникати короточасні зони підсмоктування забрудненого повітря, які суттєво знижують фактичний коефіцієнт захисту навіть за високої ефективності фільтрувального матеріалу. Особливо критичними такі зміни є в умовах важкої фізичної роботи, коли навантаження на систему кріплення респіатора постійно змінюється [74,76,79].

Отже, результати наведених досліджень підтверджують, що герметичність прилягання респіатора є одним із ключових факторів, які визначають фактичний коефіцієнт захисту ЗІЗОД. При цьому ефективність прилягання значною мірою залежить від антропометричних особливостей користувача та стабільності контакту обтюратора з поверхнею обличчя.

Не менш важливим фактором, що впливає на якість прилягання, є система кріплення респіатора (еластичні ремінці).

Аналіз літературних джерел показує, що проблема професійних захворювань органів дихання, зокрема пневмоконіозу, залишається гострою в

гірничодобувній, машинобудівній та металургійній промисловості. Однією з головних причин зниження захисної ефективності фільтрувальних респіраторів є нещільне прилягання напівмаски до обличчя, що призводить до підсмоктування забрудненого повітря [75,84,85]. Витік найчастіше відбувається в зоні перенісся, щік та підборіддя, особливо під час розмов, нахилів голови та фізичних навантажень [86,87].

Важливим чинником герметичності є еластичність ремінців головного кріплення. Занадто сильний натяг викликає дискомфорт і больові відчуття [48,88,89], а ослаблення натягу в процесі експлуатації призводить до значного зростання витоків. Зокрема, після восьми циклів надягання/знімання сила натягу ремінців може зменшитися на 38-74 % [90], що суттєво погіршує захисні властивості респіратора.

У науковій літературі запропоновано різні способи покращення герметичності, проте недостатньо вивченим залишається кількісний вплив геометричних та пружно-еластичних характеристик ремінців на об'єм підсмоктуваного повітря, а також практично відсутні ефективні засоби оперативного візуального контролю натягу ремінців під час роботи [91].

Таким чином, аналіз літератури підтверджує необхідність удосконалення не тільки обтюратора, а й системи кріплення респіратора шляхом оптимізації еластичності ремінців та впровадження візуальних індикаторів контролю їх натягу.

Важливим фактором забезпечення стабільного коефіцієнта захисту є рівномірність натягу елементів кріплення респіратора. Недостатній натяг ремінців призводить до порушення герметичності та збільшення підсмоктування забрудненого повітря, тоді як надмірний тиск викликає дискомфорт, локальне перетискання м'яких тканин обличчя та швидку втому працівника. Існуючі конструкції переважно не забезпечують можливості оперативного контролю правильності натягу під час експлуатації, що створює передумови для помилок користувача та зниження ефективності захисту.

Таким чином, система кріплення респіратора безпосередньо впливає на стабільність герметичності під час виконання робіт. Нерівномірний натяг ремінців або його зміна в процесі експлуатації можуть призводити до локального порушення прилягання маски та зниження ефективності захисту.

2.4.2. Теоретичні основи розрахунку коефіцієнта захисту ЗІЗОД

Проблема удосконалення моделі розрахунку коефіцієнта захисту фільтрувального респіратора від шкідливого аерозоліу впливає з глобальних статистичних даних щодо професійних захворювань органів дихання. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, неінфекційні захворювання є причиною 61 % усіх смертей у світі, з них 4,1 млн смертей щорічно пов'язані з респіраторними захворюваннями [92]. Одним із найпоширеніших професійних захворювань у гірничій та металургійній промисловості залишається пневмоконіоз, розвиток якого безпосередньо залежить від накопичення респірабельної фракції пилу в легенях працівників [93,94].

У системі управління професійними ризиками (згідно з ДСТУ ISO 45001:2019 та ДСТУ IEC/ISO 31010:2022) ключовим етапом є точна кількісна оцінка ризику, яка неможлива без надійного визначення реальної дози шкідливого аерозоліу, що потрапляє в організм працівника через ЗІЗОД [12,14]. Традиційна формула розрахунку коефіцієнта захисту респіратора ($K_{ЗР} = C_{зов} / C_{під}$) [95,29], що застосовується в лабораторних випробуваннях відповідно до ДСТУ EN 149:2017 та ДСТУ EN 13274-1:2005 [16,97], не враховує динаміку дихального циклу, осадження частинок у підмасковому просторі та вплив вологості на адгезію частинок. Це призводить до систематичного завищення реального $K_{ЗР}$ і створює ілюзію захищеності працівника.

Аналіз останніх досліджень показує, що існують два основних підходи до моделювання осадження пилу: аналітичні моделі на основі диференціальних рівнянь [98] та напівемпіричні моделі [99]. Більшість сучасних робіт використовує CFD-моделювання або рівняння Нав'є-Стокса

[100,101]. Однак переважна більшість досліджень зосереджена або на властивостях фільтрувального матеріалу, або на аеродинаміці потоку, при цьому недостатньо уваги приділяється впливу зазорів по смузі обтюрації [75,102], динаміці дихання та осадженню частинок у пробовідбірній системі.

Комплексні моделі, які одночасно враховують масову функцію розподілу аерозолі, проникнення через зазор з урахуванням фаз вдихання-видихання та поправки на осадження в зонді, у доступній літературі практично відсутні. Це підтверджує наявність суттєвої наукової прогалини.

Проведений аналіз показує, що більшість існуючих моделей оцінювання коефіцієнта захисту респіратора недостатньо враховують комплексний вплив динаміки дихання, проникнення аерозолі через нещільності обтюратора та процесів осадження частинок у підмасковому просторі. Це обмежує точність оцінювання реальної ефективності ЗІЗОД у виробничих умовах.

У нормативній практиці та сертифікаційних випробуваннях ефективність ЗІЗОД оцінюється переважно за номінальним коефіцієнтом захисту ($K_{ЗН}$), який визначається в ізольованих лабораторних умовах. Однак численні дослідження доводять, що $K_{ЗР}$ в умовах виробництва, особливо у затіснених виробках шахт, є значно нижчим і має динамічний характер [72,73]. Це основний кількісний показник ефективності респіратора і визначається як відношення концентрації шкідливої речовини зовні ($C_{зов}$) до її концентрації в підмасковому просторі ($C_{під}$):

$$K_{ЗР} = \frac{C_{зов}}{C_{під}}. \quad (2.3)$$

Формула (2.3) відображає експериментальне визначення коефіцієнта захисту респіратора як відношення концентрації шкідливої речовини зовні до її концентрації у підмасковому просторі.

Загальне проникнення забруднювачів під маску складається з двох основних потоків: проникнення через фільтрувальний матеріал (P_{ϕ}) та

проникнення через порушення герметичності обтюратора (зазори в місцях прилягання маски до обличчя) ($P_{об}$):

$$C_{під} = C_{зов} \times (P_{ф} + P_{об}). \quad (2.4)$$

Саме підсмоктування по обтюратору ($P_{об}$) є найбільш критичним чинником. Навіть невеликий зазор по лінії прилягання може знизити реальний коефіцієнт захисту в десятки разів, нівелюючи високу ефективність фільтра.

Таким чином, загальний коефіцієнт захисту визначається сумарним проникненням через обтюратор і через фільтр. Якщо проникнення через обтюратор залежить від конструктивних удосконалень (перфорація, система кріплення), то проникнення через фільтрувальний матеріал $P_{ф}$ визначається фізичними механізмами уловлювання аерозольних частинок.

Реальний коефіцієнт захисту респіратору можна представити у вигляді формули, яка показує, що реальна ефективність респіратору залежить від суми всіх можливих шляхів витоку. Навіть якщо фільтрувальний матеріал $P_{ф}$ затримує 100% часток, загальний захист різко впаде, якщо маска негерметично прилягає до обличчя $P_{об}$ через міміку, розмову або неправильний підбір розміру:

$$K_{зр} = \frac{1}{P_{ф} + P_{об} + P_{інші}}, \quad (2.5)$$

де $P_{інші}$ – інші витоки повітря (через клапани, пошкодження корпусу тощо).

Формула (2.5) описує коефіцієнт захисту з теоретичної точки зору та показує, що реальна ефективність респіратору визначається сумарним проникненням забруднювачів через фільтрувальний матеріал, порушення герметичності обтюратора та інші можливі шляхи витоку повітря [72,73].

Отже, ці дві формули визначення $K_{зр}$ описують коефіцієнт захисту респіратору з різних точок зору: (2.3) практичної (експериментальної) і констатує результат (у скільки разів чисто під маскою) та (2.5) теоретичної

(конструктивної), що пояснює причину цього результату (скільки бруду пропустив фільтр, а скільки щілини біля обличчя).

На величину $K_{зр}$ впливають якість прилягання обтюратора до обличчя, динаміка дихання (витрата повітря під час вдихання-видихання), осадження частинок аерозолі в підмасковому просторі, механічні деформації елементів респіратора під час руху працівника. Таким чином, реальний коефіцієнт захисту респіратора визначається не лише ефективністю фільтрувального матеріалу, а й герметичністю прилягання, динамікою дихального циклу, осадженням аерозольних частинок та умовами експлуатації. Це свідчить про необхідність удосконалення математичних моделей розрахунку $K_{зр}$ з урахуванням динамічних факторів, що є одним із ключових напрямів досліджень третього розділу дисертації.

Важливим фактором, який суттєво впливає на реальну ефективність ЗІЗОД, є фізичне навантаження працівника. Під час виконання важких робіт у гірничій промисловості збільшується частота та глибина дихання, що призводить до зростання об'ємної витрати повітря через фільтрувальний матеріал і можливі нещільності по смузі обтюратору. У таких умовах навіть незначні порушення герметичності можуть спричинити істотне зниження фактичного коефіцієнта захисту респіратора.

Крім того, підвищене фізичне навантаження супроводжується активним потовиділенням, збільшенням вологості підмаскового простору та механічними зміщеннями респіратора під час рухів голови й виконання робочих операцій. Це додатково ускладнює забезпечення стабільної герметичності та створює передумови для підсмоктування забрудненого повітря.

Уловлювання пилових частинок у волокнистих фільтрах відбувається завдяки кільком фізичним механізмам: дифузійному осадженню, зачепленню, інерційному осадженню, гравітаційному та електростатичному ефектам. Ефективність фільтрації залежить від розміру аерозольних частинок і є

мінімальною для так званого найбільш проникного розміру частинок (MPPS) [103].

На процес фільтрації суттєво впливає динаміка дихання. Під час важкої фізичної роботи в шахті легенева вентиляція може зростати до 60-100 л/хв і більше. Збільшення швидкості повітряного потоку скорочує час контакту частинок з волокнами фільтра і підвищує аеродинамічний опір диханню, що негативно позначається на ефективності захисту [104].

Тривале використання респіратору в умовах підвищеного фізичного навантаження супроводжується додатковим фізіологічним навантаженням на працівника. Зростання опору диханню, накопичення тепла та вологи у підмасковому просторі можуть викликати втому, прискорення дихання та суб'єктивне відчуття дискомфорту. У таких умовах працівники нерідко послаблюють натяг ремінців, тимчасово зміщують респіратор або порушують правила його експлуатації, що призводить до зниження герметичності прилягання та фактичного коефіцієнта захисту. Таким чином, фізіологічні фактори також мають враховуватись під час оцінювання ефективності ЗІЗОД [82,84,86]

Оскільки ефективність фільтрації визначається сукупною дією кількох фізичних механізмів, доцільно систематизувати їх залежно від розміру аерозольних частинок та впливу на захисні властивості ЗІЗОД (табл. 2.4).

Таблиця 2.4.

Основні механізми фільтрації аерозолів у ЗІЗОД

Механізм	Розмір частинок, мкм	Вплив на ефективність	Значущість для ЗІЗОД
Дифузійне осадження	< 0,1	Висока	Середня
Зачеплення (дотик)	0,1-0,5	Середня	Висока
Інерційне осадження	> 0,5	Висока	Висока
Електростатичне	0,01-1,0	Дуже висока	Дуже висока
Гравітаційне	> 1,0	Низька	Низька

Джерело: узагальнено автором за даними [16,73,103-105]

Наведена таблиця систематизує основні фізичні механізми, за якими відбувається уловлювання аерозольних частинок у волокнистих фільтрах респіраторів. Кожен механізм має свою область ефективності залежно від розміру частинок. Найбільш проникним розміром частинок (MPPS) вважається діапазон 0,1-0,3 мкм, де сумарна ефективність фільтрації є мінімальною. Саме на цьому діапазоні проводяться сертифікаційні випробування ЗІЗОД. Електростатичний механізм відіграє особливо важливу роль у сучасних електретних фільтрах, дозволяючи досягати високої ефективності при відносно низькому опорі диханню.

Аналіз механізмів фільтрації показує, що ефективність ЗІЗОД значною мірою залежить від розміру частинок пилу та умов експлуатації. У реальних шахтних умовах, де переважає респірабельна фракція пилу (0,1-10 мкм), найбільше значення мають механізми зачеплення, інерційного осадження та електростатичного притягання. Водночас динаміка дихання (збільшення витрати повітря) суттєво знижує ефективність дифузійного механізму і підвищує ймовірність прориву частинок через фільтр. Це підтверджує необхідність удосконалення не тільки фільтрувального матеріалу, а й конструкції респіратора в цілому (обтюратор, система кріплення), що буде розглянуто в третьому розділі [104].

Розглянуті механізми фільтрації аерозолів пояснюють ефективність захисту від пилу в певний момент. Водночас практичне використання ЗІЗОД вимагає розуміння того, як довго фільтр зберігатиме свої захисні властивості. Перехід від механічної фільтрації пилу до адсорбції газів у протигазових фільтрах дозволяє перейти до питання прогнозування ресурсу їх захисної дії.

Водночас більшість існуючих математичних моделей розрахунку коефіцієнта захисту базуються на стаціонарних параметрах повітряного потоку та умовно постійних характеристиках дихання працівника. Проте в реальних умовах експлуатації ЗІЗОД параметри вдиху та видиху безперервно змінюються залежно від фізичного навантаження, інтенсивності роботи та

фізіологічного стану користувача. Це впливає на швидкість проникнення аерозольних частинок, характер їх осадження у підмасковому просторі та величину підсмоктування через нещільності. Таким чином, існує необхідність удосконалення математичних моделей розрахунку коефіцієнта захисту з урахуванням динаміки дихального циклу.

Суттєвий вплив на ефективність фільтрації має також вологість повітря та накопичення конденсату у підмасковому просторі. Підвищена вологість може змінювати електростатичні властивості волокон фільтра, що особливо важливо для електретиальних матеріалів. У результаті зменшується ефективність уловлювання дрібнодисперсних аерозольних частинок та збільшується ймовірність їх проникнення через фільтрувальний матеріал. Крім того, накопичення вологи підвищує опір диханню та прискорює погіршення експлуатаційних характеристик респіратора під час тривалого використання [103-105].

Проведений аналіз показує, що процес проникнення аерозольних частинок через фільтрувальний матеріал і нещільності респіратору має динамічний характер та суттєво залежить від параметрів дихального циклу працівника. Використання стаціонарних моделей не дозволяє повною мірою оцінити реальний коефіцієнт захисту ЗІЗОД у виробничих умовах. Це підтверджує необхідність удосконалення математичних моделей розрахунку КЗР з урахуванням динаміки вдихання-видихання, процесів осадження частинок та експлуатаційних факторів, що є одним із ключових напрямів досліджень третього розділу дисертації.

2.4.3. Теоретичні основи прогнозування ресурсу захисної дії фільтрів

Проблема удосконалення моделі прогнозування ресурсу захисної дії протигазових фільтрів виникає з необхідності забезпечення надійного захисту працівників від шкідливих хімічних речовин у виробничих умовах. На

сьогодні протигазові фільтри з індикаторами закінчення строку служби стають все більш поширеними [73,74]. Однак існуючі індикаторні системи мають суттєві обмеження: для контролю їх показників часто необхідно знімати респіратор, а самі індикатори не завжди відображають фактичний стан сорбенту в робочій зоні фільтра [106].

Інший поширений підхід – ведення графіків заміни фільтрів спеціалістами з охорони праці на основі рекомендацій виробників – також має значні обмеження: складність обліку, неврахування реальних умов експлуатації (концентрація речовини, вологість, температура, інтенсивність фізичного навантаження) та низьку точність [107,108]. Комерційні програмні продукти провідних виробників дозволяють швидко підбирати фільтри, але часто не дають можливості розрахувати прогностичний час захисної дії з урахуванням конкретних умов робочого місця [109,110].

Аналіз останніх досліджень показує, що для прогнозування часу захисної дії протигазових фільтрів найбільш поширеними та точними є математичні моделі, засновані на рівнянні Вілера-Йонаса [111-113]. Ця модель дозволяє отримувати досить точні результати, проте її класична форма має обмежений набір вхідних параметрів. У сучасних дослідженнях її поступово адаптують для врахування непостійності концентрації шкідливих речовин, зміни витрати повітря залежно від важкості роботи, відносної вологості, температури та виду забруднювачів [112,114-116].

Разом з тим, комплексних програмних рішень, які поєднували б рівняння Вілера-Йонаса з урахуванням реального режиму роботи працівника та інтеграцією в систему управління професійними ризиками, у доступній літературі недостатньо. Це підтверджує наявність наукової прогалини в даному напрямку.

Розглянуті механізми фільтрації пояснюють, як респіратор уловлює аерозольні частинки в певний момент часу. Однак для практичного використання ЗІЗОД не менш важливим є питання, як довго фільтр зберігатиме свої захисні властивості протягом робочої зміни. Перехід від

механічної фільтрації пилу до адсорбції газоподібних речовин у протигазових фільтрах дозволяє перейти до теоретичних основ прогнозування ресурсу їх захисної дії. Класичне рівняння Вілера-Йонаса (Wheeler-Jonas equation) для розрахунку часу захисної є одним з найбільш поширених і точних математичних інструментів для такого прогнозування:

$$Tb = \frac{We \times W}{Q \times Co} \left(1 - \frac{Cx}{Co}\right) - \frac{We}{Ku} \ln \left(\frac{Co}{Cx} - 1\right), \quad (2.6)$$

де Tb – час захисної дії до прориву;

We – динамічна адсорбційна ємність;

W – маса сорбенту;

Q – об'ємна витрата повітря;

Co – вхідна концентрація;

Cx – гранична концентрація прориву;

Ku – константа швидкості адсорбції.

Рівняння Вілера-Йонаса є одним із найбільш поширених математичних інструментів для прогнозування часу захисної дії протигазових фільтрів. Воно дозволяє враховувати адсорбційну ємність сорбенту, концентрацію шкідливої речовини та витрату повітря, яка змінюється залежно від фізичного навантаження працівника. Також дає можливість перейти від статичних паспортних даних фільтра до прогнозу реального часу його захисної дії в конкретних умовах експлуатації. Чим вища концентрація шкідливої речовини Co та витрата повітря Q , тим менший час захисної дії фільтра.

На ресурс фільтра сильно впливають висока відносна вологість, підвищена температура, концентрації шкідливих речовин, суміш газів, попереднє запилення, режим дихання працівника, тип сорбенту тощо. Ці фактори призводять до швидкої деградації сорбенту і суттєвого скорочення захисного ресурсу. Тому класичні моделі мають суттєві обмеження при

застосуванні до реальних умов шахт. Таким чином, теоретичні основи оцінки ефективності ЗІЗОД охоплюють три ключові взаємопов'язані аспекти: прилягання, коефіцієнт захисту та ресурс захисної дії фільтрів.

Окрему роль у забезпеченні ефективності ЗІЗОД відіграють параметри мікроклімату підмаскового простору. У процесі тривалого використання респіратора відбувається накопичення тепла та вологи, що впливає не лише на комфорт працівника, а й на характеристики фільтрувального матеріалу та сорбенту. Підвищена вологість може змінювати механізми осадження аерозольних частинок, знижувати сорбційну здатність активованого вугілля та збільшувати опір диханню [96,99].

У реальних умовах експлуатації ЗІЗОД параметри підмаскового мікроклімату змінюються залежно від тривалості роботи, температури навколишнього середовища та інтенсивності фізичного навантаження працівника. Проте більшість існуючих моделей оцінювання ефективності респіраторів розглядають ці параметри як умовно постійні або взагалі не враховують їх вплив.

Аналіз існуючих підходів до прогнозування часу захисної дії протигазових фільтрів показує, що більшість із них орієнтовані переважно на лабораторні умови та не враховують змінний режим роботи працівника, коливання концентрацій шкідливих речовин, вологості та температури повітряного середовища. У реальних умовах експлуатації це може призводити до суттєвих відхилень між розрахунковим і фактичним ресурсом фільтрів. Тому актуальним є створення програмних засобів, здатних забезпечувати оперативне прогнозування часу захисної дії фільтрів з урахуванням реальних умов використання ЗІЗОД.

Для узагальнення результатів проведеного аналізу основних факторів, що впливають на ефективність засобів індивідуального захисту органів дихання, а також визначення напрямів подальших удосконалень у табл. 2.5

наведено основні переваги, обмеження та перспективні напрями розвитку існуючих підходів.

Таблиця 2.5

Узагальнення факторів, що впливають на ефективність ЗІЗОД, та напрямів їх удосконалення

Досліджуваний фактор / підхід	Основні результати досліджень	Основні обмеження існуючих підходів	Напрямок подальшого удосконалення
Герметичність прилягання респіратора	Встановлено, що коефіцієнт захисту значною мірою залежить від щільності прилягання маски до обличчя користувача та антропометричних особливостей	Стандартні конструкції обтюраторів недостатньо адаптуються до різних форм обличчя, що спричиняє локальні зони підсмоктування повітря	Підвищення адаптивності обтюратора шляхом удосконалення його конструкції
Антропометричні особливості користувачів	Показано, що невідповідність геометрії маски параметрам обличчя знижує фактичний рівень захисту респіратора	Більшість моделей орієнтовані на усереднені антропометричні параметри	Удосконалення конструкції обтюратора для кращої адаптації до форми обличчя
Система кріплення респіратора	Доведено вплив натягу ремінців на герметичність та стабільність коефіцієнта захисту	Відсутній оперативний контроль правильності натягу ремінців під час використання	Оптимізація еластичності ремінців та впровадження візуальних індикаторів контролю натягу
Динаміка дихання працівника	Встановлено, що параметри вдиху та видиху впливають на проникнення аерозольних частинок і підсмоктування повітря через нещільності	Існуючі моделі переважно базуються на стаціонарних параметрах повітряного потоку	Урахування динаміки вдихання-видихання у математичній моделі К _{зр}
Осадження аерозольних частинок	Досліджено вплив швидкості повітряного потоку та характеристик частинок на процес їх осадження у підмасковому просторі	Недостатньо враховується взаємозв'язок між дихальним циклом та осадженням частинок	Удосконалення математичної моделі проникнення та осадження аерозолів
Вологість і температура підмаскового простору	Встановлено, що накопичення вологи та підвищення температури погіршують умови використання респіратора та впливають на самопочуття працівника	Більшість моделей не враховують зміну параметрів підмаскового середовища у часі	Урахування динамічних експлуатаційних факторів під час оцінювання ефективності ЗІЗОД

Продовж. табл. 2.5

Досліджуваний фактор / підхід	Основні результати досліджень	Основні обмеження існуючих підходів	Напрямок подальшого удосконалення
Ресурс фільтрів та час захисної дії	Показано залежність часу захисної дії фільтрів від концентрації шкідливих речовин, вологості та режиму роботи	Існуючі методики орієнтовані переважно на лабораторні умови та спрощені режими експлуатації	Розробка програмного комплексу прогнозування часу захисної дії фільтрів
Математичні моделі коефіцієнта захисту	Розроблено моделі оцінювання коефіцієнта захисту на основі аеродинамічних та фільтраційних параметрів	Більшість моделей мають статичний характер та не враховують зміну параметрів у процесі роботи	Удосконалення моделей К _{зр} з урахуванням динаміки дихання та умов експлуатації
CFD-моделювання повітряних потоків	CFD-моделі дозволяють детально аналізувати розподіл повітряних потоків і зон підсмоктування	Висока складність моделей та значна кількість вхідних параметрів обмежують їх практичне використання	Спрощення моделей для практичного використання у прогнозуванні ефективності ЗІЗОД

Джерело: узагальнено автором на основі результатів досліджень [97-116]

Таким чином, проведений аналіз показав, що основними проблемами сучасних ЗІЗОД є недостатня адаптивність обтюратора до антропометричних особливостей користувача, відсутність контролю стабільності натягу елементів кріплення, статичний характер моделей розрахунку коефіцієнта захисту та недостатня точність прогнозування ресурсу фільтрів у реальних умовах експлуатації. Це визначає основні напрями удосконалень, що будуть розглянуті у третьому розділі дисертації.

2.5. Економічні та організаційні основи вибору і експлуатації ЗІЗОД

Ефективність засобів індивідуального захисту органів дихання визначається не лише їх технічними характеристиками, але й правильністю організації процесу вибору, використання, контролю та своєчасної заміни респіраторів у виробничих умовах. У сучасній системі управління

професійними ризиками питання вибору та експлуатації ЗІЗОД розглядається як комплексне завдання, що поєднує технічні, економічні та організаційні аспекти [12,14].

Для підприємств гірничої, металургійної та машинобудівної промисловості проблема забезпечення ефективного респіраторного захисту має особливе значення через високий рівень запиленості, наявність токсичних аерозолів і газів та значну поширеність професійних захворювань органів дихання [3,53,117]. За даними МОП та ВООЗ, професійні захворювання та виробничі травми призводять до значних економічних втрат, пов'язаних із лікуванням працівників, компенсаційними виплатами, зниженням продуктивності праці та втратою робочого часу [73,117].

У попередніх підрозділах було показано, що реальна ефективність ЗІЗОД залежить від герметичності прилягання, характеристик системи кріплення, динаміки дихання працівника та ресурсу захисної дії фільтрів. Проте навіть технічно досконалий респіратор не забезпечить необхідного рівня захисту за відсутності належної організації його використання. Саме тому під час оцінювання професійних ризиків важливим є врахування економічних наслідків помилок вибору ЗІЗОД та організаційних факторів їх експлуатації. Необхідно також розуміти, у скільки обходяться підприємству правильний вибір і експлуатація ЗІЗ, а також які економічні наслідки несе їх неякісне використання.

На практиці вибір респіратора часто здійснюється переважно за критерієм мінімальної вартості закупівлі. Однак такий підхід не враховує сукупних витрат підприємства протягом усього періоду використання ЗІЗОД. Дешевші засоби захисту можуть мати менший ресурс фільтрів, нижчу стабільність коефіцієнта захисту та гіршу ергономіку, що в результаті призводить до збільшення загальних витрат [72,74].

У сучасній практиці охорони праці для оцінювання ефективності впровадження засобів захисту все частіше використовують підхід сукупної

вартості володіння (Total Cost of Ownership, TCO). Він передбачає врахування не тільки ціни закупівлі респіратора, а й витрат на:

- заміну фільтрів;
- технічне обслуговування;
- навчання працівників;
- проведення fit-test контролю;
- втрати робочого часу;
- лікування професійних захворювань;
- компенсаційні виплати;
- зниження продуктивності праці [72,74,118].

Такий підхід дозволяє більш об'єктивно оцінити економічну доцільність використання конкретного типу ЗІЗОД.

Особливо важливим економічним фактором є втрати підприємства від професійних захворювань органів дихання. Пневмоконіоз, хронічні бронхолегеневі захворювання та інші професійні патології супроводжуються тривалим лікуванням, втратою працездатності та необхідністю компенсаційних виплат працівникам [53,117]. Крім прямих витрат, підприємство несе непрямі економічні втрати через:

- зниження продуктивності праці;
- збільшення кількості лікарняних;
- необхідність заміни персоналу;
- витрати на навчання нових працівників;
- простої обладнання;
- погіршення показників виробничої ефективності [72,118].

Таким чином, ефективний вибір ЗІЗОД слід розглядати не як окрему закупівлю засобів захисту, а як елемент системи управління професійними ризиками та мінімізації економічних втрат підприємства.

Одним із важливих економічних факторів при експлуатації ЗІЗОД є зниження працездатності працівників внаслідок збільшення опору диханню.

Одним із важливих економічних факторів при експлуатації ЗІЗОД є зниження працездатності працівників внаслідок збільшення опору диханню. Під час роботи в респіраторі працівник витрачає додаткові фізіологічні зусилля на подолання аеродинамічного опору фільтра, що може призводити до швидшої втоми та зменшення продуктивності праці. Це, у свою чергу, формує додаткові економічні втрати підприємства.

Питання впливу опору диханню на працездатність людини тривалий час досліджується у науковій літературі [20,119-123]. Результати досліджень [20,21] показують, що під час виконання легкої роботи в комфортних умовах використання респіратора практично не впливає на працездатність працівника. Проте зі збільшенням фізичного навантаження негативний вплив опору диханню суттєво зростає.

Дослідник Д. Каретті [121] у результаті експериментів на біговій доріжці встановив залежність між рівнем опору диханню респіратора та зниженням працездатності працівника. Встановлено, що за початкового опору фільтра 100 Па та легеневої вентиляції 60 л/хв зниження працездатності становить близько 5,1 %. При збільшенні опору фільтра до 240 Па за аналогічного режиму дихання працездатність зменшується до 12,3 %.

Отримані результати були встановлені за оптимальних параметрів мікроклімату та узгоджуються з даними інших дослідників [122,123], що підтверджує їх достовірність.

Аналіз літературних джерел свідчить, що зі збільшенням фізичного навантаження та об'ємів легеневої вентиляції спостерігається ще суттєвіше зниження працездатності працівників. Зокрема, за даними дослідження [124], при фізичному навантаженні 225 Вт, легеневій вентиляції 95 л/хв та опорі фільтра 100 Па втрата працездатності за оптимальних параметрів мікроклімату досягала 26 %. За шкідливих умов праці (температура повітря 30 °C та відносна вологість 85 %) зниження працездатності за аналогічних умов збільшувалося до 64 %.

Таким чином, аеродинамічний опір респіратор та умови мікроклімату безпосередньо впливають не лише на фізіологічний стан працівника, а й на економічні показники виробництва через зниження продуктивності праці та збільшення ризику помилок під час виконання виробничих операцій.

У системі управління охороною праці важливе значення має оцінювання можливих втрат, пов'язаних із професійними ризиками. Для цього використовують різні методи аналізу економічних наслідків небезпечних виробничих факторів [118,125].

Одним із найбільш поширених підходів є оцінювання прямих та непрямих витрат. До прямих витрат належать:

- витрати на лікування працівників;
- страхові та компенсаційні виплати;
- витрати на проведення розслідувань нещасних випадків;
- оплата простоїв та лікарняних.

До непрямих витрат відносять:

- втрату продуктивності праці;
- зниження якості виробничих процесів;
- зростання навантаження на інших працівників;
- втрати через плинність кадрів;
- погіршення виробничої дисципліни [118,125].

У багатьох випадках непрямі втрати суттєво перевищують прямі економічні витрати. Саме тому сучасні системи управління професійними ризиками орієнтовані не лише на ліквідацію наслідків, а й на попередження виникнення небезпечних ситуацій.

Для кількісної оцінки професійних ризиків використовуються різні методи аналізу, зокрема HAZOP, FMEA та інтегральні ризик-орієнтовані підходи [14]. У попередніх підрозділах дисертації було показано, що поєднання оцінки надійності людини, аналізу можливих відмов та оцінювання фактичного коефіцієнта захисту дозволяє підвищити достовірність визначення професійних ризиків при використанні ЗІЗОД.

Будь-яка система управління професійними ризиками обмежена економічними ресурсами підприємства. Тому вибір ЗІЗОД має базуватися на принципі прийнятного ризику та оптимізації витрат протягом життєвого циклу засобів захисту. Використання надмірно складних методів аналізу ризиків або необґрунтовано дорогих засобів захисту не завжди є економічно доцільним, особливо для підприємств малого та середнього бізнесу. У зв'язку з цим важливим завданням є пошук балансу між рівнем безпеки працівника та економічною ефективністю системи респіраторного захисту [118].

У сучасних системах управління професійними ризиками широко застосовується принцип прийнятного ризику, відповідно до якого рівень небезпеки повинен бути знижений настільки, наскільки це є технічно можливим та економічно обґрунтованим. Для систем респіраторного захисту це означає необхідність досягнення оптимального співвідношення між рівнем захисту працівника, комфортом використання ЗІЗОД та економічними витратами підприємства.

Використання надто складних або економічно невиправданих заходів захисту не завжди забезпечує пропорційне підвищення рівня безпеки. Водночас застосування дешевих та неефективних респіраторів може призводити до значного зростання професійних ризиків і економічних втрат. Тому під час вибору ЗІЗОД важливим є комплексний підхід, який поєднує технічну ефективність, ергономічність, ресурс захисної дії та економічну доцільність [118].

Важливим також є врахування людського фактора. Помилки під час надягання респіатора, неправильний вибір розміру, несвоєчасна заміна фільтрів або порушення режиму експлуатації можуть призводити до різкого зниження фактичного рівня захисту навіть за наявності якісних ЗІЗОД [5, 14]. Це підтверджує необхідність комплексного поєднання технічних, організаційних та економічних заходів у системі респіраторного захисту.

Ефективність респіраторного захисту доцільно розглядати як результат взаємодії трьох взаємопов'язаних складових: людини, конструкції респіатора

та виробничого середовища. Навіть високоефективний респіратор не забезпечує належного рівня захисту за умови неправильного використання або несприятливих умов праці. З іншого боку, належна організація експлуатації та навчання персоналу не можуть повністю компенсувати конструктивні недоліки ЗІЗОД. Тому сучасні підходи до управління професійними ризиками повинні базуватись на системному аналізі всієї системи «людина – респіратор – виробниче середовище».

За даними досліджень, використання респіраторів із підвищеним опором диханню або недостатнім рівнем ергономічності може призводити до зниження продуктивності праці на 10-25 % через підвищену втому та дискомфорт [118].

Економічні втрати підприємства від неефективного використання ЗІЗОД поділяються на прямі та непрямі. До прямих належать витрати на закупівлю, обслуговування, заміну фільтрів, медичне забезпечення та компенсаційні виплати працівникам. Непрямі втрати включають зниження продуктивності праці, простої виробництва, збільшення кількості помилок персоналу через втому та дискомфорт, а також втрати, пов'язані з професійною захворюваністю та плинністю кадрів. У багатьох випадках саме непрямі економічні втрати значно перевищують прямі витрати на забезпечення працівників якісними ЗІЗОД [117].

Важливим організаційним елементом ефективного використання ЗІЗОД є проведення fit-test контролю та регулярного навчання працівників правилам користування респіраторами. Навіть високоефективний респіратор не забезпечує належного рівня захисту за умови неправильного надягання або невідповідності форми маски антропометричним особливостям обличчя користувача. Проведення періодичних перевірок герметичності прилягання дозволяє своєчасно виявляти помилки використання та знижувати ризик проникнення шкідливих аерозолів у підмасковий простір.

Важливим економічним аспектом є також раціональне планування заміни фільтрів респіраторів. Передчасна заміна фільтрів призводить до

необґрунтованого збільшення матеріальних витрат підприємства, тоді як несвоєчасна заміна підвищує ризик проникнення шкідливих речовин у зону дихання працівника. Тому прогнозування фактичного ресурсу захисної дії фільтрів дозволяє одночасно підвищити рівень безпеки праці та оптимізувати витрати на забезпечення ЗІЗОД [118].

Економічна оптимізація вибору ЗІЗОД повинна враховувати не лише вартість придбання респіраторів, а й супутні витрати та можливі економічні втрати підприємства, не лише витрати на ЗІЗОД, а ще професійні захворювання, втрата продуктивності, нещасні випадки. Для оцінювання сумарного економічного ефекту може бути використаний критерій [117-118]:

$$F = V_{\text{п}} + E_{\text{о}} + E_{\text{н}} + E_{\text{п}} + E_{\text{в}} \rightarrow \min, \quad (2.7)$$

де: $V_{\text{п}}$ – витрати на придбання;

$E_{\text{о}}$ – експлуатаційні витрати;

$E_{\text{н}}$ – втрати від професійних захворювань;

$E_{\text{п}}$ – втрати від зниження продуктивності праці;

$E_{\text{в}}$ – втрати від нещасних випадків.

Мінімізація критерію F дозволяє обґрунтувати вибір ЗІЗОД з урахуванням не лише початкової вартості, а й довгострокових економічних наслідків їх експлуатації. Такий підхід дозволяє комплексно оцінювати ефективність використання ЗІЗОД з урахуванням як технічних, так і економічних факторів.

Наведений критерій дозволяє оцінювати ефективність вибору ЗІЗОД не лише за початковою вартістю респіратора, а з урахуванням усього комплексу витрат, що виникають протягом його експлуатації. Такий підхід відповідає сучасним принципам управління професійними ризиками та дозволяє порівнювати різні варіанти респіраторного захисту за сукупними економічними наслідками їх використання. Зменшення витрат на закупівлю респіраторів не завжди забезпечує мінімізацію загальних економічних втрат,

оскільки недостатня ефективність або низька ергономічність ЗІЗОД можуть призводити до зростання професійної захворюваності, зниження продуктивності праці та збільшення кількості порушень правил експлуатації. Тому оптимізація вибору ЗІЗОД повинна базуватись на принципі мінімізації сукупних витрат протягом усього життєвого циклу засобів захисту [118].

Аналіз літературних джерел показує, що використання дешевих або неправильно підібраних респіраторів часто призводить до значно більших довгострокових витрат, пов'язаних із професійною захворюваністю, простоем виробництва, зниженням продуктивності праці та компенсаційними виплатами працівникам. Тому економічна ефективність системи респіраторного захисту повинна оцінюватися комплексно, з урахуванням технічних, медичних та організаційних факторів.

Принцип прийнятного ризику широко використовується в сучасних системах управління охороною праці та передбачає досягнення такого рівня професійного ризику, який є технічно та економічно обґрунтованим для конкретних умов виробництва. Відповідно до цього підходу, заходи із зниження ризику повинні забезпечувати баланс між рівнем безпеки працівника та витратами підприємства на реалізацію захисних заходів. Саме тому під час вибору ЗІЗОД необхідно враховувати не лише технічні характеристики респіратора, а й реальні умови його використання, ергономічність та економічну доцільність застосування [12,126].

При оцінюванні економічної ефективності систем респіраторного захисту недостатньо враховувати лише початкову вартість придбання респіраторів. У сучасних підходах для цього використовується метод оцінки сукупної вартості володіння Total Cost of Ownership (TCO), який дозволяє враховувати всі витрати протягом життєвого циклу ЗІЗОД: закупівлю, технічне обслуговування, навчання персоналу, медичний контроль, логістику, заміну фільтрувальних елементів та утилізацію використаних засобів захисту [127].

Стосовно респіраторного захисту сукупні витрати підприємства можуть бути представлені у вигляді:

$$B_{\text{сук}} = B_{\text{зак}} + B_{\text{лог}} + B_{\text{обсл}} + B_{\text{ут}}, \quad (2.8)$$

де: $B_{\text{зак}}$ – витрати на закупівлю засобів захисту;

$B_{\text{лог}}$ – витрати на транспортування та організацію зберігання;

$B_{\text{обсл}}$ – витрати на видачу, fit-test контроль, навчання персоналу та технічне обслуговування;

$B_{\text{ут}}$ – витрати на утилізацію використаних фільтрів та елементів респіраторів.

Ця формула описує скільки коштує експлуатація ЗІЗОД, тобто їх закупівля, логістика, обслуговування, утилізація. Це економіка життєвого циклу ЗІЗОД.

Аналіз її показує, що використання дешевих респіраторів із низьким ресурсом захисної дії не завжди забезпечує економічну ефективність. Як було показано в підрозділі 2.4, зі зменшенням ресурсу фільтра зростає частота його заміни, що призводить до збільшення витрат на закупівлю, логістику та обслуговування. У результаті сукупні витрати на використання дешевих засобів захисту можуть перевищувати витрати на більш якісні та довговічні респіратори.

Організаційні порушення у забезпеченні працівників ЗІЗОД та використання респіраторів, які не відповідають умовам праці, можуть спричиняти значні економічні втрати підприємства. Такі втрати доцільно поділяти на три основні групи [12,128].

До першої групи належать втрати, пов'язані з професійними захворюваннями органів дихання, зокрема пневмоконіозом. Вони мають довгостроковий характер і включають витрати на медичні огляди, лікування, компенсаційні виплати працівникам, оплату тимчасової непрацездатності та інші соціально-економічні наслідки професійної захворюваності.

Друга група пов'язана зі зниженням продуктивності праці. Як було показано у підрозділі 2.2, використання респіраторів із підвищеним опором диханню або недостатнім рівнем ергономічності може викликати швидку втому працівника та збільшення фізіологічного навантаження на організм. У результаті сповільнюється темп виконання робіт, збільшується кількість технологічних перерв та знижується загальна продуктивність праці.

Третю групу становлять втрати від нещасних випадків. Дискомфорт під час використання респіратора, погіршення оглядовості, підвищена втома та зниження концентрації уваги можуть збільшувати ймовірність помилок працівника та виникнення аварійних ситуацій, особливо в умовах підземних виробок або інших небезпечних виробництв. Ліквідація наслідків нещасних випадків супроводжується значними економічними втратами, пов'язаними із простим обладнання, проведенням розслідувань та ремонтом технічних систем [12].

Організація ефективного використання ЗІЗОД повинна здійснюватися в межах системи управління охороною праці підприємства. Основні принципи такого підходу визначені міжнародним стандартом ISO 45001:2018, який орієнтований на управління професійними ризиками та постійне вдосконалення умов праці [12].

Як вже зазначалось у попереднім розділі, відповідно до ISO 45001 процес управління професійними ризиками включає: ідентифікацію небезпечних факторів, оцінювання ризиків, вибір заходів контролю, моніторинг ефективності, постійне вдосконалення системи безпеки [12].

У межах респіраторного захисту це означає необхідність:

- правильного вибору типу респіратора;
- врахування умов виробництва;
- проведення fit-test контролю;
- організації навчання працівників;
- контролю строків експлуатації фільтрів;
- моніторингу фактичної ефективності ЗІЗОД [12].

Одним із базових принципів ISO 45001 є цикл PDCA (Plan – Do – Check – Act), який забезпечує постійне вдосконалення системи управління охороною праці.

На етапі Plan здійснюється планування заходів із забезпечення респіраторного захисту, а саме аналіз виробничих ризиків, вибір типу ЗІЗОД та визначення критеріїв ефективності.

На етапі Do проводиться практичне впровадження заходів – забезпечення працівників респіраторами, навчання персоналу, організація контролю використання ЗІЗОД.

Етап Check передбачає перевірку ефективності впроваджених заходів, контроль герметичності прилягання, аналіз випадків порушення правил використання та оцінювання фактичного рівня професійних ризиків.

На етапі Act виконують коригувальні дії: удосконалення конструкції респіраторів, зміну процедур контролю, уточнення критеріїв вибору ЗІЗОД та оновлення системи управління ризиками [12].

Використання циклу PDCA дозволяє забезпечити безперервне вдосконалення системи респіраторного захисту та підвищити ефективність управління професійними ризиками.

Важливою особливістю сучасних систем управління професійними ризиками є їх адаптивний характер. Параметри виробничого середовища, фізичне навантаження працівників та умови використання респіраторів можуть постійно змінюватися протягом робочої зміни. У зв'язку з цим система респіраторного захисту повинна передбачати можливість оперативного коригування вибору ЗІЗОД, режимів заміни фільтрів та процедур контролю залежно від фактичних умов експлуатації.

Важливо також враховувати вплив людського фактора на ефективність використання ЗІЗОД. Порушення правил експлуатації, неправильне регулювання ремінців, повторне використання забруднених фільтрів або ігнорування вимог щодо заміни елементів респіратора можуть суттєво знижувати фактичний коефіцієнт захисту. Тому ефективна система управління професійними ризиками повинна поєднувати технічні, організаційні та поведінкові заходи [117].

Перспективним напрямом розвитку систем респіраторного захисту є використання цифрових технологій моніторингу параметрів експлуатації ЗІЗОД. До таких рішень належать системи контролю часу використання фільтрів, датчики перепаду тиску, індикатори герметичності прилягання та програмні комплекси прогнозування професійних ризиків. Використання

цифрових інструментів дозволяє підвищити об'єктивність оцінювання ефективності ЗІЗОД та своєчасно виявляти фактори, що призводять до зниження рівня захисту працівників [118].

Для узагальнення основних економічних та організаційних факторів, що впливають на ефективність використання ЗІЗОД, а також визначення напрямів їх подальшого вдосконалення результати аналізу наведено в табл. 2.6.

Таблиця 2.6

Основні економічні та організаційні фактори, що впливають на ефективність експлуатації ЗІЗОД

Фактор	Основний вплив на ефективність ЗІЗОД	Основні економічні наслідки	Напрями удосконалення
Опір диханню респіратора	Підвищення фізіологічного навантаження, прискорення втоми працівника	Зниження продуктивності праці, збільшення перерв у роботі	Оптимізація аеродинамічного опору фільтрів
Герметичність прилягання	Виникнення підсмоктування забрудненого повітря	Зростання ризику професійних захворювань	Удосконалення конструкції обтюратора та системи кріплення
Ресурс захисної дії фільтрів	Скорочення часу ефективного захисту	Збільшення витрат на часту заміну фільтрів	Прогнозування ресурсу фільтрів з урахуванням реальних умов експлуатації
Організація навчання персоналу	Зменшення помилок під час використання ЗІЗОД	Зниження ризику аварій та виробничого травматизму	Регулярне навчання та фіт-тестування працівників
Система контролю експлуатації	Своєчасне виявлення несправностей та порушень використання	Скорочення непрямих економічних втрат	Впровадження процедур моніторингу та контролю
Вологість і температура підмаскового простору	Погіршення ергономічних умов використання	Зниження працездатності працівників	Урахування мікрокліматичних факторів під час вибору ЗІЗОД
Організаційне управління ризиками	Координація заходів безпеки та контролю	Зменшення сукупних витрат підприємства	Використання циклу PDCA та принципів ISO 45001
Сукупна вартість володіння (ТСО)	Оцінка повних витрат протягом життєвого циклу ЗІЗОД	Оптимізація витрат на закупівлю та експлуатацію	Комплексне економічне оцінювання ефективності ЗІЗОД

Джерело: узагальнено автором на основі [12,117,118,126-128].

Таким чином, ефективність використання ЗІЗОД визначається не лише технічними характеристиками респіратора, а й організаційними умовами його експлуатації, рівнем підготовки персоналу та економічними можливостями підприємства. Це підтверджує необхідність комплексного підходу до оцінювання професійних ризиків і створює підґрунтя для розробки інтегральної моделі оцінювання ефективності ЗІЗОД у третьому розділі дисертаційної роботи.

Проведений аналіз показав, що ефективність вибору та експлуатації ЗІЗОД визначається не лише технічними характеристиками респіратора, а й економічними та організаційними факторами. Неврахування сукупних витрат, впливу людського фактора, динаміки умов праці та реального режиму експлуатації може призводити до суттєвого зниження ефективності системи респіраторного захисту.

У зв'язку з цим виникає необхідність створення інтегральної моделі оцінювання професійних ризиків, яка поєднувала б технічні характеристики респіратора, параметри дихального процесу, умови експлуатації та економічні критерії ефективності. Такий підхід дозволить перейти від окремого аналізу факторів до комплексної системи підтримки прийняття рішень при виборі та експлуатації ЗІЗОД, що буде розглянуто у третьому розділі дисертаційної роботи.

Встановлено, що сучасні підходи до управління професійними ризиками повинні базуватись на комплексному поєднанні:

- технічного оцінювання ефективності ЗІЗОД;
- аналізу надійності людини;
- методів HAZOP та FMEA;
- прогнозування ресурсу фільтрів;
- економічного оцінювання втрат;
- організаційних механізмів контролю та постійного вдосконалення.

Проведений аналіз організаційних та економічних факторів використання ЗІЗОД підтверджує необхідність створення комплексного підходу до оцінювання професійних ризиків. Існуючі технічні моделі оцінювання ефективності респіраторів, методи аналізу ризиків та

організаційні механізми управління охороною праці переважно застосовуються окремо один від одного, що ускладнює прийняття обґрунтованих рішень під час вибору та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання.

Встановлено, що для підвищення достовірності оцінювання професійних ризиків необхідним є поєднання технічних характеристик респіратора, параметрів дихального процесу, експлуатаційних умов, людського фактора та економічних критеріїв у межах єдиної інтегральної моделі. Це дозволить підвищити ефективність прогнозування ризиків та обґрунтованість вибору ЗІЗОД у реальних виробничих умовах.

Таким чином, результати підрозділу 2.5 формують організаційно-економічне підґрунтя для подальшої розробки інтегральної моделі оцінювання професійних ризиків при виборі та експлуатації ЗІЗОД.

Виявлені недоліки існуючих підходів, пов'язані з недостатнім урахуванням динаміки умов праці, людського фактора та економічних наслідків використання респіраторів, визначають необхідність удосконалення математичних моделей та практичних інструментів оцінювання ефективності ЗІЗОД. Саме ці напрями будуть реалізовані у третьому розділі дисертаційної роботи.

Висновки до розділу 2

1. Узагальнено теоретичні основи управління професійними ризиками в системі охорони праці. Встановлено, що концепції ALARP, ієрархії контролю ризиків, моделі «швейцарського сиру», Bow-Tie Analysis, Energy Barrier Model, трансформації ризику, аналізу надійності людини та інженерії стійкості створюють методологічне підґрунтя для комплексного управління ризиками ЗІЗОД. Виявлено, що їхнє пряме застосування до динамічних умов експлуатації респіраторів у гірничих виробках обмежене статичністю нормативних положень та недостатнім врахуванням фізіологічної взаємодії «людина – ЗІЗОД».

2. Обґрунтовано теоретичні засади оцінки надійності людини при тривалій експлуатації ЗІЗОД на основі методології SPAR-H. Встановлено, що стандартний метод недостатньо враховує вплив параметрів підмаскового простору (температура, відносна вологість, опір диханню, концентрація CO₂) на ймовірність помилкових дій працівника. Систематизовано вплив експлуатаційних факторів ЗІЗОД на чинники формування працездатності, що доводить можливість математичної модифікації методу шляхом введення додаткових коефіцієнтів, адекватних до умов гірничих виробок.

3. Розроблено теоретико-методичні основи ідентифікації та оцінки експлуатаційних ризиків ЗІЗОД шляхом інтеграції методів HAZOP та FMEA. Встановлено, що HAZOP забезпечує системне виявлення небезпечних відхилень у процесі використання ЗІЗОД, тоді як FMEA дозволяє кількісно оцінити критичність відмов конструктивних елементів за показником пріоритетного числа ризику (RPN). Доведено, що їхнє поєднання усуває «сліпі зони» окремих методів і створює наскрізний аналіз причинно-наслідкових ланцюгів, однак класичний показник RPN має статичний характер, суб'єктивність оцінок та обмежену роздільну здатність, що потребує подальшого удосконалення з урахуванням динаміки експлуатації та апарату нечітких множин.

4. Сформульовано теоретичні положення щодо оцінки ефективності прилягання, розрахунку коефіцієнта захисту та прогнозування ресурсу захисної дії ЗІЗОД. Встановлено, що реальний коефіцієнт захисту визначається не лише паспортними характеристиками фільтра, а й герметичністю прилягання, антропометричними особливостями працівника, динамікою рухів голови та станом системи кріплення. Обґрунтовано недоліки існуючих теоретичних підходів, які не враховують синергетичний вплив експлуатаційних факторів (вологість, температура, механічне навантаження) на деградацію фільтрувальних матеріалів та конструктивних елементів респіратора.

5. На підставі теоретичних досліджень сформовано наукові положення, які використано як підґрунтя для розробки в подальшому: моделі надійності людини на основі модифікованого методу SPAR-H з урахуванням параметрів підмаскового простору; удосконаленої методики ідентифікації та оцінювання експлуатаційних ризиків на основі інтеграції HAZOP і FME; конструктивних рішень для підвищення герметичності прилягання; математичних моделей і програмних засобів прогнозування захисних властивостей; інтегральної моделі оцінки професійних ризиків із залученням економічних критеріїв та циклу PDCA.

Основні результати, отримані в розділі 2, опубліковані в працях [90,102, 128].

Список використаних джерел до розділу 2

1. Health and Safety at Work etc. Act 1974. URL: <https://www.legislation.gov.uk/ukpga/1974/37> (дата звернення: 21.01.2026).
2. Health and Safety Executive. Reducing Risks, Protecting People: HSE's Decision-Making Process. London: HSE Books, 2001. URL: <https://shortlink.uk/1raaP>
3. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Hierarchy of Controls / Centers for Disease Control and Prevention. URL: <https://www.cdc.gov/niosh/topics/hierarchy/default.html> (дата звернення: 21.01.2026).
4. Manage the risks in your organization (ALARP): Guidance / Health and Safety Executive (HSE). 2026. URL: <https://www.hse.gov.uk/managing/index.htm> (дата звернення: 23.01.2026).
5. Reason J. Human error: models and management. BMJ. 2000. Vol. 320, No. 7237. 768-770. URL: <https://www.bmj.com/content/320/7237/768> (дата звернення: 22.05.2026).
6. Bow-tie Methodology: Information and Resources / Center for Chemical Process Safety (CCPS). AIChE. 2024. URL: <https://www.aiche.org/ccps/topics/bow-tie-methodology> (дата звернення: 10.12.2025).
7. Haddon W.Jr. On the Escape of Tigers: An Ecologic Note on the Estimation of Injury Control Strategies. American Journal of Public Health. 1970. Vol. 60, No. 12. P. 2229-2234. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1349282/> (дата звернення: 05.12.2025).
8. Лі Е., Вей Ч.-Ш., Лі Ю.-Ч. Підхід до моделювання процесів трансформації ризиків. Міжнародний журнал промислової інженерії: теорія, застосування та практика. 2010. Т. 17, № 1. DOI: <https://doi.org/10.23055/ijietap.2010.17.1.329>

9. Sameach M., Perelman V., Dori D. Streamlining Product Lifecycle Risk Management Through an OPM-Based Risk Modeling Framework. Systems Engineering. 2020. Vol. 23, No. 2. P. 145-160. URL: <https://dovdori.technion.ac.il/wp-content/uploads/2022/02/Streamlining-Product-Life-Cycle-Risk-Management.pdf>
10. Bell J., Holroyd J. Review of Human Reliability Assessment Methods / Health and Safety Laboratory. Derbyshire: Health and Safety Executive, 2009. 82 p. (Research Report; RR679). URL: <https://www.icheme.org/media/17251/rr679.pdf>
11. Resilience Engineering: Concepts and Precepts / ed. by E. Hollnagel, D.D. Woods, N. Leveson. London: CRC Press, 2006. 416 p. URL: <https://shortlink.uk/1racd>
12. ДСТУ ISO 45001:2019 (ISO 45001:2018, IDT). Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування. Чинний від 01.01.2021. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. 45 с. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_iso_45001_2019.pdf (дата звернення: 18.03.2026).
13. ДСТУ ISO 31000:2018 (ISO 31000:2018, IDT). Менеджмент ризиків. Принципи та настанови. Чинний від 01.01.2019. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 21 с. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_iso_31000_2018.pdf
14. ДСТУ EN ІЕС 31010:2022 (EN ІЕС 31010:2019, IDT; ІЕС 31010:2019, IDT). Керування ризиками. Методи оцінювання ризиків. Чинний від 31.12.2023. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2023. 106 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=100889 (дата звернення: 22.03.2026).
15. EN 149:2001+A1:2009. Respiratory Protective Devices. Filtering Half Masks to Protect Against Particles. Requirements, Testing, Marking. Released 31.07.2009. 41 p. URL: <https://www.lisungroup.com/wp-content/uploads/2020/05/BS-EN-149-2001A1-2009-Standard-Free-Download.pdf>

16. ДСТУ EN 149:2017 (EN 149:2001, IDT). Засоби індивідуального захисту органів дихання. Фільтрувальні півмаски для захисту від аерозолів. Вимоги, випробування, маркування. Чинний від 01.02.2018. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. 41 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=75012 (дата звернення: 15.12.2025)

17. ДСТУ EN 529:2006 (EN 529:2005, IDT). Засоби індивідуального захисту органів дихання. Рекомендації щодо вибору, використання, догляду та обслуговування. Настанови. Чинний від 01.10.2007. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2007. 42 с. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=54667 (дата звернення: 20.12.2025).

18. Про охорону праці: Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII (зі змінами від 12.09.2025). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text> (дата звернення: 18.03.2026).

19. Про затвердження Технічного регламенту засобів індивідуального захисту: Постанова Кабінету Міністрів України від 21.08.2019 № 771 (зі змін. та доп.). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/771-2019-%D0%BF#Text> (дата звернення: 15.01.2026).

20. НПАОП 0.00-7.17-18. Мінімальні вимоги безпеки і охорони здоров'я при використанні працівниками засобів індивідуального захисту на робочому місці: Наказ Міністерства соціальної політики України від 29.11.2018 № 1804. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1494-18> (дата звернення: 04.11.2025)

21. Boring R.L. Fifty Years of THERP and Human Reliability Analysis. Idaho: Idaho National Laboratory, 2012. 11 p. URL: <https://inldigitallibrary.inl.gov/content/uploads/50/2026/04/5680968.pdf>

22. Панасюк І.В., Микитенко Л.І., Данилевич Н.С. Людський фактор у формуванні безпеки праці людини. Технології та дизайн. 2012. № 2 (3). С. 1-8. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/2864>

23. Степанова О.О., Дьоміна О.О., Шульга А.Г. Роль людського фактору в питаннях забезпечення промислової безпеки. Вісник Харківського

національного автомобільно-дорожнього університету. Харків: ХНАДУ, 2012. Вип. 59. С. 135-137. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/478>

24. Tao J. et al. A Bibliometric Analysis of Human Reliability Research. Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 260. Art. 121041. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121041>

25. Tabor J. Human Reliability Management Assessment for Occupational Health and Safety Improvement. System Safety: Human – Technical Facility – Environment. 2024. Vol. 6, No. 1. P. 192-200. DOI: <https://doi.org/10.2478/czoto-2024-0021>

26. Цопа В. Ризик-орієнтоване мислення: основи, навчання та впровадження. Частина I. Охорона праці. 2017. № 8. С. 35-47. URL: <http://bit.ly/4uC5ZO6>

27. Кваша Т.К., Кухарук О.В. Управління стратегічними ризиками підприємства. Економіка та держава. 2020. № 8. С. 98-103. URL: http://www.economy.in.ua/pdf/8_2020/21.pdf

28. Williams J.C. HEART – A Proposed Method for Achieving High Reliability in Process Operation by Means of Human Factors Engineering Technology. Safety and Reliability. 2016. Vol. 35, No. 3. P. 5-25. DOI: <https://doi.org/10.1080/09617353.2015.11691046>

29. Embrey D. SHERPA: A Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach. Proceedings of the International Topical Meeting on Advances in Human Factors in Nuclear Power Systems (Knoxville, TN, 1986). La Grange Park: American Nuclear Society, 1986. P. 184-193. URL: <https://inis.iaea.org/records/deen4-r5y37>

30. Embrey D. Application of SHERPA to Predict and Prevent Use Error in Medical Devices. Proceedings of the International Symposium on Human Factors and Ergonomics in Health Care. SAGE Publications, 2014. Vol. 3, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.1177/2327857914031040>

31. Gertman D.I. et al. The SPAR-H Human Reliability Analysis Method / U.S. Nuclear Regulatory Commission, Idaho National Laboratory. Washington:

NRC, 2005. 154 p. (NUREG/CR-6883). URL: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6883/cr6883.pdf>

32. St. Germain S. et al. Modification of the SPAR-H Method to Support HRA for Level 2 PSA. Proceedings of the International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis (PSA 2015) (Sun Valley, ID, 26-30 April 2015). La Grange Park: American Nuclear Society, 2015. URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1358373>

33. Zhang S., Xu Z., Wu H. Fusions and Preference Relations Based on Probabilistic Interval-Valued Hesitant Fuzzy Information in Group Decision Making. Soft Computing. 2019. Vol. 23, No. 17. P. 8291-8306. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00500-018-3465-6>

34. Boring R.L. et al. Retrospective Application of Human Reliability Analysis for Oil and Gas Incidents: A Case Study Using the Petro-HRA Method. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting (Austin, TX, 2017). Austin: HFES, 2017. Vol. 61, No. 1. P. 1653-1657. DOI: <https://doi.org/10.1177/1541931213601900>

35. Rasmussen M., Standal M.I., Laumann K. Task Complexity as a Performance Shaping Factor: A Review and Recommendations in Standardized Plant Analysis Risk-Human Reliability Analysis (SPAR-H) Adaption. Safety Science. 2015. Vol. 76. P. 228-238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.03.005>

36. Roberge R.J., Kim J.-H., Benson S.M. N95 Filtering Facepiece Respirator Dead-space Temperature and Humidity. Journal of Occupational and Environmental Hygiene. 2012. Vol. 9, No. 3. P. 166-171. DOI: <https://doi.org/10.1080/15459624.2012.660428>

37. Чеберячко С.І. та ін. Вибір ефективних фільтрувальних респіраторів. Проблеми і можливості. Соціальний розвиток і безпека. 2020. Т. 10, № 4. С. 23-41. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2020.10.4.3>

38. James R., Dukes-Dobos F., Smith R. Effects of Respirators Under Heat/Work Conditions. American Industrial Hygiene Association Journal. 1984. Vol. 45, No. 6. P. 399-404. DOI: <https://doi.org/10.1080/15298668491400016>

39. Ramadan M.Z. Effects of Protective Respiratory Devices and Physical Workloads in Harsh Weather Conditions on Individuals' Physiological Measures and Exertion Ratings. *Work*. 2012. Vol. 42, No. 3. P. 435-445. DOI: <https://doi.org/10.3233/WOR-2012-1405>
40. Strömberg T., Eklund J., Gustafsson P.M. A Method for Measuring the CO₂ Dead Space Volume in Facial Visors and Respiratory Protective Devices in Human Subjects. *Ergonomics*. 1996. Vol. 39, No. 9. P. 1087-1106. DOI: <https://doi.org/10.1080/00140139608964531>
41. Birgersson E. et al. Reduction of Carbon Dioxide in Filtering Facepiece Respirators with an Active-Venting System: A Computational Study. *PLoS ONE*. 2015. Vol. 10, No. 6. Art. e0130306. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130306>
42. Laird I.S. et al. The Effect on Heart Rate and Facial Skin Temperature of Wearing Respiratory Protection at Work. *The Annals of Occupational Hygiene*. 2002. Vol. 46, No. 2. P. 143-148. DOI: <https://doi.org/10.1093/annhyg/mef015>
43. Cherrie J.W. et al. In-Mask Temperature and Humidity Can Validate Respirator Wear-Time and Indicate Lung Health Status. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*. 2019. Vol. 29. P. 578-583. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41370-018-0089-y>
44. Zimmerman N.J. et al. Effects of Respirators on Performance of Physical, Psychomotor and Cognitive Tasks. *Ergonomics*. 1991. Vol. 34, No. 3. P. 321-334. DOI: <https://doi.org/10.1080/00140139108967316>
45. AlGhamri A.A., Murray S.L., Samaranayake V.A. The Effects of Wearing Respirators on Human Fine Motor, Visual, and Cognitive Performance. *Ergonomics*. 2013. Vol. 56, No. 5. P. 791-802. DOI: <https://doi.org/10.1080/00140139.2013.767383>
46. Darabont D.C. et al. Impact of Personal Protective Equipment Use on Stress and Psychological Well-Being Among Firefighters: Systematic Review and Meta-Analysis. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, No. 22. Art. 9666. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16229666>

47. Cheberiachko Yu.I., Stolbchenko O.V., Naumov M.M. Assessment of the Impact of Respirator Parameters on Workers' Performance. *Mineral Deposits Development: Collection of Scientific Papers*. 2015. Vol. 9. P. 397-402. URL: <https://nasplib.isoftware.kiev.ua/handle/123456789/104662>
48. Chen Y., Wang J., Yang Z. The Human Factors/Ergonomics Studies for Respirators: A Review and Future Work. *International Journal of Clothing Science and Technology*. 2015. Vol. 27, No. 5. P. 652-676. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJCST-06-2014-0077>
49. Baig A.S. et al. Health Care Workers' Views About Respirator Use and Features that Should Be Included in the Next Generation of Respirators. *American Journal of Infection Control*. 2010. Vol. 38, No. 1. P. 18-25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2009.09.005>
50. Johnson A.T. Respirator Masks Protect Health but Impact Performance: A Review. *Journal of Biological Engineering*. 2016. Vol. 10. Art. 4. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13036-016-0025-4>
51. Swain A.D., Guttman H.E. *Handbook of Human-Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications*. Washington: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1983. DOI: <https://doi.org/10.2172/5752058>
52. Chang J. et al. An Investigation into Accidents in Laboratories in Universities in China Caused by Human Error: A Study Based on Improved CREAM and SPAR-H. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, No. 7. Art. e28537. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11002268/>
53. World Health Organization. *Laboratory Biosafety Manual*. 4th ed. Risk Assessment. Geneva: WHO, 2020. ISBN 978-92-4-001146-5. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240011458>
54. Gurses A.P. et al. Human Factors-Based Risk Analysis to Improve the Safety of Doffing Enhanced Personal Protective Equipment. *Infection Control & Hospital Epidemiology*. 2019. Vol. 40, No. 2. P. 178-186. DOI: <https://doi.org/10.1017/ice.2018.292>

55. Cheberiachko S. et al. Selection of Effective Filter Respirators: Challenges and Opportunities. *Social Development and Security*. 2020. Vol. 10, No. 4. P. 23-41. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2020.10.4.3>
56. Garrigou A. et al. Critical Review of the Role of PPE in the Prevention of Risks Related to Agricultural Pesticide Use. *Safety Science*. 2020. Vol. 123. Art. 104527. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.104527>
57. Кібік О., Слободянюк О., Кузнецова Л. Ризик-менеджмент: навч.-метод. посібник / Нац. ун-т «Одес. юрид. академія». Одеса: Фенікс, 2024. 84 с. URL: <https://surl.li/fcqrew>
58. IEC 61882:2016. Hazard and Operability Studies (HAZOP Studies) – Application Guide. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2016. 14 p. URL: <https://shortlink.uk/1rajO>
59. IEC 60812:2018. Failure Modes and Effects Analysis (FMEA and FMECA). Geneva: International Electrotechnical Commission, 2018. 165 p. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/21903/331059ef02794b548d049d58b18e456f/IEC-60812-2018.pdf>
60. Rana G.S., Tiwari V. Integrated FMEA-HAZOP Frameworks for Industrial Hazard Risk Assessment: A Thorough Review. *International Journal of Multidisciplinary Research and Technology*. 2025. Vol. 6, No. 12. P. 25-34. URL: <https://zenodo.org/records/17897085>
61. Deswandri D. et al. Risk Identification of Integral Pressurized Water Reactor (IPWR) Cooling System Using a Combination HAZOP, FMEA, and FTA Methods. *Process Safety Progress*. 2024. Vol. 43, No. S1. P. S78–S89. DOI: <https://doi.org/10.1002/prs.12570>
62. Jaddi Madarsara T., Yari S., Saeidabadi H. Health and Safety Risk Assessment Using a Combined FMEA and JSA Method in a Manufacturing Company. *Asian Pacific Journal of Environment and Cancer*. 2019. Vol. 2, No. 1. P. 63-68. DOI: <https://doi.org/10.31557/apjec.2019.2.1.63-68>
63. Braaksma A.J.J. et al. A Quantitative Method for Failure Mode and Effects Analysis. Groningen: University of Groningen, 2017. URL:

<https://research.rug.nl/en/publications/a-quantitative-method-for-failure-mode-and-effects-analysis>

64. Ericson C.A. II. Hazard Analysis Techniques for System Safety. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015. 640 p. ISBN 978-1-118-94038-9.

65. Kletz T.A. Computer Control – Living with Human Error. Reliability Engineering & System Safety. 1993. Vol. 39, No. 3. P. 257-261. DOI: [https://doi.org/10.1016/0951-8320\(93\)90002-G](https://doi.org/10.1016/0951-8320(93)90002-G)

66. Crawley F., Tyler B. HAZOP: Guide to Best Practice. Guidelines to Best Practice for the Process and Chemical Industries. Amsterdam: Elsevier, 2015. 160 p. ISBN 978-0-323-39460-4. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-04859-9>

67. Trammell S.R., Davis B.J. Using a Modified HAZOP/FMEA Methodology for Assessing System Risk. Proceedings of the 2nd International Workshop on Engineering Management for Applied Technology (EMAT 2001) (Austin, TX, 2001). Austin: IEEE, 2001. P. 47-53. DOI: <https://doi.org/10.1109/EMAT.2001.991310>

68. Кружилко О.Є. та ін. Удосконалення оцінки ризиків на основі моделювання наслідків виробничого травматизму. Проблеми охорони праці в Україні. 2022. Т. 38, № 3-4. С. 11-15. DOI: <https://doi.org/10.36804/nndipbop.38-3-4.2022.11-15>

69. Kruzhylo O., Tkalych I., Polukarov O. Improvement of Operational Management of Hygiene and Labor Safety on the Basis of Assessment of Occupational Hazard. Адаптивні системи автоматичного управління. 2019. № 1 (34). DOI: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.1.2019.178227>

70. Nelson T.J. The Assigned Protection Factor of 10 for Half-Mask Respirators. American Industrial Hygiene Association Journal. 1995. Vol. 56, No. 7. P. 717-724. DOI: <https://doi.org/10.1080/15428119591016755>

71. D'Alessandro M.M. et al. Who Does What? The Roles of NIOSH, OSHA, and the FDA in Respiratory Protection in the Workplace. NIOSH Science Bulletin. 2021. URL: https://www.cdc.gov/niosh/bulletin/2021/respirator_roles.html

72. Janssen L.L., Nelson T.J., Cuta K.T. Workplace Protection Factors for an N95 Filtering Facepiece Respirator. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2007. Vol. 4, No. 9. P. 698-707. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17654225/>
73. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Respiratory Protection / Centers for Disease Control and Prevention. URL: <https://www.cdc.gov/niosh/topics/respirators/default.html>
74. Assigned Protection Factors / U.S. Occupational Safety and Health Administration (OSHA). URL: [https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.134#1910.134\(d\)](https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.134#1910.134(d)); NIOSH Respirator Selection Logic / National Institute for Occupational Safety and Health. URL: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2005-100/pdfs/2005-100.pdf>
75. Bazaluk O. et al. Development of a Dust Respirator by Improving the Half Mask Frame Design. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18, No. 10. Art. 5482. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18105482>
76. Cheberiachko S., Yavorska O., Deryugin O., Yavorskyi A. Evaluation of the Probability of Miners' Protection While Using Filtering Respirators. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 201. Art. 01021. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101021>
77. Oestenstad R.K., Dillion H.K., Perkins L.L. Distribution of Face Seal Leak Sites on a Half-Mask Respirator and Their Association with Facial Dimensions. *American Industrial Hygiene Association Journal*. 1990. Vol. 51, No. 5. P. 285-290. DOI: <https://doi.org/10.1080/15298669091369664>
78. Bhattacharyya S., Dhinakaran S., Khalili A. Fluid Motion Around and Through a Porous Cylinder. *Chemical Engineering Science*. 2006. Vol. 61, No. 13. P. 4451-4461. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.02.012>
79. Cai M. et al. Customized Design and 3D Printing of Face Seal for an N95 Filtering Facepiece Respirator. *Journal of Occupational and Environmental*

Hygiene. 2018. Vol. 15, No. 3. P. 226-234. DOI:
<https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1411598>

80. Kwon Y.J., Kim J.G., Lee W.A Framework for Effective Face-Mask Contact Modeling Based on Finite Element Analysis for Custom Design of a Facial Mask. PLoS ONE. 2022. Vol. 17, No. 7. Art. e0270092. DOI:
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270092>

81. Shenal B.V. et al. Discomfort and Exertion Associated with Prolonged Wear of Respiratory Protection in a Health Care Setting. Journal of Occupational and Environmental Hygiene. 2012. Vol. 9, No. 1. P. 59-64. DOI:
<https://doi.org/10.1080/15459624.2012.635133>

82. Chopra J. et al. The Influence of Gender and Ethnicity on Facemasks and Respiratory Protective Equipment Fit: A Systematic Review and Meta-Analysis. BMJ Global Health. 2021. Vol. 6, No. 11. Art. e005537. DOI:
<https://doi.org/10.1136/bmjgh-2021-005537>

83. Wardhan R. et al. Does a Modified Adhesive Respirator Improve the Face Seal for Health Care Workers Who Previously Failed a Fit Test? A&A Practice. 2020. Vol. 14, No. 8. Art. e01264. DOI: <https://doi.org/10.1213/XAA.0000000000001264>

84. Cheberiachko S. et al. Designing Filtering Half-Masks. Vlákna a textil. 2020. Vol. 27, No. 3. P. 82-89. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/42313>

85. Cheberiachko S. et al. Development of an Algorithm for Effective Design of Respirator Half-Masks. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics. 2022. Vol. 28, No. 2. P. 1145-1159. DOI:
<https://doi.org/10.1080/10803548.2020.1869429>

86. Campbell D.L. et al. Respiratory Protection as a Function of Respirator Fitting Characteristics. AIHAJ. 2001. Vol. 62, No. 1. P. 36-44. DOI:
<https://doi.org/10.1080/15298660108984607>

87. Regli A. et al. The Role of Fit Testing N95/FFP2/FFP3 Masks: A Narrative Review. Anaesthesia. 2021. Vol. 76, No. 1. P. 91-100. DOI:
<https://doi.org/10.1111/anae.15261>

88. Akbar-Khanzadeh F. et al. Comfort of Personal Protective Equipment. *Applied Ergonomics*. 1995. Vol. 26, No. 3. P. 195-198. DOI: [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(95\)00017-7](https://doi.org/10.1016/0003-6870(95)00017-7)
89. Graveling R. et al. The Ergonomics of Respiratory Protection. *Handbook of Respiratory Protection: Safeguarding Against Current and Emerging Hazards* / ed. by R. Graveling. Boca Raton: CRC Press, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781351109079>
90. Tretiakova L., Cheberyachko Y., Sharovatova O., Nehrii T., Nehrii S., Kravchenko B., Zolotarova O. The Influence of Head Strap Elasticity on the Protective Properties of Filtering Facepiece Respirators. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. 2024. Vol. 39, No. 1. P. 131-140. DOI: <https://doi.org/10.17794/rgn.2024.1.11>
91. Klymov D., Golinko V., Cheberiachko S., Cheberiachko Y., and Deryugin O. Dust respirator (Протипиловий респіратор). 2020. Patent UA 140878.
92. World Health Statistics 2023 / World Health Organization. Geneva: WHO, 2023. URL: <https://repository.gheli.harvard.edu/repository/11008/> (дата звернення: 15.09.2024).
93. Qi X.M. et al. Pneumoconiosis: Current Status and Future Prospects. *Chinese Medical Journal*. 2021. Vol. 134, No. 8. P. 898-907. DOI: <https://doi.org/10.1097/CM9.0000000000001461>
94. Shekarian Y. et al. Respirable Coal Mine Dust: A Review of Respiratory Deposition, Regulations, and Characterization. *Minerals*. 2021. Vol. 11, No. 7. P. 1-25. DOI: <https://doi.org/10.3390/min11070696>
95. Slavinskyi D. et al. Automated Air Pressure Control System in a Motorised Breathing Apparatus. *Machinery & Energetics*. 2024. Vol. 15, No. 1. P. 9-22. URL: <https://shortlink.uk/1qldz>
96. Tu J., Yeoh G.-H., Liu C. Governing Equations for CFD – Fundamentals. *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2013. P. 61-121. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098243-4.00003-2>

97. ДСТУ EN 13274-1:2005 (EN 13274-1:2001, IDT). Засоби індивідуального захисту органів дихання. Методи випробувань. Частина 1. Визначення коефіцієнта проникання і загального коефіцієнта проникання. Чинний від 01.01.2006. Київ: Держспоживстандарт України, 2005. 18 с.
98. Laney A.S., Weissman D.N. Respiratory Diseases Caused by Coal Mine Dust. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*. 2014. Vol. 56. P. S18-S22. DOI: <https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000000260>
99. Kleinstreuer C., Zhang Z. Airflow and Particle Transport in the Human Respiratory System. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2010. Vol. 42. P. 301-334. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-121108-145453>
100. Feng X. et al. Nonlinear Stability of the Implicit-Explicit Methods for the Allen-Cahn Equation. *Inverse Problems and Imaging*. 2013. Vol. 7, No. 3. P. 679-695. DOI: <https://doi.org/10.3934/ipi.2013.7.679>
101. Diegel A.E. et al. Convergence Analysis and Error Estimates for a Second Order Accurate Finite Element Method for the Cahn–Hilliard–Navier–Stokes System. *Numerische Mathematik*. 2017. Vol. 137. P. 495-534. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00211-017-0887-5>
102. Cheberiachko S., Cheberiachko Y., Deryugin O., Kravchenko B., Nehrii T., Nehrii S., Zolotarova O. Increasing the Insulation Properties of Filter Respirators to Protect Miners' Respiratory Organs from Dust. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. 2023. Vol. 38, No. 4. P. 27-40. DOI: <https://doi.org/10.17794/rgn.2023.4.3>
103. Lee K.W., Liu B.Y.H. Theoretical Study of Aerosol Filtration by Fibrous Filters. *Aerosol Science and Technology*. 1982. Vol. 1, No. 2. P. 147-161. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00022470.1980.10464592>
104. Hinds W.C. *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. 2nd ed. New York: Wiley, 1999. 504 p. ISBN 978-1-118-59197-0.

105. Brown R.C. Air Filtration: An Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters. Oxford: Pergamon Press, 1993. 258 p. ISBN 0-08-041274-2.
106. Радчук Д.І., Чеберячко С.І., Чеберячко Ю.І., Дерюгін О.В. Аналіз ефективності існуючих способів визначення часу захисної дії протигазових фільтрів. Науковий вісник ДонНТУ. 2023. № 2 (11). С. 128-137. DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-2-11-128-137>
107. Moon S.M. et al. Design and Integration of a Gas Sensor Module that Indicates the End of Service Life of a Gas Mask Canister. Advanced Materials Technologies. 2022. Vol. 7. Art. 2100711. DOI: <https://doi.org/10.1002/admt.202100711>
108. Janvier F. Effect of Mixtures: Optimization of Parameters Used in Predictive Models for Respirator Cartridge Service Life for Toxic Organic Vapors: PhD thesis. Montreal: Université de Montréal, 2017. P. 37-175.
109. 3M Science. Applied to Life. Select and Service Life Calculator. URL: <https://sls.3m.com/>
110. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). MultiVapor™, Version 2.2.6 / National Personal Protective Technology Laboratory (NPPTL). Publication No. 2010-124C. URL: <https://www.cdc.gov/niosh/npptl/multivapor/multivapor.html>
111. Lodewyckx P., Fernandez-Velasco L., Boutillara Y. Estimating the Service Life of Activated Carbon Filters for Air Purification. Eurasian Chemico-Technological Journal. 2019. Vol. 21, No. 3. P. 193-201. DOI: <https://doi.org/10.18321/ectj860>
112. Yoon Y.H., Nelson J.H. Breakthrough Time and Adsorption Capacity of Respirator Cartridges. American Industrial Hygiene Association Journal. 1992. Vol. 53, No. 5. P. 303-316.
113. Wood G.O. Estimating Service Lives of Organic Vapor Cartridges. American Industrial Hygiene Association Journal. 1994. Vol. 55, No. 1. P. 11-15.

114. Respirator Change Schedules: Using a Math Model Table to Determine a Cartridge's Service Life. The Yoon-Nelson Mathematical Model / U.S. Occupational Safety and Health Administration (OSHA). URL: <https://www.osha.gov/etools/respiratory-protection/change-schedules/math-model>
115. Borsi I., Fasano A., Lenzini L. Computing the Lifetime of Granular Activated Carbon Filters by Means of Travelling Waves Solutions. Applied Mathematical Modelling. 2011. Vol. 35, No. 4. P. 1868-1880. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.10.016>
116. Abiko H., Furuse M., Takano T. Estimation of Organic Vapor Breakthrough in Humidified Activated Carbon Beds: Application of Wheeler-Jonas Equation, NIOSH MultiVapor™ and RBT (Relative Breakthrough Time). Journal of Occupational Health. 2016. Vol. 58, No. 6. P. 570-581. DOI: <https://doi.org/10.1539/joh.15-0244-OA>
117. International Labour Organization (ILO). Safety and Health at the Heart of the Future of Work. Geneva: ILO, 2019. URL: https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@dgreports/@dcom/documents/publication/wcms_686645.pdf
118. European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA). Economic Incentives to Improve Occupational Safety and Health. Bilbao: EU-OSHA, 2010. URL: https://osha.europa.eu/sites/default/files/economic_incentives.pdf
119. Clayton M.P., Bancroft B., Rajan B.A. Review of Assigned Protection Factors of Various Types and Classes of Respiratory Protective Equipment with Reference to Their Measured Breathing Resistances. The Annals of Occupational Hygiene. 2002. Vol. 46, No. 6. P. 537-547. DOI: <https://doi.org/10.1093/annhyg/mef071>
120. Johnson T. et al. Effect of Respirator Inspiratory Resistance Level on Constant Load Treadmill Work Performance. American Industrial Hygiene Association Journal. 1999. Vol. 60, No. 4. P. 474-479.

121. Caretti D.M., Whitley J.A. Exercise Performance During Inspiratory Resistance Breathing Under Exhaustive Constant Load Work. *Ergonomics*. 1998. Vol. 41, No. 4. P. 501-511. DOI: <https://doi.org/10.1080/001401398186973>
122. Чеберячко С.І., Чеберячко Ю.І. Оцінка впливу засобів індивідуального захисту органів дихання на працездатність людини. *Науковий вісник НГУ*. 2007. № 7. С. 60-63.
123. Чеберячко С.І. та ін. Експериментальні дослідження впливу параметрів мікроклімату на працездатність людини під час використання фільтрувальних респіраторів. *Український журнал з проблем медицини праці*. 2017. № 4 (53). С. 54-58.
124. Голінько В.І., Чеберячко С.І., Чеберячко Ю.І., Дерюгін О.В., Славінський Д.В., Радчук Д.І., Клімов Д.Г. 2020. пат. 147372 Україна. Фільтрувальний дихальний апарат з примусовою подачею повітря. опубл. 05.05.2021, Бюл. № 18. 4 с.
125. Goetsch D.L. *Occupational Safety and Health for Technologists, Engineers, and Managers*. 9th ed. Hoboken : Pearson, 2020. 752 p.
126. Health and Safety Executive (HSE). *Reducing Risks, Protecting People: HSE's Decision-Making Process*. London: HSE Books, 2001. 88 p. URL: <https://shortlink.uk/1qr7W>
127. Coombs E. 8 Respiratory Equipment Evaluation Tips You Might Be Overlooking / Dräger. URL: <https://shortlink.uk/1wB8M>
128. Голінько В.І., Кравченко Б.Д. Економічне обґрунтування вибору засобів індивідуального захисту органів дихання. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2023. № 2 (53). С. 14-25. DOI: <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2023-2-14-25>

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ІНТЕГРАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ ПРОФЕСІЙНИХ РИЗИКІВ ПРИ ВИБОРІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗІЗОД

Аналіз теоретичних основ та методичних підходів, виконаний у першому та другому розділах дисертаційної роботи, показав наявність суттєвих обмежень існуючих методів оцінювання професійних ризиків при виборі та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання. Встановлено, що сучасні підходи переважно орієнтовані на окремі технічні або організаційні аспекти використання ЗІЗОД і недостатньо враховують взаємозв'язок між технічними характеристиками респіратора, фізіологічним станом працівника, людським фактором та економічними наслідками експлуатації.

У зв'язку з цим у третьому розділі запропоновано комплекс удосконалень, спрямованих на формування інтегрального підходу до оцінювання професійних ризиків при виборі та експлуатації ЗІЗОД. Запропонований підхід поєднує оцінку функціональної надійності людини, результати аналізу ризиків HAZOP та FMEA, конструктивні характеристики респіраторів, математичні моделі ефективності захисту та економічні критерії безпеки.

Особливістю запропонованого підходу є комплексне врахування технічних, фізіологічних, організаційних та економічних факторів у межах єдиної інтегральної моделі професійного ризику. Це дозволяє перейти від формального забезпечення працівників засобами захисту до ризик-орієнтованого управління вибором та експлуатацією ЗІЗОД у реальних виробничих умовах.

3.1. Розробка моделі надійності людини при експлуатації ЗІЗОД на основі модифікованого методу SPAR-H

Аналіз теоретичних основ і нормативної бази (розділ 1) показав, що сучасна система управління професійними ризиками при виборі та

експлуатації ЗІЗОД значною мірою зосереджена на технічних характеристиках засобів захисту та гранично-допустимих концентраціях шкідливих факторів. Водночас вплив самих засобів індивідуального захисту на фізіологічний стан, самопочуття та працездатність працівника, як правило, залишається поза увагою фахівців з охорони праці, оскільки цей аспект практично не регламентований чинним законодавством. В сучасних виробничих умовах, особливо в гірничій промисловості, працівники дедалі частіше виконують свої обов'язки із застосуванням ЗІЗ, до складу яких входять респіратори, захисний одяг, спецвзуття, рукавиці, окуляри та каски. Таке оснащення ефективно запобігає впливу шкідливих речовин, пилу, газів і біологічних агентів, знижуючи ризик професійних захворювань, травм і аварій [1]. Водночас тривале перебування в ЗІЗ протягом зміни (до 12 годин) створює значне додаткове фізичне навантаження на організм працівника [2]. Респіратори посилюють навантаження на дихальну систему, щільний одяг обмежує рухи, а підвищена температура й вологість під ЗІЗ негативно впливають на фізіологічний стан людини [3]. Унаслідок цього зростає пульс, частота й глибина дихання, підвищується температура тіла, знижується концентрація уваги та швидко накопичується втома. Це безпосередньо позначається на точності рухів, швидкості реакції та координації, збільшуючи ймовірність помилок [4].

Зазвичай вплив ЗІЗ на фізіологію, самопочуття та працездатність працівника залишається поза увагою фахівців з охорони праці, оскільки цей аспект законодавчо не регламентований. У сучасній системі безпеки праці людський чинник продовжує бути однією з найслабших ланок [5,6]. Навіть за наявності досконалих ЗІЗ саме людина керує технікою, реагує на небезпеки та приймає критичні рішення. Безпомилкову й стабільну роботу працівника характеризує поняття «надійність людини» [7]. Вона залежить від температури, вологості, шуму, втоми, стресу, уваги та комфортності умов праці.

Однією з найсуттєвіших прогалин сучасних методів оцінки професійних ризиків (розділ 1.3) при виборі та експлуатації ЗІЗОД є недостатнє кількісне

врахування впливу ЗІЗОД на фізіологічний стан і надійність працівника. Класичний метод SPAR-H (Standardized Plant Analysis Risk – Human Reliability Analysis) [7] добре зарекомендував себе для оцінки людського фактора, проте він не враховує специфічних факторів підмаскового мікроклімату, психофізіологічних навантажень, спричинених тривалим носінням респіраторів в умовах підвищеної температури, вологості та опору диханню. Саме тому в межах дисертаційного дослідження проведено експлуатаційні випробування, розроблено та запропоновано в роботі його модифікацію для ЗІЗОД, а саме модифіковану модель надійності людини.

Для оцінки впливу респіраторів на надійність людини спочатку було проведено аналіз і виділено три основні типи респіраторів, які найчастіше застосовуються у виробничих умовах, та проведено аналіз їхніх переваг і недоліків з урахуванням впливу на надійність працівника. Ці респіратори суттєво відрізняються між собою конструктивними особливостями, рівнем захисту та ступенем впливу на організм людини (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Аналіз типів респіраторів, що використовуються у виробничих умовах [8]

Тип ЗІЗОД	Стандарт	Опис	Вплив на надійність людини
Фільтрувальна півмаска	EN 149	Одноразова або багаторазова маска з вбудованим фільтром класу FFP2 з клапаном видиху	Легка та зручна, але може викликати швидшу втому при тривалому носінні; середній рівень герметичності знижує концентрацію і викликає періодичний дискомфорт
Півмаска з фільтрами	EN 140	Силіконова або гумова півмаска, до якої кріпляться два змінні протиаерозольні фільтри та містить один клапан видиху	Забезпечує кращу герметичність і нижчий опір диханню, проте збільшує вагу та навантаження на м'язи обличчя; вища надійність за умови регулярної перевірки фільтрів
Повнолицева маска	EN 136	Закриває все обличчя, має вбудовану систему циркуляції повітря та змінні фільтри	Найвищий рівень захисту і стабільності дихання, знижує ризик помилок, але значно впливає на зручність, обмежує поле зору, підвищує психологічне навантаження

Для проведення випробувань відповідно до табл. 3.1 на ринку України були придбані такі респіратори (рис. 3.1):

- фільтрувальна півмаска «Мікрон» FFP2 (EN 149);
- півмаска з фільтрами Dnipro-M RS-2 (EN 140);
- повнолицева маска 3М серії 6000 (EN 136).



Рис. 3.1. Зовнішній вигляд респіраторів, використаних у випробуваннях [8]:

- а) фільтрувальна півмаска «Мікрон» FFP2; б) півмаска з фільтрами Dnipro-M RS-2;
в) повнолицьова маска 3М серії 6000

Тестування проводилося на території акредитованої випробувальної лабораторії засобів індивідуального захисту ТОВ «СТАНДАРТ КАПІТАЛ ІНВЕСТ» (м. Дніпро).

Для встановлення фізичних параметрів (температури та відносної вологості повітря) у підмасковому просторі, а також фізіологічних параметрів людини (частоти пульсу) під час використання респіраторів і подальше порівняння цих показників із відповідними значеннями, що виникають при виконанні виробничих завдань з різними енергетичними витратами, було проведено тестування респіраторів із залученням групи випробувачів. У дослідженні взяли участь 6 осіб (3 чоловіків та 3 жінки) віком від 21 до 45 років – співробітники Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», які не мали жодного відношення до результатів випробувань.

На етапі відбору проводилося детальне анкетування щодо стану здоров'я, недавніх медичних втручань та перенесених захворювань. Лише після позитивного висновку кандидати допустились до участі в експерименті. Перед початком тестування всіх випробувачів ознайомили з процедурою досліджень та провели інструктаж з правил користування респіраторами. Участь у випробуваннях була повністю добровільною, про що кожен випробувач підписав інформовану згоду, згідно з якою не має претензій до організаторів.

Для тестування респіраторів проводилися експлуатаційні випробування відповідно до стандарту EN 13274-2 [9]. Випробувачі виконували такі вправи:

- тестування в стані спокою без респіратора: сидяче положення протягом 5 хвилин без виконання будь-якої фізичної роботи;
- ходьба по горизонтальній поверхні у повний зріст зі швидкістю від 2 до 8 км/год протягом 3 хвилин на кожній швидкості в респіраторі;
- ходьба по горизонтальній поверхні у повний зріст зі швидкістю від 2 до 8 км/год протягом 3 хвилин на кожній швидкості в респіраторі з одночасним промовлянням слів.

Перед тестуванням кожен випробувач надягав респіратор і ретельно припасовував його на обличчі для забезпечення щільного прилягання. У підмасковий простір в області щокі вводили гнучкий датчик температури та відносної вологості ПВТ100 (виробник AQteck, Україна), який підключався до двоканального вимірювального приладу 2TRM0-Щ1.У. На дисплеї приладу в реальному часі відображалися значення температури та відносної вологості повітря. Температуру реєстрували з точністю до 1 °С (розширена невизначеність $\pm 0,6$ °С), а відносну вологість — з точністю до 1 % (розширена невизначеність $\pm 1,2$ %).

Частоту пульсу визначали за допомогою електронного пульсоксиметра P01 TFT Blue (JN, Китай) з автоматичною фіксацією результатів і виведенням даних на дисплей. Отримані показники фіксували в паперовому протоколі дослідження та переносили в цифрову базу даних. Для обробки експериментальних даних використовували програмне забезпечення Microsoft Excel 365. Результати осереднювали з оцінкою невизначеності вимірювань

при рівні значущості $P < 0,05$ відповідно до настанови JCGM 100:2008 «Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement» [10]. Обробку даних та побудову апроксимаційних кривих також здійснювали в Microsoft Excel 365.

Після кожного випробування добровольці заповнювали запропонований чек-лист оцінки комфортності (рис. 3.2).

ОПИТУВАЛЬНИК КОМФОРТНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РЕСПІРАТОРА*

Дані респондента та умови випробування:

ПІБ: _____

Стать: ☐ Ч / ☐ Ж / ☐ Інша

Вік: _____ повних років

Досвід використання ЗІЗОД: ☐ немає ☐ <1 року ☐ 1-5 років ☐ >5 років

Тип респіратора (марка, модель, клас захисту): _____

Температура середовища: _____ °C

Вологість середовища: _____ %

Пульс у стані спокою: _____ уд./хв.

*Оберіть один варіант відповіді у кожному пункті

1. Оцініть опір диханню під час роботи в респіраторі?

Оцінка	Сидячи	2	3	4	5	6	8
		км/год	км/год	км/год	км/год	км/год	км/год
☐ Дуже легко дихати							
☐ Легко дихати							
☐ Середній рівень зусиль							
☐ Важко дихати							
☐ Дуже важко дихати							

2. Оцініть температуру повітря під маскою?

Оцінка	Сидячи	2	3	4	5	6	8
		км/год	км/год	км/год	км/год	км/год	км/год
☐ Комфортна							
☐ Трохи підвищена, але не заважає							
☐ Відчутно тепліша, викликає дискомфорт							
☐ Дуже висока, важко дихати							
☐ Неприятна, використання неможливе							

3. Оцініть вологість повітря під маскою?

Оцінка	Сидячи	2	3	4	5	6	8
		км/год	км/год	км/год	км/год	км/год	км/год
☐ Комфортна, не відчувалась							
☐ Незначна, не заважала							
☐ Помітна, викликала дискомфорт							
☐ Висока, заважала роботі							
☐ Дуже висока, використання неможливе							

4. Чи обмежував респіратор ваші рухи або концентрацію?

Оцінка	Сидячи	2	3	4	5	6	8
		км/год	км/год	км/год	км/год	км/год	км/год
☐ Не обмежував							
☐ Мінімально							
☐ Помірно							
☐ Значно							
☐ Повністю заважав							

5. Загальне ставлення після носіння респіратора

Оцінка	Сидячи	2	3	4	5	6	8
		км/год	км/год	км/год	км/год	км/год	км/год
☐ Комфортно, можу працювати довго							
☐ Легкий дискомфорт							
☐ Помірний дискомфорт							
☐ Сильний дискомфорт							
☐ Нестерпно, хочеться зняти							

Рис. 3.2 Запропонована форма опитувального чек-листа [8]

Це дало змогу отримати суб'єктивну оцінку сприйняття респіратора за такими критеріями: опір диханню, температура та відносна вологість у підмасковому просторі, рівень втомлюваності, а також вплив на увагу й зосередженість. Такий підхід забезпечує комплексність дослідження, оскільки поєднує об'єктивні вимірювані параметри (пульс, температура та вологість під маскою) із суб'єктивними відчуттями користувача.

Використання п'ятибальної шкали дозволяє проводити подальший аналіз шляхом розрахунку середніх значень та встановлення кореляції між об'єктивними фізіологічними показниками й суб'єктивним відчуттям дискомфорту. Це суттєво підвищує достовірність результатів і створює необхідне підґрунтя для формування інтегральної оцінки ефективності ЗІЗОД. При цьому враховується не лише захисна спроможність респіратора, а й рівень комфортності, який безпосередньо впливає на надійність людини. Критерії оцінки чек-листа наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Критерії суб'єктивної оцінки комфортності респіратора за чек-листом [8]

Критерій оцінки	5 – добре	4 - незначно	3 – помірно	2 - погано	1 – критично
1. Опір диханню	Дуже легко дихати	Легко дихати	Середній рівень зусиль	Важко дихати	Дуже важко дихати
2. Температура в середині маски	Комфортна	Трохи підвищена, але не заважала	Відчутно тепліша, викликала дискомфорт	Дуже висока, дихати важко	Неприйнятно, використання неможливе
3. Вологість в середині маски	Комфортна, не відчувалась	Незначна, не заважала	Помітна, викликала дискомфорт	Висока, заважала роботі	Дуже висока, використання неможливе
4. Обмеження рухів/сприйняття	Не обмежував	Мінімально	Помірно	Значно	Повністю заважав
5. Загальне ставлення	Комфортно, може працювати тривалий час	Легкий дискомфорт	Помірний дискомфорт	Сильний дискомфорт	Нестерпно, хочеться зняти

Після заповнення чек-листа для кожного критерію розраховували середній бал, після чого визначали загальну усереднену оцінку комфортності респіратора.

Для вирішення завдання з кількісної оцінки впливу людського чинника було застосовано два найбільш визнані методи аналізу надійності людини — THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) [11] та SPAR-H (Standardized Plant Analysis Risk – Human Reliability Analysis) [12]. На основі положень методики SPAR-H розроблено адаптований підхід для оцінки впливу використання респіратору на надійність виконання оператором виробничих завдань.

З метою кількісного врахування впливу мікроклімату підмаскового простору, фізіологічного навантаження та психофізіологічного стану працівника на надійність виконання дій у межах підходу SPAR-H запропоновано систему емпіричних коригувальних коефіцієнтів K_T , K_H та K_P . Під час їх формування у роботі прийнято лінійну залежність між зміною відповідних факторів і рівнем функціональної надійності працівника. Такий підхід ґрунтується на припущенні про локальну лінійність впливу факторів у межах робочих діапазонів їх зміни, характерних для експлуатації ЗІЗОД, забезпечує простоту практичного застосування моделі та збереження фізичної інтерпретованості результатів. Використання квадратичних або інших нелінійних залежностей потребує окремого експериментального обґрунтування та визначення додаткових параметрів моделі, що виходить за межі поставлених у дисертаційній роботі завдань. Відповідно до концепції SPAR-H вплив кожного з факторів враховано у вигляді незалежного множинного коригувального множника, що дозволяє оцінити їх сукупний вплив на функціональну надійність працівника.

Загальна надійність людини при роботі в респіраторі розраховувалася за формулою:

$$R=R_0 \times K_T \times K_H \times K_P, \quad (3.1)$$

де: R – загальна надійність людини при роботі в респіраторі ($0 < R \leq 1$);

$R_0=1,0$ – базова надійність без респіратору;

K_T – коефіцієнт впливу температури підмаскового простору;

K_H – коефіцієнт впливу вологості підмаскового простору;

K_p – коефіцієнт впливу фізіологічних змін (пульс).

Запропоновано залежності від температури (K_T), вологості (K_H) та пульсу (K_p) розраховувати за допомогою імпіричних лінійних формул відповідно [8]:

$$K_T = 1 - 0,02 \times |T - T_{\text{норм}}|, \quad (3.2)$$

де T – температура в підмасковому просторі, °C;

$T_{\text{норм}}$ – комфортна температура (32°C).

$$K_H = 1 - 0,01 \times |H - H_{\text{норм}}|, \quad (3.3)$$

де H – вологість у підмасковому просторі, %;

$H_{\text{норм}}$ – комфортна вологість (50 %).

$$K_p = 1 - 0,005 \times |P - P_{\text{норм}}|, \quad (3.4)$$

де P – пульс визначений при роботі в респіраторі, уд./хв.;

$P_{\text{норм}}$ – нормальний пульс при роботі без респіратора.

Для оцінки функціонального стану людини було визначено вагові коефіцієнти впливу ключових показників на працездатність. Зокрема, температура повітря у підмасковому просторі, що критично впливає на когнітивні функції та моторику, має коефіцієнт 2 %/°C. Вплив відносної вологості повітря, який здебільшого обмежується відчуттям дискомфорту, оцінюється в 1 %/%. Мінімальний миттєвий вплив на продуктивність мають коливання частоти серцевих скорочень (ЧСС), тобто пульс, для яких прийнято початкове значення 0,5 %/уд/хв.

Розрахунок енерговитрат базується на методиці ACSM [13,14], де рівень споживання кисню (VO_2) визначається за наступною формулою:

$$VO_2 = 3.5 + 0.1V_{m/min}, \quad (3.5)$$

де $V_{m/min}$ – швидкість руху людини по горизонтальній поверхні, м/хв.

Для оцінки витрат енергії людиною за хвилину застосовано формулу:

$$\frac{kcal}{min} = VO_2 \cdot \frac{M_h}{1000} \cdot RQ, \quad (3.6)$$

де M_h – вага людини, кг;

RQ – дихальний коефіцієнт (4,7-5,05 ккал/л).

Загальна формула енерговитрат з урахуванням 15-відсоткової поправки на невраховані чинники має вигляд:

$$\frac{kcal}{min} = 1,15 \cdot (3,5 + 0,1V_{m/min}) \cdot \frac{M_h}{1000} \cdot RQ. \quad (3.7)$$

Емпіричні дані, отримані під час тестування за участю добровольців, а також розраховані на їх основі коефіцієнти, систематизовано в табл. 3.3-3.8 [8].

Таблиця 3.3

**Показники, отримані під час тестування фільтрувальних півмасок
«Мікрон» FFP2, та відповідні розрахункові коефіцієнти**

Дії випробувача	Температура повітря під маскою, °С	Відносна вологість повітря, %	Різниця пульсу, уд/хв.	K_T	K_H	K_P	R
сидячи	32,5	73	2	0,99	0,77	0,99	0,75
2 км/год*	33,8	75	6	0,96	0,75	0,97	0,70
3 км/год*	34,1	76	7	0,96	0,74	0,97	0,68
4 км/год*	34,8	79	9	0,94	0,71	0,96	0,64
5 км/год*	35,1	80	11	0,94	0,70	0,95	0,62
6 км/год*	34,9	77	12	0,94	0,73	0,94	0,65
8 км/год*	34,7	77	12	0,95	0,73	0,94	0,65

Примітка: * – ходіння по біговій доріжці з заданою швидкістю

Таблиця 3.4

**Підсумкові дані випробувань напівмасок, укомплектованих
фільтрами Dnipro-M RS-2, разом із визначеними коефіцієнтами**

Дії випробувача	Температура повітря під маскою, °С	Відносна вологість повітря, %	Різниця пульсу, уд/хв.	K_T	K_H	K_P	R
сидячи	33,2	64	1	0,98	0,86	1,00	0,84
2 км/год*	33,8	67	2	0,96	0,83	0,99	0,79
3 км/год*	33,9	69	2	0,96	0,81	0,99	0,77
4 км/год*	33,8	70	4	0,96	0,80	0,98	0,76
5 км/год*	33,8	69	6	0,96	0,81	0,97	0,76
6 км/год*	34,1	69	9	0,96	0,81	0,96	0,74
8 км/год*	34,2	66	10	0,96	0,84	0,95	0,76

Примітка: * – ходіння по біговій доріжці з заданою швидкістю

Таблиця 3.5

**Результати випробувань повнолицьових масок 3М серії 6000 та
обчислені на їх основі коефіцієнти**

Дії випробувача	Температура повітря під маскою, °С	Відносна вологість повітря, %	Різниця пульсу, уд/хв.	К _Т	К _Н	К _Р	R
сидячи	34,1	69	2	0,96	0,81	0,99	0,77
2 км/год*	34,2	72	5	0,96	0,78	0,98	0,73
3 км/год*	34,4	75	7	0,95	0,75	0,97	0,69
4 км/год*	34,6	78	10	0,95	0,72	0,95	0,65
5 км/год*	34,7	81	11	0,95	0,69	0,95	0,62
6 км/год*	35,0	84	12	0,94	0,66	0,94	0,58
8 км/год*	35,6	85	14	0,93	0,65	0,93	0,56

Примітка: * – ходіння по біговій доріжці з заданою швидкістю

Таблиця 3.6

**Коефіцієнти та результати випробувань фільтрувальних півмасок
«Мікрон» FFP2, зафіксовані в умовах мовленнєвого навантаження**

Дії випробувача	Температура повітря під маскою, °С	Відносна вологість повітря, %	Різниця пульсу, уд/хв.	К _Т	К _Н	К _Р	R
сидячи	32,8	81	3	0,98	0,69	0,99	0,67
2 км/год*	33,7	82	8	0,97	0,68	0,96	0,63
3 км/год*	34,2	84	8	0,96	0,66	0,96	0,61
4 км/год*	35,2	80	10	0,94	0,70	0,95	0,62
5 км/год*	34,8	76	12	0,94	0,74	0,94	0,66
6 км/год*	34,1	73	13	0,96	0,77	0,94	0,69
8 км/год*	33,7	71	16	0,97	0,79	0,92	0,70

Примітка: * – ходіння по біговій доріжці з заданою швидкістю

Таблиця 3.7

**Експериментальні дані та розрахункові показники півмасок із
фільтрами Dnipro-M RS-2 під час промовляння тексту**

Дії випробувача	Температура повітря під маскою, °С	Відносна вологість повітря, %	Різниця пульсу, уд/хв.	К _Т	К _Н	К _Р	R
сидячи	33,5	76	1	0,97	0,74	1,00	0,71
2 км/год*	33,9	79	2	0,96	0,71	0,99	0,68
3 км/год*	34,2	83	3	0,96	0,67	0,99	0,63
4 км/год*	34,0	77	5	0,96	0,73	0,98	0,68
5 км/год*	33,7	74	8	0,97	0,76	0,96	0,70
6 км/год*	33,6	69	11	0,97	0,81	0,95	0,74
8 км/год*	33,1	65	12	0,98	0,85	0,94	0,78

Примітка: * – ходіння по біговій доріжці з заданою швидкістю

Таблиця 3.8

Значення коефіцієнтів та результати тестування повнолицьових масок 3М серії 6000 при промовлянні

Дії випробувача	Температура повітря під маскою, °С	Відносна вологість повітря, %	Різниця пульсу, уд/хв.	К _Т	К _Н	К _Р	R
сидячи	34,2	74	4	0,96	0,76	0,98	0,71
2 км/год*	34,4	78	6	0,95	0,72	0,97	0,66
3 км/год*	34,7	83	8	0,95	0,67	0,96	0,61
4 км/год*	34,9	81	10	0,94	0,69	0,95	0,62
5 км/год*	35,2	80	12	0,94	0,70	0,94	0,62
6 км/год*	35,5	77	14	0,93	0,73	0,93	0,63
8 км/год*	35,5	76	15	0,93	0,74	0,93	0,64

Примітка: * – ходіння по біговій доріжці з фіксованою швидкістю

Для зіставлення отриманих даних із класифікацією робіт за ступенем важкості було визначено сумарні енергетичні витрати організму випробувача (табл. 3.9).

Графічна залежність енерговитрат користувача та коефіцієнта надійності в умовах мовленнєвого спокою та під час промовляння відображена на рис. 3.3-3.4.

За результатами встановлено, що за умови відсутності мовленнєвого навантаження збільшення швидкості руху призводить до зниження коефіцієнта надійності для всіх досліджуваних моделей. Найбільше зниження коефіцієнту зафіксовано у повнолицьовій масці 3М серії 6000: при зростанні швидкості від стану спокою до 8 км/год значення впало з 0,77 до 0,56.

Таблиця 3.9

Показники сумарних енергетичних витрат організму випробувача протягом дослідження

Дії випробувача	Середня вага випробувачів, кг	RQ	Розраховані енерговитрати, ккал/хв	Розраховані енерговитрати, ккал/год	Категорія робіт за ДСН 3.3.6.042 [15]
сидячи	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
2 км/год*	72,7 ± 10,2	4,9	2,799	168,0	2а
3 км/год*			3,482	208,9	2а
4 км/год*			4,165	249,9	2б
5 км/год*			4,848	290,9	3
6 км/год*			5,530	331,8	3
8 км/год*			6,896	413,8	надкат

Примітка: * – ходіння по біговій доріжці з заданою швидкістю; н/о – параметр не оцінювався.

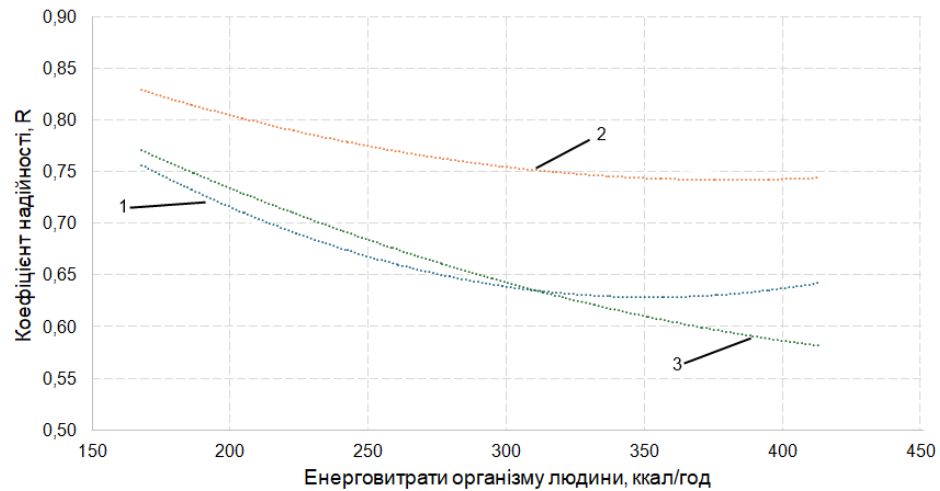


Рис. 3.3. Залежність між енергетичними витратами організму користувача та показником надійності при використанні засобів захисту:

1 – фільтрувальна півмаска «Мікрон» FFP2; 2 – півмаска з фільтрами Dnipro-M RS-2; 3 – повнолицьова маска 3M серії 6000

Натомість півмаски виявилися стабільнішими, зокрема модель Dnipro-M RS-2 продемонструвала найвищу стійкість, зберігши показники в межах 0,76-0,79 навіть при середній швидкості руху. Проміжну ефективність виявила фільтрувальна півмаска «Мікрон» FFP2, де надійність знизилася з 0,75 до 0,65.

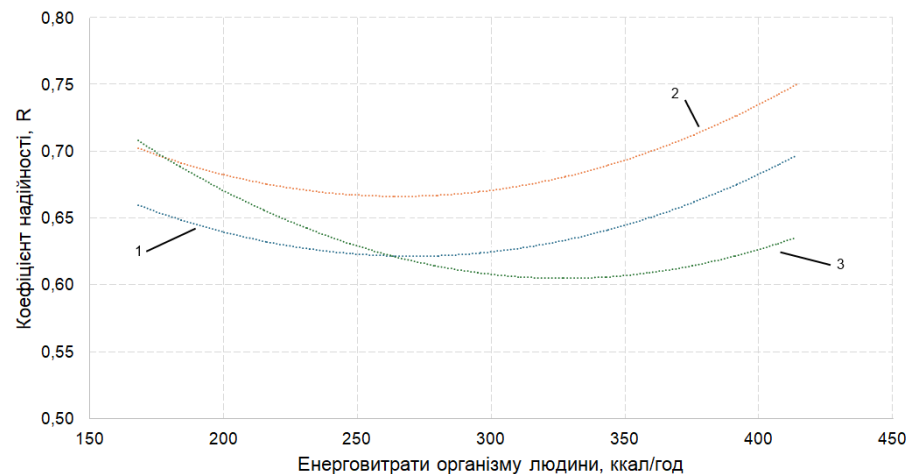


Рис. 3.4. Залежність енергозатрат організму користувача та коефіцієнту надійності при промовлянні:

1 – фільтрувальна півмаска «Мікрон» FFP2; 2 – півмаска з фільтрами Dnipro-M RS-2; 3 – повнолицьова маска 3M серії 6000

Встановлено, що при поєднанні руху та мовлення загальна тенденція до зниження коефіцієнту надійності зберігається. Та варто зазначити, що вплив

промовляння посилює втрату надійності. Для фільтрувальних півмасок цей вплив є менш критичним: при швидкості 8 км/год рівень надійності стабілізується на позначці 0,70. Найкращу адаптивність до комбінованих навантажень продемонстрували півмаски, де коефіцієнт залишався в межах 0,74-0,78. Це свідчить про добру пристосованість до навантаження та додаткових дій. Найбільш виражене зниження коефіцієнта характерне для повнолицьових масок – від 0,71 у стані спокою до 0,61-0,64 при швидкості понад 3 км/год.

Наступним етапом дослідження стало визначення комфортності респіраторів, що базувалася на суб'єктивних відчуттях випробувачів (результати представлено в табл. 3.10-3.12) [8].

Таблиця 3.10

Оцінка комфортності фільтрувальних півмасок «Мікрон» FFP2

Дії випробувача	Показник, що оцінювався					
	ОД	ТП	ВП	ОР	ЗС	середнє за дією
сидячи	4	4	5	5	5	4,6 ± 0,3
2 км/год*	4	4	4	5	5	4,4 ± 0,3
3 км/год*	4	4	4	5	4	4,2 ± 0,2
4 км/год*	4	3	3	5	4	3,8 ± 0,7
5 км/год*	3	3	3	5	4	3,6 ± 0,8
6 км/год*	3	3	3	4	3	3,2 ± 0,2
8 км/год*	2	3	3	4	3	3,0 ± 0,5
Середнє за показником	3,4±0,62	3,4±0,29	3,6±0,62	4,7±0,24	4,0±0,67	-

Примітка: * – ходіння по біговій доріжці з заданою швидкістю; ВП – вологість в підмасковому просторі; ЗС – загальне ставлення; ОД – опір диханню; ОР – обмеження рухів головою; ТП – температура в підмасковому просторі.

Таблиця 3.11

Оцінка комфортності півмасок з фільтрами Dnipro-M RS-2

Дії випробувача	Показник, що оцінювався					
	ОД	ТП	ВП	ОР	ЗС	середнє за дією
сидячи	5	5	5	4	5	4,8 ± 0,2
2 км/год*	5	5	5	4	5	4,8 ± 0,2
3 км/год*	5	5	4	4	5	4,6 ± 0,3
4 км/год*	4	4	4	4	5	4,2 ± 0,2
5 км/год*	4	4	4	4	4	4,0 ± 0,0
6 км/год*	4	4	4	4	4	4,0 ± 0,0
8 км/год*	3	4	4	4	4	3,8 ± 0,2
Середнє за показником	4,3 ± 0,6	4,4 ± 0,3	4,3 ± 0,2	4,0 ± 0,0	4,6 ± 0,3	-

Примітка: * – ходіння по біговій доріжці з заданою швидкістю; ВП – вологість в підмасковому просторі; ЗС – загальне ставлення; ОД – опір диханню; ОР – обмеження рухів головою; ТП – температура в підмасковому просторі.

Таблиця 3.12

Оцінка комфортності повнолицьових масок 3М серії 6000

Дії випробувача	Показник, що оцінювався					
	ОД	ТП	ВП	ОР	ЗС	середнє за дією
сидячи	4	4	5	4	4	$4,2 \pm 0,2$
2 км/год*	4	4	4	4	4	$4,0 \pm 0,0$
3 км/год*	3	4	3	4	3	$3,4 \pm 0,3$
4 км/год*	3	3	3	4	3	$3,2 \pm 0,2$
5 км/год*	3	3	3	4	3	$3,2 \pm 0,2$
6 км/год*	2	3	2	4	3	$2,8 \pm 0,7$
8 км/год*	2	3	2	4	3	$2,8 \pm 0,7$
Середнє за показником	$3,0 \pm 0,7$	$3,4 \pm 0,3$	$3,0 \pm 1,1$	$4,0 \pm 0,0$	$3,3 \pm 0,2$	-

Примітка: * – ходіння по біговій доріжці з заданою швидкістю; ВП – вологість в підмасковому просторі; ЗС – загальне ставлення; ОД – опір диханню; ОР – обмеження рухів головою; ТП – температура в підмасковому просторі.

Одержані експериментальні результати узгоджуються з даними інших досліджень [16], у яких встановлено, що підвищення температури та вологості у підмасковому просторі респіратора негативно впливає на рівень ергономічного комфорту, фізіологічний стан та працездатність працівника. Це підтверджує доцільність урахування параметрів мікроклімату під час оцінювання функціональної надійності людини при експлуатації ЗІЗОД.

У ході експерименту було зафіксовано динаміку температури, відносної вологості повітря та показників серцево-судинної системи (пульс) під час експлуатації різних моделей респіраторів. Встановлено, що тривале використання ЗІЗОД призводить до зростання температури на 2-3 °С та підвищення відносної вологості на 5-15 %, залежно від конструктивних особливостей респіатора. Паралельно спостерігалось зростання ЧСС (пульсу) у діапазоні 10-20 уд./хв. Подібна інтенсифікація фізіологічного навантаження призводить до втоми, зниження концентрації уваги та погіршення моторних реакцій, що сукупно підвищує ймовірність помилкових дій під час виконання робіт.

Запропонована модель кількісної оцінки функціональної надійності працівника дозволяє об'єктивно визначати вплив параметрів мікроклімату підмаскового простору на ефективність професійної діяльності. Результати

експерименту підтвердили, що ЗІЗОД можуть виступати джерелом додаткового психофізіологічного навантаження, яке впливає на ергономічний комфорт та функціональну надійність працівника під час виконання робіт.

Результати порівняння різних конструкцій ЗІЗ показало суттєві відмінності їхніх експлуатаційних показників. Фільтрувальні півмаски («Мікрон» FFP2) характеризуються помірною динамікою зростання термовологісних параметрів у підмасковому просторі. Проте встановлено інверсійну залежність між тривалістю (або інтенсивністю) робіт та їхньою функціональною ефективністю, що обмежує їх застосування в умовах високих фізичних навантажень. Півмаски зі змінними фільтрами (Dnipro-M RS-2) продемонстрували оптимальні ергономічні характеристики. Завдяки ефективній системі вентиляції забезпечується стабільність показників функціональної надійності працівника, зокрема за необхідності інтенсивної мовленнєвої комунікації. Повнолицеві маски (ЗМ серії 6000), навпаки, створювали найвище теплове та фізіологічне навантаження. Попри найвищий коефіцієнт захисту, їх експлуатація в динамічних режимах призводить до суттєвого зниження показника надійності. Відповідно, використання повнолицевих моделей є доцільним виключно для статичних операцій у середовищах із критичним рівнем аерозольного або газового забруднення.

На основі проведеного аналізу сформовано алгоритм раціонального вибору засобів захисту (рис. 3.5) залежно від інтенсивності праці та рівня професійного ризику:

- для виконання короткострокових допоміжних або оглядових операцій з мінімальним фізичним навантаженням доцільним є використання фільтрувальних півмасок («Мікрон» FFP2). Вони забезпечують достатній рівень ергономічності за умови відсутності значного накопичення вологи.
- для робіт, що характеризуються помірною фізичною активністю та потребують постійної мовленнєвої комунікації, оптимальним рішенням є півмаски зі змінними фільтрами (Dnipro-M RS-2). Дана конструкція забезпечує

стабільність показників функціональної надійності людини завдяки збалансованій вентиляції підмаскового простору.

- у середовищах із критичними концентраціями шкідливих речовин пріоритетним є використання повнолицьових масок (3М серії 6000). З огляду на суттєве термічне та фізіологічне навантаження, експлуатація таких засобів має супроводжуватися суворим регламентуванням часу безперервної роботи та впровадженням обов'язкових перерв для психофізіологічної реабілітації персоналу.

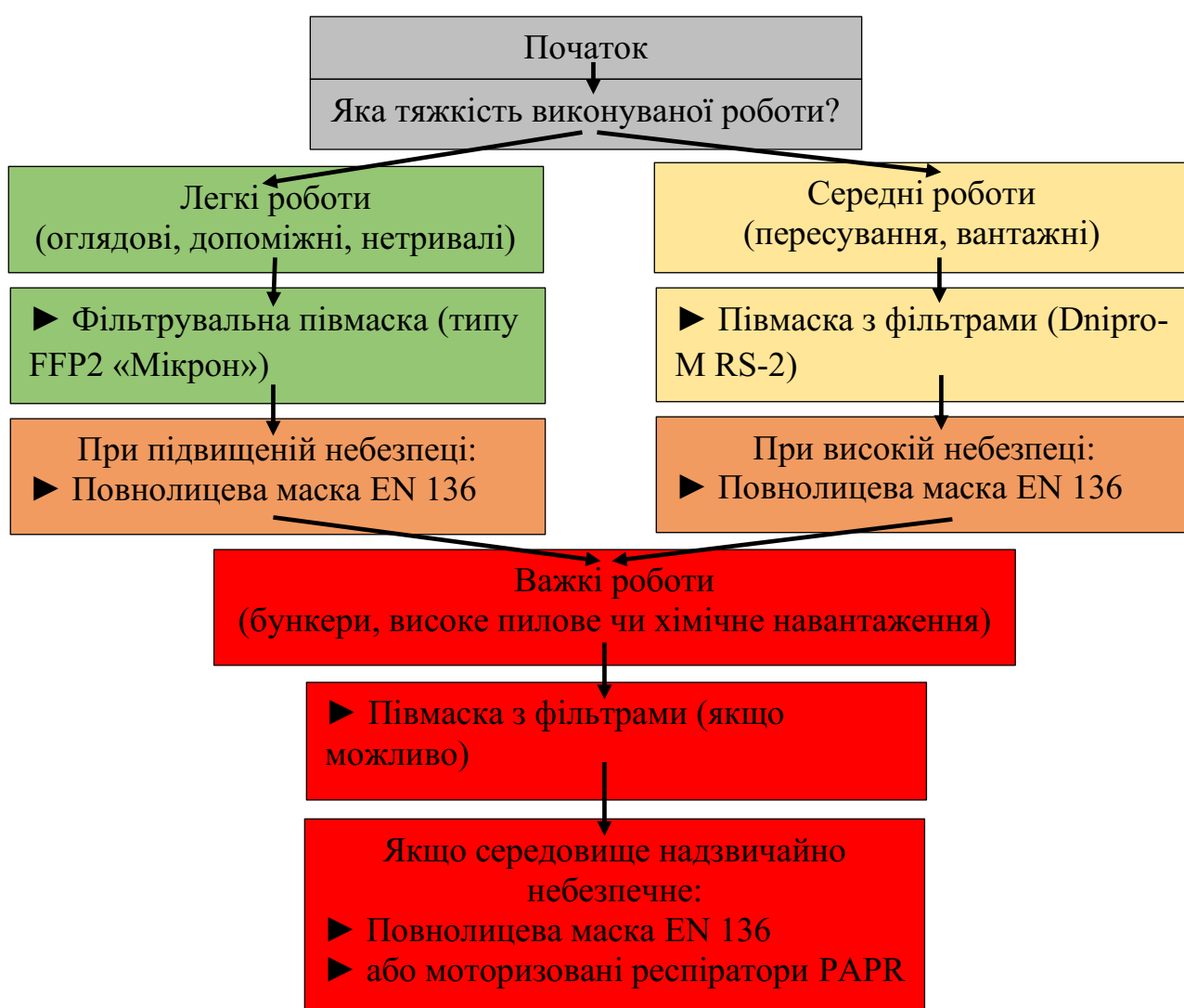


Рис. 3.5. Алгоритм вибору респіратора залежно від тяжкості роботи та рівня небезпеки

Джерело: розроблено автором

Попри вагомості отриманих результатів, робота має певні обмеження, зумовлені лабораторним характером експериментів. Зокрема, подальшого вивчення потребує динаміка герметичності прилягання ЗІЗОД під час мовленнєвої активності, а також врахування антропометричних відмінностей (форма обличчя) та індивідуальної фізіологічної реактивності користувачів.

Окремим вектором досліджень має стати часовий чинник, оскільки ефект накопичення дискомфорту при тривалій експлуатації засобів захисту залишається недостатньо висвітленим у реальних виробничих умовах.

Ключова відмінність даного дослідження від раніше застосовуваних методів тим, що поєднано оцінку мікроклімату підмаскового простору з фізіологічними показниками працівника (пульс) під час різних режимів роботи, що дозволяє комплексно оцінювати вплив ЗІЗОД на функціональний стан працівника. Проведено комплексне порівняння трьох класів ЗІЗОД (згідно зі стандартами фільтрувальна півмаска EN 149, півмаска з фільтрами EN 140, повнолицева маска EN 136) саме з точки зору комфортності, а не лише рівня захисту. На основі результатів запропоновано алгоритм вибору респіратора залежно від тяжкості роботи та рівня небезпеки середовища, що дозволяє перейти від універсальних рекомендацій до більш індивідуалізованого підходу. Робота створює нову базу для кількісної оцінки впливу ЗІЗОД на надійність дій людини, що до цього розглядалося лише частково в окремих міжнародних дослідженнях.

Дослідження має велике практичне значення та перспективи для майбутніх досліджень. Результати дають можливість регламентувати тривалість носіння різних респіраторів залежно від умов роботи, щоб мінімізувати перевтому та тепловий стрес. Підприємства отримують практичні критерії для вибору ЗІЗОД: з урахуванням інтенсивності виконуваної роботи. Отримані результати створюють підґрунтя для подальших досліджень у напрямку оцінки динаміки герметичності при промовлянні, розробки нових конструкцій ЗІЗОД із покращеною вентиляцією

та впровадження методів Human Reliability Analysis у комплексний підхід до охорони праці.

Отримані результати підтверджують, що надійність людини під час використання ЗІЗОД є динамічним параметром, який залежить не лише від технічних характеристик респіратора, а й від фізіологічного стану працівника, інтенсивності фізичного навантаження, умов виробничого середовища та ергономічних властивостей засобу захисту. Встановлено, що погіршення мікроклімату підмаскового простору, підвищення опору диханню та накопичення втоми безпосередньо впливають на надійність дій працівника та імовірність виникнення помилкових дій під час виконання робіт.

Таким чином, людський фактор повинен розглядатися як одна з ключових складових інтегральної оцінки професійних ризиків при виборі та експлуатації ЗІЗОД. Отримані експериментальні залежності створюють підґрунтя для подальшого поєднання технічних, фізіологічних та організаційних параметрів у єдиній інтегральній моделі ризику, що розробляється у наступних підрозділах дисертаційної роботи.

А отже, у дослідженні запропоновано методику кількісного оцінювання надійності людини під час експлуатації ЗІЗОД, розроблену на основі адаптованого методу SPAR-H. Експериментально доведено, що погіршення мікроклімату в підмасковому просторі (зростання температури на 2-3°C та вологості на 5-15%) корелює з підвищенням фізіологічного навантаження (збільшення пульсу на 10-20 уд./хв). Зафіксовано, що за інтенсивних фізичних навантажень коефіцієнт надійності повнолицьових масок деградує до рівня 0,56-0,65, тоді як напівмаски демонструють вищу стабільність (0,74-0,79). Розроблений алгоритм вибору засобів захисту дозволяє диференціювати їх за ступенем важкості праці: від легких короткострокових завдань (фільтрувальні напівмаски) до небезпечних статичних робіт (повнолицьові маски). Це створює наукове підґрунтя для оптимізації часових регламентів носіння ЗІЗОД з метою мінімізації ризиків виникнення помилок.

Особливо важливим для теми дисертаційної роботи є встановлення кількісного взаємозв'язку між ергономічними характеристиками ЗІЗОД, фізіологічним навантаженням працівника та рівнем функціональної надійності людини. Отримані результати створюють підґрунтя для подальшого формування інтегральної моделі оцінки професійних ризиків при виборі та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання.

3.2. Удосконалення методики ідентифікації та оцінювання експлуатаційних ризиків ЗІЗОД на основі інтеграції методів HAZOP і FMEA

Аналіз теоретичних основ і нормативно-методичної бази (розділи 1 та 2) показав, що більшість нормативних документів та практичних методик оцінки ризиків при роботі з ЗІЗОД зосереджені переважно на стадії вибору та сертифікації засобів захисту. Водночас ризики, що виникають саме під час експлуатації (зношення обтюратора, ослаблення ремінців, забивання фільтрів, порушення герметичності, тепловий стрес тощо), залишаються практично нерегульованими. Це створює суттєву прогалину в системі управління професійними ризиками. Для заповнення цієї прогалини в дисертаційному дослідженні запропоновано удосконалену методику ідентифікації невідповідностей та оцінки експлуатаційних ризиків ЗІЗОД, яка ґрунтується на раціональному поєднанні двох взаємодоповнюючих методів – HAZOP (Hazard and Operability Study) та FMEA (Failure Mode and Effects Analysis). Вибір цих методів зумовлений тим, що вони поєднують один з одним, та здатні забезпечити глибоку деталізацію кожного етапу експлуатації для ідентифікації потенційних загроз і оцінки працездатності системи загалом. Процес аналізу здійснювався за участю спеціально сформованої експертної групи. Метод HAZOP використовується для якісної ідентифікації невідповідностей та дефектів на етапах експлуатації респіратору за допомогою ключових слів («немає», «більше», «менше», «інше» тощо). Метод FMEA застосовується для

кількісної оцінки ризику шляхом розрахунку пріоритетного числа ризику (RPN).

Запропонована методика оцінювання експлуатаційних ризиків ЗІЗОД складається з чотирьох послідовних кроків [17]:

1 крок – Ідентифікація невідповідностей чи дефектів за допомогою HAZOP;

2 крок – Визначення величини експлуатаційного ризику;

3 крок – Оцінювання пріоритетного числа ризику (RPN);

4 крок – Обґрунтування та впровадження запобіжних заходів.

Пріоритетне число ризику розраховується за класичною формулою FMEA [18]:

$$RPN=S \times O \times D, \quad (3.8)$$

де S – серйозність наслідків відмови;

O – частота (ймовірність) появи відмови;

D – ймовірність виявлення відмови.

Оцінювання параметрів S, O та D здійснюється за десятибальною шкалою (1-10).

Застосування поєднання методів HAZOP і FMEA дозволило здійснити системний аналіз ключових ризиків, що виникають під час експлуатації ЗІЗОД. Класифікація цих ризиків за їхнім типом та походженням ґрунтується на положеннях Європейської комісії, викладених у «Комюніке 89/С 328/02» (Official Journal of the European Communities No. С 328). Зокрема, перелік специфічних ризиків, характерних для засобів захисту органів дихання, систематизовано та представлено у табл. 3.13.

Особливістю експлуатаційних ризиків ЗІЗОД є їх динамічний характер, оскільки рівень небезпеки може суттєво змінюватися залежно від умов виробничого середовища, фізичного навантаження працівника, тривалості використання респіратора та технічного стану його окремих елементів. Це обумовлює необхідність постійного моніторингу ризиків і періодичного перегляду результатів оцінювання.

Таблиця 3.13

Ідентифікація та систематизація експлуатаційних невідповідностей ЗІЗОД

Невідповідність (дефект) під час експлуатації респіратору	
найменування	наслідки
1. Респіратор використовується ненавченими поводженню з ним (пристосування, експлуатація і/або зберігання) користувачами	Не забезпечується нормативний захист
2. При використанні респіратору не враховано умови його експлуатації:	
- можливість механічного пошкодження і потрапляння води на фільтрувальну маску;	Не забезпечується нормативний захист
- збільшення навантаження та рухливості користувача;	Зростання опору диханню, пітіння обличчя
- необхідність спілкування під час виконання роботи;	Не забезпечується нормативний захист
- використання респіратора несумісного з іншим ЗІЗ;	Не забезпечується нормативний захист
- надпланове носіння респіратора	Зростання опору диханню; забруднення внутрішньої поверхні маски

Джерела: розроблено автором на основі аналізу літературних джерел, нормативних вимог та результатів застосування методів HAZOP і FMEA для оцінювання експлуатаційних ризиків ЗІЗОД.

У межах дослідження запропоновано підхід до аналізу безпеки через застосування моделі «краватка-метелик» (Bow-Tie Analysis) (рис. 3.6), яка дозволяє систематизувати невідповідності, визначити критичність їхніх наслідків та встановити ефективні захисні бар'єри залежно від умов експлуатації продукції.



Рис. 3.6. Модель розгортання небезпечної події від джерела загрози до критичного наслідку на підставі моделі «краватка-метелик» [17]

Перевагою моделі «краватка-метелик» є можливість наочної демонстрації того, як саме превентивні заходи блокують розвиток небезпечної ситуації.

Представлена модель встановлює логічний зв'язок між експлуатаційними невідповідностями ЗІЗОД та критичною подією – зниження захисних властивостей, що призводить до розвитку професійних захворювань пилової етіології (зокрема пневмоконіозів) в умовах підвищеної запиленості. Попри фокус на пиловому факторі, модель є універсальною. Її адаптація дозволяє аналізувати ризики гострих або хронічних отруєнь шкідливими газами при застосуванні протигазових фільтрувальних засобів.

Ця модель є ідеальною для розробленого Положення «Про ідентифікацію невідповідностей та розрахунок пріоритетного числа ризику засобів індивідуального захисту працівників» (Положення) (додаток А), оскільки вона об'єднує попередні методи аналізу. Лівою частиною є Причини. Сюди інтегруються результати аналізу HAZOP (наприклад, «опір диханню вище норми», «неправильне припасування»). Центр – Критична подія, для якої розраховується RPN. Правою частиною є Наслідки. Це можуть бути фізіологічні дані – зростання пульсу, зниження концентрації, тривожність тощо. Бар'єри – Запобіжні заходи. Це і є алгоритм вибору та заходи, прописані в Положенні (додаток А), які розкривають шлях від причини до нещасного випадку. Воно було розроблено та затверджено для практичної реалізації розробленої методики та для систематизації процесу виявлення відмов та їх кількісного оцінювання.

Практичне застосування розробленого Положення передбачає його використання фахівцем служби охорони праці підприємства або іншою уповноваженою особою, відповідальною за організацію ризик-орієнтованого вибору та експлуатації ЗІЗОД. Оцінювання здійснюється експертною групою із залученням керівників структурних підрозділів, представників служби охорони праці та, за необхідності, технічних спеціалістів. Значення показників

S (серйозність наслідків), O (ймовірність виникнення) та D (ймовірність виявлення) визначаються відповідно до критеріїв, наведених у Положенні, на підставі аналізу умов праці, технічної документації, результатів оглядів, аудитів, виробничого досвіду та статистики експлуатації ЗІЗОД. Отримані результати використовуються для розрахунку пріоритетного числа ризику (RPN), прийняття рішень щодо необхідності впровадження коригувальних заходів, вибору відповідного типу ЗІЗОД або перегляду умов його експлуатації.

Для визначення показника надійності людини відповідальна особа проводить або організовує вимірювання температури та відносної вологості підмаскового простору, а також частоти серцевих скорочень працівника, після чого за запропонованими у підрозділі 3.1 залежностями розраховує показник надійності людини, який у подальшому використовується під час інтегрального оцінювання професійного ризику.

Методика оцінювання експлуатаційних ризиків згідно з цією моделлю реалізується поетапно. На першому етапі здійснюється ідентифікація невідповідностей та чинників, що детермінують ймовірність виникнення небезпечної події або посилюють тяжкість її наслідків. Для цього етапу застосовується метод HAZOP. Через систему керівних слів верифікуються потенційні відмови у процедурах експлуатації. Практичну реалізацію цього підходу продемонстровано на фрагменті аналізу ризиків для вугільних шахт (табл. 3.14).

Другий етап передбачає безпосереднє обчислення величини експлуатаційного ризику як добутку ймовірності виникнення небезпечної події та тяжкості її наслідків. Враховуючи статус ЗІЗОД як останнього бар'єра захисту між джерелом небезпеки та організмом працівника, критично важливим є не лише оцінювання ризику, а й верифікація можливості своєчасного виявлення дефектів або невідповідностей у процесі експлуатації. З огляду на це, для реалізації даного етапу доцільно застосовувати метод FMEA з розрахунком RPN (табл. 3.15).

Таблиця 3.14

**Результати ідентифікації відхилень у параметрах функціонування
ЗІЗОД із застосуванням методу HAZOP (фрагмент)**

Керуюче слово	Відхилення	Причини невідповідності чи дефекту	Наслідки	Заходи усунення несправності
Менше	Коефіцієнт захисту	1. Невідповідність виробу до обличчя 2. Неякісний фільтр 3. Використання фільтру більше терміну служби 4. Використання невідповідних типу та марки фільтра 5. Несвоєчасне і неправильне використання виробу 6. Експлуатація пошкоджених фільтрів виробу	Погіршення самопочуття, зменшення працездатності працівників, розвиток професійних захворювань дихальних шляхів, за рахунок не ефективного респіраторного захисту	1. Впровадження інструментальних методів перевірки відповідності виробу до обличчя користувача 2. Використання фільтрів з сертифікатом відповідності, доброчесних постачальників і виробників з впровадженою системою якості 3. Визначення терміну служби фільтрів з урахуванням умов праці 4. Перевірка маркування фільтрів і визначення для якого типу аерозолів він призначений
Більше	Опір диханню	1. Використання невідповідної марки фільтра умовам праці 2. Значний темп роботи 3. Використання фільтру більше терміну служби 4. Значна вологість повітря 5. Експлуатація фільтра при підвищеній температурі 6. Потрапляння вологи з підмаскового простору на фільтр	Погіршення самопочуття, зменшення працездатності працівників	1. Визначення терміну служби фільтрів з урахуванням умов праці 2. Використання фільтрів з індикаторами часу захисної дії або розрахованими за алгоритмом запропонованим виробником 3. Несправність клапану вдиху, що потребує його заміни

Джерела: сформовано автором на основі адаптації методу HAZOP до задач оцінювання експлуатаційних ризиків ЗІЗОД.

Разом з тим, пріоритетне число ризику RPN не може повністю характеризувати загальний професійний ризик при експлуатації ЗІЗОД, оскільки не враховує фізіологічний стан працівника, рівень психофізіологічного навантаження, ергономічний комфорт та економічні наслідки можливих відмов.

Таблиця 3.15

**Результати розрахунку RPN у процесі експлуатації засобів
індивідуального захисту органів дихання**

Тип	Опис можливої невідпо- відності, дефекту	Опис можливої причини	Опис наслідків	Розрахунок числа пріоритетності ризиків				Запобіжні заходи
				S	O	D	RPN/ ПЧР	
Фільтрувальна півмаска для захисту органів дихання від аерозолів	Невідпо- відність виробу до обличчя	Відсутність інструментальної перевірки відповідності антропометричним даним користувача півмаски перед початком експлуатації, одним із придатних методів	Зменшення коефіцієнту захисту. Відсутність герметичнос- ті за смугою обтюрації	4	6	5	120	Забезпечити регулярні перевірки якості окремих показників ЗІЗОД. Провести навчання персоналу стосовно підгонки і перевірки герметичності
	Неякісний фільтр	Відсутність попередньої перевірки фільтрів перед початком їх експлуатації. Невідповідне зберігання фільтрів. Невідповідне їх транспортування. Невідповідне чи відсуне обслуговування при експлуатації	Відсутній рівень захисту працівника при експлуатації ЗІЗОД	8	2	3	48	Забезпечити перевірку захисних властивостей ЗІЗОД щодо сумісності з іншими ЗІЗ. Збільшити перерви при виконанні робіт у ЗІЗОД
	Викорис- тання фільтру більше терміну служби	Відсутність графіків заміни фільтрів. Відсутність усвідомлення працівників важливості захисту органів дихання за рахунок респіраторів	Втрата захисної ефективності і ЗІЗОД. Збільшення опору дихання. Дискомфорт	10	7	5	350	Провести навчання персоналу стосовно підгонки і перевірки герметичності. Розробити графіки заміни фільтрів.

Продовж. табл. 3.15

Тип	Опис можливої невідпо- відності, дефекту	Опис можливої причини	Опис наслідків	Розрахунок числа пріоритетності ризиків				Запобіжні заходи
				S	O	D	RPN/ ПЧР	
Фільтрувальна піvmаска для захисту органів дихання від аерозолів	Викорис- тання невідпо- відних типу та марки фільтрів	Відсутність попереднього санітарно- гігієнічного аналізу умов праці та оцінювання ризику розвитку професійних хвороби пов'язаних з наявністю значного запилення на робочому місці. Неврахування умов експлуатації при визначенні типу фільтрів	Відсутній рівень захисту працівника при експлуатації ЗІЗОД	10	7	1	70	Впровадити програму респіраторного захисту з елементами контролю якості респіраторів що постачаються, експлуатуютьс я та зберігаються
	Несвое- часне і непра- вильне викорис- тання виробу	Відсутність графіків заміни фільтрів. Відсутність програм для розрахунку захисної ефективності, відсутність	Втрата захисної ефективност і ЗІЗОД. Збільшення опору дихання. Дискомфорт	5	3	6	90	Провести навчання персоналу стосовно підгонки і перевірки герметичності. Розробити графіки заміни фільтрів
	Експлуа- тація пошкод- женого ЗІЗОД	Відсутність відповідного обслуговування ЗІЗОД після їх експлуатації, а також інструментарію з перевірки ефективності на робочому місці	Втрата захисної ефективност і ЗІЗОД. Збільшення опору дихання. Дискомфорт	10	7	4	280	Організувати регулярну перевірку експлуатаційни х властивостей ЗІЗОД, пошук неполадок і заміну пошкоджених вузлів

Джерело: розроблено автором на основі результатів оцінювання експлуатаційних ризиків ЗІЗОД із використанням методів HAZOP, FMEA та розрахунку пріоритетного числа ризику (RPN) [17]

У зв'язку з цим результати оцінювання методом HAZOP та FMEA доцільно розглядати як одну зі складових інтегральної системи оцінки професійних ризиків, що формується у даній дисертаційній роботі.

Як демонструють дані табл. 3.15, розрахункова частина базується на результатах попереднього якісного аналізу (табл. 3.14), що дозволяє трансформувати виявлені дефекти у конкретні числові показники критичності.

Аналіз результатів, наведених у табл. 3.14 та 3.15, підтверджує доцільність комплексного використання обраних методик. Завдяки застосуванню FMEA стає можливим глибше дослідження механізмів ідентифікації прихованих дефектів. Це, у свою чергу, дозволяє деталізувати рекомендації щодо мінімізації ризиків, фокусуючись на недопущенні зниження функціональних показників засобів захисту в процесі їх безпосереднього використання.

Параметр виявлення часто є критичним для ЗІЗОД, оскільки працівник може не відчувати відразу, що фільтр пошкоджено або маска прилягає негерметично. Саме дефекти отримали найвищий бал RPN, оскільки саме вони стануть підставою для алгоритму вибору ЗІЗОД.

На третьому етапі здійснюється аналіз розрахованого пріоритетного числа ризику з гранично допустимим значенням (140 балів). У разі виявлення надмірного ризику процедура повертається до початкової ідентифікації чинників для корекції запобіжних дій. Граничне значення 140 балів обрано як інтегральний показник чутливості системи «людина-ЗІЗОД». Це значення дозволяє ідентифікувати ризики, які при окремих «середніх» показниках ймовірності та виявлення дають критично високий сумарний ризик для здоров'я працівника. У межах розробленого Положення (додаток А), перевищення цього порогу є юридичною та технічною підставою для перегляду вибору типу респіратора або режиму праці. Отже, це критерій якості. Вибір порогового значення $RPN > 140$ обумовлений необхідністю врахування не лише технічної відмови елементів ЗІЗОД, але й можливих наслідків для фізіологічного стану працівника в умовах тривалої експлуатації респіратора. За таких умов навіть помірні значення окремих параметрів S, O та D у сукупності можуть формувати критичний рівень професійного ризику.

Все, що вище цього значення, змушує алгоритм шукати інше рішення, щоб знизити ризик на графіку моделі Bow-tie.

Четвертий етап присвячений фіксації результатів у технічній документації та перевірки достовірності обчислень. Підсумковий звіт містить перелік критичних відхилень, що потребують особливої уваги. Формат документування таких ризиків наведено у табл. 3.16. Це і є практичний вихід Положення (додаток А).

Таблиця 3.16

Результати оцінювання експлуатаційного ризику ЗІЗОД [16]

Невідповідність/ дефект/ небезпека	Рівень ризику	Запобіжний чи захисний захід/засіб
1. Дискомфортні відчуття	неприйнятний	Впровадження інструментальних методів перевірки відповідності виробу до обличчя користувача
2. Відсутність герметичності	неприйнятний	Впровадження інструментальних методів перевірки відповідності виробу до обличчя користувача
3. Перевищення терміну захисної дії	неприйнятний	Проведення навчання персоналу стосовно підгонки і перевірки герметичності. Розробка графіків заміни фільтрів
4. Механічні пошкодження	неприйнятний	Організація регулярної перевірки експлуатаційних властивостей ЗІЗОД, пошук неполадок і заміну пошкоджених вузлів

Табл. 3.16 становиться основою для фінального алгоритму вибору респіратора.

Ключовою особливістю запропонованого методу оцінювання експлуатаційних ризиків є застосування показника RPN, який інтегрує в себе здатність до ідентифікації невідповідностей або дефектів безпосередньо в процесі використання ЗІЗОД. Системний збір інформації про ризики вимагає ретельного аналізу конструктивної цілісності ЗІЗОД та специфіки прояву відмов у елементах конструкції [19]. Застосування алгоритму визначення пріоритетного ризику дозволяє об'єктивізувати оцінку впливу кожного конструктивного елемента, забезпечуючи комплексність аналізу. Тобто, виділено роль конструктивних вузлів, що дуже важливо, оскільки аналізується температура, вологість та герметичність (підмасковий простір як система).

Поєднання цих методологій створює підґрунтя для отримання надійних результатів через детальне вивчення взаємозалежностей у системах ЗІЗОД [20].

Встановлення RPN є критично важливим через різноманітність небезпечних ситуацій та мінливість умов на робочих місцях [21]. Відмова від універсальних шаблонів на користь диференційованого підходу дозволяє розробляти ефективні заходи захисту, що враховують специфічні загрози конкретних видів робіт [22].

Це інтегрується в модель «краватка-метелик». Ліва частина (HAZOP) ідентифікує унікальні небезпеки для різних галузей. Центр (FMEA/RPN) оцінює, наскільки прозорим є процес виявлення дефекту в конкретному вузлі ЗІЗОД. Права частина (Рішення) пропонує індивідуальні рішення замість універсальних, що й складає практичну цінність дисертаційної роботи. Такий підхід дозволяє об'єднати причинно-наслідкові зв'язки виникнення небезпек із кількісним оцінюванням їх критичності, що забезпечує більш повне управління експлуатаційними ризиками ЗІЗОД.

Отже, методи HAZOP та FMEA є інструментами аналізу, модель «краватка-метелик» – візуальна логіка, поріг 140 балів – це критерій якості, Положення – це документ, який робить використання цих інструментів обов'язковим і законним на підприємстві. Саме це Положення легітимізує використання обраного вами порогу ризику (140 балів).

Це внутрішній нормативний документ, розроблений в соавторстві автором дисертації і затверджений у НТУ «Дніпровська політехніка». Даний документ є нормативно-методичним розвитком теоретичних положень статті [17] і перетворює їх на чітку, документовану процедуру, придатну для безпосереднього впровадження в систему управління охороною праці підприємства. Він регламентує процедуру переходу від якісних результатів аналізу за методами HAZOP та FMEA до чисельних показників критичності. Документ формалізує поєднання HAZOP (для якісної ідентифікації) і FMEA (для кількісної оцінки) як обов'язкову процедуру. Положення має готові робочі інструменти (додатки):

- Додаток 1 – Матриця визначення рівня ризиків;

- Додаток 2 – Критерії оцінки рівня ризику (RPN>140 – неприйнятний ризик; 70-140 – прийнятний з перевіркою; <70 – прийнятний);
- Додаток 3 – Карта ідентифікації відмов та оцінки ризиків (з полями для відповідальних, термінів, заходів).

Це робить його готовим до безпосереднього впровадження на підприємстві.

Положення також встановлює чіткий алгоритм дій для експертної групи, усуваючи хаотичність при оцінюванні ЗІЗ, чіткий розподіл відповідальності керівників, представника з якості, начальників структурних підрозділів та рядових працівників, що підвищує виконавську дисципліну, а також визначає джерела інформації для розрахунку RPN (технічна документація, результати аудитів, рекламації, зміни в технологічному процесі тощо).

Документ визнає порядок періодичного аналізу актуальності ризиків. Обов'язковий щорічний перегляд має бути не рідше одного разу на рік, а саме до 20 січня поточного року, та позаплановий аналіз після будь-яких змін (технологія, конструкція ЗІЗ, умови праці, рекламації). Це забезпечує сталий розвиток системи ризик-менеджменту. При цьому експлуатаційний ризик ЗІЗОД не є сталою величиною та змінюється залежно від тривалості використання респіратора, фізичного навантаження працівника, параметрів мікроклімату та ступеня деградації конструктивних елементів. Саме тому система оцінювання ризиків повинна враховувати динамічний характер змін умов експлуатації. При цьому поступова деградація елементів конструкції респіратора може призводити до накопичення прихованих відмов, які не завжди своєчасно виявляються під час стандартного контролю ЗІЗОД.

Таким чином, оцінювання ризиків у запропонованому Положенні розглядається не як одноразова процедура, а як безперервний процес управління експлуатаційною надійністю ЗІЗОД, що враховує зміну умов праці, деградацію конструктивних елементів та накопичення фізіологічного навантаження на працівника.

Положення узгоджене з вимогами ISO 9001 та ISO 31000 і може бути інтегроване в діючу систему менеджменту підприємства.

Документ має математичне обґрунтування RPN, оскільки впровадження методики розрахунку RPN дозволяє ранжувати небезпеки, тобто дозволяє диференціювати виявлені невідповідності за ступенем їхнього впливу на захисну ефективність та працездатність користувача.

На відміну від традиційних підходів, це Положення інтегрує параметр «ймовірності виявлення» (D), що є критично важливим для ЗІЗОД, оскільки порушення герметичності підмаскового простору часто не фіксується працівником візуально або органолептично. Таким чином, документ забезпечує методологічну базу для формування переліку пріоритетних заходів щодо модернізації конструкції респіраторів або корегування режимів їхньої експлуатації.

Саме положення здійснює адаптацію FMEA під ЗІЗ. Стандартне FMEA застосовується до процесів чи обладнання. А у Положенні метод адаптовано виключно до засобів індивідуального захисту органів дихання (виробництво + експлуатація респіраторів). Положення адаптує FMEA до оцінювання експлуатаційних ризиків ЗІЗОД з урахуванням специфічних дефектів, що виникають під час тривалого використання респіраторів.

Завдяки бальній системі (зазвичай від 1 до 10) стає можливим порівнювати різні моделі респіраторів не за суб'єктивними вподобаннями, а за інтегральним показником безпеки.

Як вже зазначалось вище, Положення має чіткі кількісні критерії прийнятності ризику. Введено три рівні ризику з конкретними порогами RPN:

- RPN>140 – неприйнятний (негайні заходи);
- 70-140 – прийнятний з перевіркою;
- RPN<70 – прийнятний.

Тобто, встановлює межі, за яких експлуатація виробу вважається неприпустимою без впровадження коригувальних заходів. Такі чіткі пороги раніше не були закріплені в документах для ЗІЗ.

Запропоноване поєднання HAZOP та FMEA з розробленим «Положенням» дозволяє не тільки виявляти потенційні експлуатаційні дефекти (ослаблення ремінців, забивання фільтрів, порушення герметичності обтюратора, тепловий стрес тощо), але й кількісно оцінювати їх вплив на

захисну ефективність ЗІЗОД, а також обґрунтовувати конкретні запобіжні заходи. Це дає можливість перейти до активного управління ризиками протягом усього життєвого циклу респіратора.

Отже, наукова новизна розробленого Положення (додаток А) полягає в тому, що вперше створено спеціалізований внутрішній нормативний документ, який адаптує методи HAZOP та FMEA саме до сфери ЗІЗОД. На відміну від класичних підходів, запропонована методика враховує одночасний вплив технічних, експлуатаційних та людських факторів на формування професійного ризику. Особливістю запропонованого підходу є врахування впливу людського фактора на формування експлуатаційного ризику, оскільки неправильне одягання респіратора, послаблення ремінців або порушення правил експлуатації здатні суттєво змінювати фактичний рівень захисту навіть за високих технічних характеристик ЗІЗОД. Документ враховує не тільки виробничі дефекти, а й експлуатаційні невідповідності, що виникають під час тривалого використання ЗІЗОД у реальних виробничих умовах (ослаблення ремінців, порушення герметичності обтюратора, забивання фільтрів, тепловий стрес тощо).

Документ містить чіткі кількісні критерії прийнятності ризику за значенням RPN, обов'язкову матрицю ризиків, карту ідентифікації відмов з розподілом відповідальності та термінів, а також регламент обов'язкового щорічного перегляду ризиків.

Проведений аналіз показав, що класичні методи оцінювання ризиків не повною мірою враховують специфіку експлуатації ЗІЗОД, оскільки переважно орієнтовані на технічні системи та недостатньо враховують фізіологічний стан працівника і зміну параметрів респіратора в процесі використання.

Таким чином, Положення забезпечує замкнутий цикл управління експлуатаційними ризиками ЗІЗОД – від ідентифікації до контролю та постійного вдосконалення і є практичним інструментом впровадження інтегральної моделі оцінки професійних ризиків на підприємствах. Дослідження [17] дає науково-методичну основу, а Положення (додаток А) практичну реалізацію та нормативне оформлення методики. Це не просто опис методики, а повноцінний нормативний документ, який вперше створює

замкнуту систему управління експлуатаційними ризиками ЗІЗОД від ідентифікації до контролю та періодичного перегляду.

Особливо важливим для даної дисертаційної роботи є те, що запропоноване поєднання методів HAZOP та FMEA з розрахунком пріоритетного числа ризику дозволяє перейти від формального аналізу окремих дефектів ЗІЗОД до комплексного оцінювання експлуатаційних ризиків з урахуванням людського фактора, умов праці та можливих наслідків для здоров'я працівника. Це створює необхідне підґрунтя для подальшого формування інтегральної моделі професійного ризику.

Основними результатами, отриманими у підрозділі 3.2, є удосконалення методики ідентифікації та оцінювання експлуатаційних ризиків ЗІЗОД шляхом поєднання методів HAZOP і FMEA з розрахунком пріоритетного числа ризику RPN. Запропонований підхід дозволив систематизувати основні експлуатаційні невідповідності та дефекти респіраторів, визначити їх причини, можливі наслідки та пріоритетність заходів щодо зниження ризику. Обґрунтовано доцільність урахування можливості виявлення дефектів під час оцінювання експлуатаційної надійності ЗІЗОД. Отримані результати створюють підґрунтя для подальшого формування інтегральної моделі професійного ризику при виборі та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання.

3.3. Удосконалення конструктивних елементів фільтрувального респіратора для підвищення герметичності та експлуатаційної ефективності

3.3.1. Удосконалення конструкції обтюратора фільтрувального респіратора

Розроблені в попередніх підрозділах модель надійності людини (п. 3.1) та методика оцінки експлуатаційних ризиків за допомогою HAZOP та FMEA (п. 3.2) показали, що значна частина ризиків виникає через порушення

герметичності прилягання півмаски та деградацію системи кріплення. Тому одним із ключових напрямів удосконалення ЗІЗОД є покращення конструктивних елементів респіратора.

Порушення герметичності обтюратора виникає через невідповідність стандартної форми обтюратора індивідуальним антропометричним особливостям обличчя працівника. Навіть незначні зморшки або щілини вздовж лінії обтюраторії призводять до суттєвого підсосу забрудненого повітря, що безпосередньо підвищує професійний ризик розвитку захворювань органів дихання.

Аналіз літературних джерел підтверджує актуальність цієї проблеми. Більшість витоків (58-84 %) фіксується в зоні перенісся, а також біля щік і підборіддя [24,25]. Антропометричні особливості обличчя користувача значно впливають на ізоляційні властивості обтюратора [26,27]. Існуючі конструкції часто не забезпечують достатньої адаптації, що призводить до підвищення тиску на м'які тканини обличчя, появи дискомфорту та небажання постійно використовувати ЗІЗОД [28,29]. Дослідження також показують, що традиційні методи посилення обтюратора (носовий затискач, додаткові ущільнювачі) не завжди дають бажаний результат у реальних умовах експлуатації [30,31].

Для усунення витоків зазвичай збільшують силу натягу ременів головного кріплення. Однак підвищення сили натягу призводить до нерівномірного розподілу контактного тиску, виникнення дискомфортних відчуттів та підвищеного механічного навантаження на окремі ділянки обличчя користувача. Крім того, надмірний натяг ременів не завжди забезпечує необхідний рівень герметичності.

Об'єктом дослідження був фільтрувальний респіратор моделі «Шахтар», який використовується для захисту органів дихання працівників вугільної промисловості. Конструкція респіратора складається з еластомерної напівмаски, фільтрувальних елементів, стрічки обтюраторії та системи головного кріплення. Для підвищення ізоляційних властивостей респіратора було запропоновано удосконалення конструкції обтюратора шляхом

виконання локальної перфорації в окремих ділянках еластомерної напівмаски. Теоретичні та експериментальні основи даного удосконалення викладені в роботі [32]. Сутність запропонованого рішення полягає у створенні перфорованих зон в обтюраторі в місцях найбільшої варіабельності антропометричних параметрів обличчя – зоні перенісся, щік та підборіддя. Перфорація дозволить обтюратору динамічно адаптуватися до індивідуальних особливостей обличчя, зменшити утворення зморшок і підвищити ступінь прилягання без необхідності значного збільшення сили натягу ремінців та забезпечить більш рівномірний розподіл стискаючих сил уздовж лінії прилягання.

Для реалізації цього підходу були розроблені три конструктивні варіанти перфорованого обтюратора. Перший варіант передбачав виконання отворів по всьому периметру стрічки обтюраторії. Така конструкція забезпечувала значне підвищення гнучкості напівмаски та покращувала її здатність адаптуватися до форми обличчя користувача. Однак надмірне зниження жорсткості конструкції призводило до ризику деформації обтюратора під дією сили натягу ременів головного кріплення.

Другий варіант передбачав виконання перфорації лише в ділянках перенісся та щік. Саме ці зони характеризуються найбільшою ймовірністю утворення локальних щілин унаслідок невідповідності геометрії обтюратора антропометричним параметрам обличчя користувача. Локальне зменшення жорсткості в проблемних ділянках забезпечувало кращу адаптацію напівмаски без суттєвого погіршення механічної міцності конструкції.

Третій варіант передбачав виконання локальних вирізів діаметром 5 мм у ділянках перенісся та щік. На відміну від другого варіанта, у цьому випадку використовувались окремі вирізи більшого діаметра, що забезпечували локальну компенсацію деформацій у зонах найбільшої кривизни поверхні обличчя.

На рис. 3.7 представлено чотири варіанти конструкції обтюратора фільтрувального респіатора «Шахтар» за дослідженням [32], форма якого відповідає реальній моделі, що використовується в гірничій промисловості.

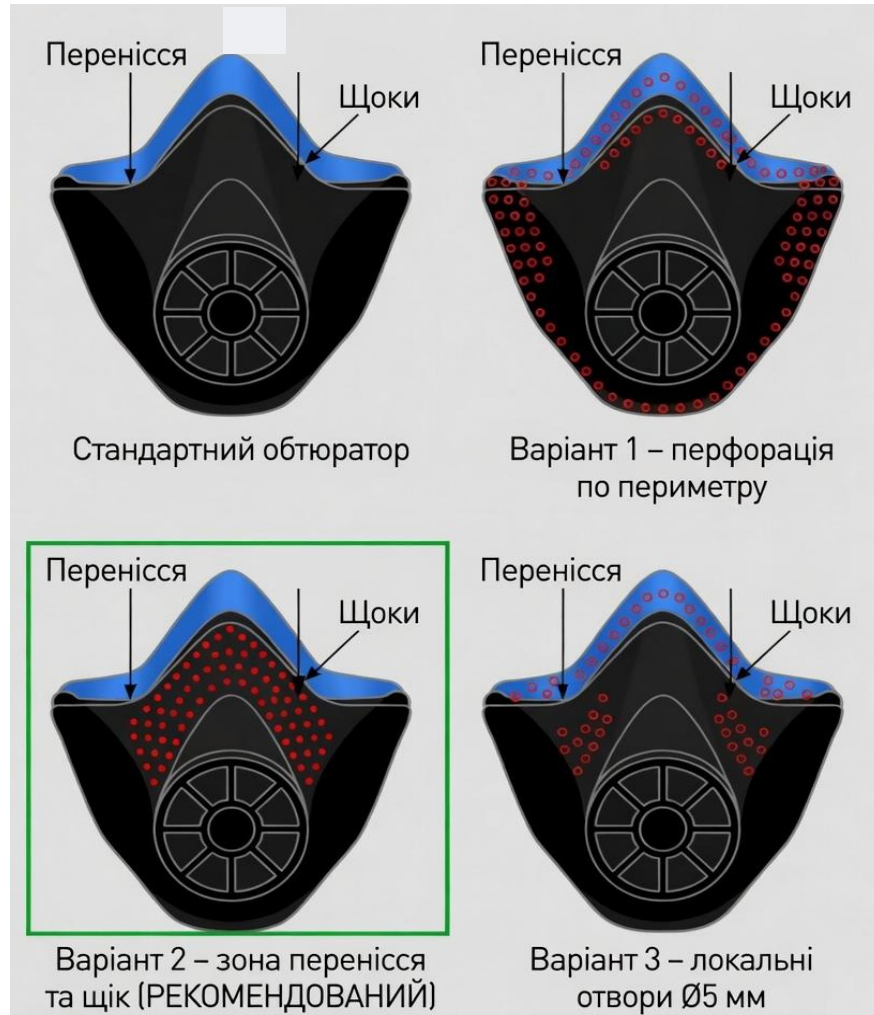


Рис. 3.7. Схеми трьох варіантів перфорації обтюратора фільтрувального респіатора «Шахтар»*:

Зліва – стандартний обтюратор без перфорації (як еталон)

Посередині – три варіанти перфорації поруч один з одним:

Варіант 1 – перфорація по всьому периметру обтюратора;

Варіант 2 – перфорація тільки в зоні перенісся та щік

(рекомендований);

Варіант 3 – локальні круглі отвори Ø5 мм в ключових зонах

Джерело: розроблено автором за [32]

* Стрілками на рисунку позначено основні ділянки перфорації («перенісся», «щоки»). Червоні точки ілюструють розміщення перфораційних отворів.

Для визначення найбільш ефективного конструктивного рішення провели математичне моделювання із використанням програмних пакетів «ANSYS» і «Solid works». За допомогою комп'ютерного моделювання оцінили розподіл стискаючих сил уздовж лінії обтюрації, деформацію напівмаски, розподіл контактного тиску та можливість утворення локальних зон підсмоктування повітря.

У процесі моделювання враховували геометричні параметри напівмаски, силу натягу ременів головного кріплення, антропометричні особливості обличчя користувача та параметри повітряного потоку через фільтрувальний матеріал і через щілини вздовж лінії прилягання обтюратора.

Результати моделювання показали, що в базовому варіанті респіратора без перфорації спостерігається нерівномірний розподіл стискаючих сил уздовж лінії обтюрації. Це пояснюється тим, що сили натягу ременів головного кріплення прикладаються нерівномірно відносно поверхні напівмаски. Унаслідок цього в окремих ділянках контактний тиск є недостатнім для забезпечення герметичності, тоді як в інших зонах виникає надмірний механічний тиск.

Найбільш проблемною є ротоназальна зона, де контактний тиск може бути меншим за 2 кПа. При цьому для запобігання проникненню аерозолі необхідно забезпечити тиск не менше 2,5 кПа. Недостатній тиск у цій зоні призводить до утворення локальних витоків нефільтрованого повітря.

Під час моделювання також встановлено, що збільшення розміру пластикової стрічки обтюрації спричиняє виникнення значного моменту сил відносно горизонтальної площини напівмаски. У результаті механічний тиск у ділянці підборіддя стає значно більшим, ніж у зоні перенісся, що ще більше посилює нерівномірність прилягання обтюратора до поверхні обличчя.

Використання локальної перфорації дозволило забезпечити більш рівномірний розподіл стискаючих сил та зменшити локальні деформації обтюратора. За рахунок цього покращувалась адаптація напівмаски до форми обличчя та зменшувалось утворення складок уздовж лінії прилягання.

Для систематизації результатів математичного моделювання та порівняльного оцінювання запропонованих конструктивних рішень було виконано узагальнений аналіз основних етапів дослідження. У процесі моделювання оцінювали розподіл контактного тиску вздовж лінії обтюрації, характер деформації напівмаски, аеродинамічні параметри руху повітря та коефіцієнт підсмоктування аерозолі для різних варіантів конструкції обтюратора. Основні результати математичного моделювання та оцінювання конструктивних варіантів респіратора наведено в табл. 3.17.

Таблиця 3.17

**Основні етапи математичного моделювання та результати
оцінювання конструктивних варіантів обтюратора респіратора**

Етап дослідження	Що досліджувалось	Метод / програмне забезпечення	Основні результати	Висновок
Аналіз базової конструкції респіратора	Розподіл контактного тиску вздовж лінії обтюрації	«ANSYS» і «Solid works»	Встановлено нерівномірний розподіл стискаючих сил; у зоні перенісся тиск був недостатнім для забезпечення герметичності	Виявлено необхідність удосконалення конструкції обтюратора
Моделювання варіанта 1	Перфорація по всьому периметру обтюратора	«ANSYS»	Підвищилась гнучкість напівмаски та адаптивність до форми обличчя	Надмірне зниження жорсткості конструкції призводило до деформацій
Моделювання варіанта 2	Локальна перфорація в зоні перенісся та щік	«ANSYS» і «Solid works»	Забезпечено більш рівномірний розподіл контактного тиску та зменшення локальних витоків повітря	Визначено як найбільш ефективний варіант
Моделювання варіанта 3	Локальні отвори діаметром 5 мм	«ANSYS»	Частково компенсувались локальні деформації	Ефективність нижча порівняно з варіантом 2

Продовж. табл. 3.17

Етап дослідження	Що досліджувалось	Метод / програмне забезпечення	Основні результати	Висновок
Аналіз аеродинамічних параметрів	Рух повітря через фільтр та щілини обтюрації	«Solid works» Flow Simulation	Встановлено зменшення коефіцієнта підсмоктування для варіанта 2	Покращено ізоляційні властивості респіратора
Оцінювання контактного тиску	Визначення зон максимального та мінімального притискання	«ANSYS»	Виявлено критичні ділянки: перенісся та щоки	Обґрунтовано локальну перфорацію саме в цих зонах
Інтегральне оцінювання конструкцій	Порівняння маси, розмірів та складності конструкції	Функція загальної корисності	Найвищий інтегральний показник отримав варіант 2	Обрано оптимальну конструкцію
Експериментальна перевірка	Визначення коефіцієнта проникнення аерозолію	EN 140:1998, EN 149:2001+A1:2009, NaCl-тест	Коефіцієнт проникнення для варіанта 2 становив 0,4-0,8 %	Підтверджено результати математичного моделювання

Джерело: сформована автором на основі [32,33,34].

Наведені результати свідчать, що найбільш ефективним є другий варіант конструкції обтюратора, у якому локальна перфорація виконана лише в ділянках перенісся та щік. Саме ця конструкція забезпечує найбільш рівномірний розподіл контактного тиску, зменшення локальних деформацій обтюратора та мінімізацію підсмоктування нефільтрованого повітря в підмасковий простір. Отримані результати математичного моделювання стали основою для подальшого інтегрального оцінювання конструктивних рішень та проведення лабораторних випробувань удосконаленої конструкції респіратора.

Після проведення математичного моделювання було виконано порівняльний аналіз запропонованих конструктивних рішень. Для оцінювання ефективності різних варіантів використовували функцію загальної корисності, яка враховувала сукупність основних параметрів респіратора: масу еластомерної напівмаски, геометричні розміри та складність конструкції.

Для оцінювання маси фільтрувального респіратора використовували залежність: $y = 1,863x^2 - 2,7227x + 1,0045$.

Для оцінювання розмірів респіратора використовували залежність: $y = 0,4918x^2 - 1,2184x + 0,9778$.

Для оцінювання складності конструкції використовували залежність: $y = 0,0083x^2 - 0,1633x + 0,8692$.

Після цього для кожного з альтернативних варіантів конструкції було визначено значення функції загальної корисності з урахуванням вагових коефіцієнтів часткових критеріїв якості. Найбільшу вагу мала маса респіратора – 0,6, для розмірів використаний коефіцієнт 0,3, а для складності конструкції – 0,1.

Основні результати порівняльного аналізу конструктивних варіантів удосконалення обтюратора наведено в табл. 3.18.

Таблиця 3.18

Порівняльна характеристика варіантів перфорації обтюратора

Параметр	Варіант 1 (перфорація по всьому периметру)	Варіант 2 (перфорація в зоні щік і носа)	Варіант 3 (окремі отвори Ø 5 мм в зоні перенісся та щік)	Стандартний обтюратор (без перфорації)
Коефіцієнт проникнення аерозолі, %	0,85-1,12	0,42-0,58	0,71-0,89	1,35-1,68
Зниження проникнення порівняно зі стандартним, %	35-38	65-68	47-50	-
Маса обтюратора, г	42,3	41,8	42,1	41,5
Складність виготовлення	Середня	Низька	Середня	Низька
Адаптація до антропометрії	Висока	Найвища	Середня	Низька
Рекомендація	Не рекомендується	Оптимальний	Прийнятний	-

Джерело: складено автором на основі результатів математичного моделювання, експериментальних досліджень та даних, наведених у [32].

Вибір параметрів для порівняльної оцінки варіантів перфорації обтюратора зумовлений необхідністю комплексного аналізу їх впливу на захисні, технологічні та ергономічні характеристики респіратора. Для прийняття рішення щодо вибору найкращої моделі додатково враховано масу еластомерної напівмаски, її розміри та складність конструкції [35].

До ключових параметрів віднесено:

- коефіцієнт проникнення аерозолю по лінії обтюрації, головний технічний показник захисної ефективності, він безпосередньо визначає реальну дозу шкідливих речовин, що потрапляє в органи дихання працівника, і є критичним для розрахунку реального коефіцієнта захисту ($K_{ЗР}$);
- зниження проникнення аерозолю порівняно зі стандартним обтюратором, відносний показник, що дозволяє кількісно оцінити ефективність запропонованого удосконалення;
- маса обтюратора, важливий масогабаритний параметр, оскільки збільшення маси може негативно впливати на комфорт використання та сприяти додатковій втомі працівника;
- складність виготовлення – технологічний критерій, який визначає можливість і економічну доцільність впровадження удосконалення;
- адаптація до антропометрії – ключовий ергономічний параметр, що відображає здатність обтюратора пристосовуватися до індивідуальних особливостей обличчя різних працівників;
- рекомендації – інтегральний якісний показник, який узагальнює результати аналізу та враховує специфіку експлуатації в умовах гірничої промисловості.

Вибір саме цих параметрів забезпечує системний підхід і дозволяє пов'язати конструктивне удосконалення з інтегральною моделлю оцінки професійних ризиків, розробленою в підрозділах 3.1 та 3.2. Такий набір показників дає змогу не тільки порівняти варіанти між собою, але й обґрунтувати рекомендації щодо практичного впровадження.

Аналіз результатів, наведених у табл. 3.18, свідчить, що використання перфорації обтюратора суттєво впливає на ізоляційні властивості фільтрувального респіратора. Для всіх запропонованих варіантів конструкції спостерігається зниження коефіцієнта проникнення аерозолі порівняно зі стандартним обтюратором без перфорації, що підтверджує доцільність локального регулювання жорсткості обтюратора в зоні прилягання до поверхні обличчя користувача.

Найкращі результати отримано для другого варіанта конструкції, у якому перфорація виконана лише в зоні перенісся та щік. Для цього варіанта коефіцієнт проникнення аерозолі становив 0,42-0,58 %, що забезпечило зниження проникнення аерозолі на 65-68 % порівняно зі стандартним обтюратором. Крім того, саме другий варіант характеризувався найвищим рівнем адаптації до антропометричних особливостей обличчя користувача при одночасно низькій складності виготовлення та незначному збільшенні маси конструкції. Саме ця модель забезпечувала оптимальне співвідношення між герметичністю, адаптивністю та механічною міцністю конструкції.

Перший варіант конструкції, у якому перфорація виконувалась по всьому периметру обтюратора, також забезпечував зменшення коефіцієнта проникнення аерозолі, однак надмірне зниження жорсткості конструкції призводило до погіршення стабільності форми напівмаски під час експлуатації. У результаті цей варіант не був рекомендований для практичного використання.

Третій варіант із використанням окремих отворів діаметром 5 мм у зоні перенісся та щік продемонстрував кращі результати порівняно зі стандартною конструкцією, однак поступався другому варіанту за показниками герметичності та адаптації до антропометричних параметрів користувача.

Отримані результати підтверджують, що локальна перфорація обтюратора в зоні перенісся та щік є найбільш ефективним конструктивним рішенням для підвищення ізоляційних властивостей фільтрувального

респіратор та зменшення підсмоктування нефільтрованого повітря в підмасковий простір.

Для підтвердження результатів математичного моделювання та оцінювання ефективності запропонованих конструктивних рішень були проведені лабораторні випробування фільтрувальних респіраторів в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації. Було проведено **лабораторні** дослідження коефіцієнта підсмоктування аерозолю вздовж лінії обтюрації. Для цього виготовили еластомерну напівмаску, що відповідала другому варіанту конструкції. Лабораторні випробування проводили на шести добровольцях із різними антропометричними параметрами обличчя. Дослідження виконували відповідно до вимог стандартів EN 140:1998 та EN 149:2001+A1:2009 [33,34] із використанням тестового аерозолю хлориду натрію. Для систематизації основних умов проведення експерименту та досліджуваних параметрів доцільно узагальнити характеристики лабораторних випробувань респіраторів (табл. 3.19).

Таблиця 3.19

Основні параметри лабораторних випробувань респіраторів

Параметр	Характеристика
Кількість добровольців	6 осіб
Тестовий аерозоль	NaCl
Нормативні документи	EN 140:1998, EN 149:2001+A1:2009
Тип навантаження	Дихання, ходьба, повороти голови, розмова
Обладнання	Selmi S-115E
Досліджувані параметри	Коефіцієнт проникнення, коефіцієнт підсосу, герметичність

Джерело: сформовано автором за матеріалами експериментальних досліджень, наведених у [32].

Наведені параметри лабораторних випробувань підтверджують комплексний характер проведеного дослідження та дозволяють оцінити ефективність респіраторного захисту в умовах, наближених до реальної виробничої діяльності.

Під час випробувань добровольці виконували комплекс вправ, які моделювали реальні умови експлуатації респіатора: нормальне та глибоке

дихання, повороти голови, рухи головою вгору-вниз, розмову, ходьбу по біговій доріжці та нахили тулуба. Концентрацію тестового аерозолю в підмасковому просторі визначали за допомогою спектрофотометра. Отримані результати показали, що коефіцієнт проникнення аерозолю для другого варіанта конструкції за результатами комп'ютерного моделювання становив близько 0,1 %, а під час експериментальних досліджень коливався в межах 0,4-0,8 %.

Використання тестового аерозолю NaCl, виконання різних видів рухової активності та оцінювання коефіцієнта підсосу повітря дали змогу встановити залежність герметичності респіратора від конструктивних особливостей півмаски та умов її експлуатації. Отримані результати підтвердили адекватність математичного моделювання та показали, що оцінювання ефективності ЗІЗОД повинно враховувати не лише фільтрувальні властивості матеріалу, а й динамічні експлуатаційні фактори, які безпосередньо впливають на рівень професійного ризику працівника.

Проведені лабораторні дослідження підтвердили ефективність використання локальної перфорації обтюратора для підвищення ізоляційних властивостей фільтрувального респіратора, більш рівномірного розподілу контактного тиску, покращення адаптації напівмаски до індивідуальних антропометричних особливостей обличчя користувача та зменшення підсмоктування нефільтрованого повітря в підмасковий простір респіратора. Найкращі результати були отримані для другого варіанта конструкції, у якому отвори виконані лише в ділянках перенісся та щік. Крім того, даний варіант практично не впливає на масу виробу та зберігає прийнятну технологічність виготовлення. Тобто, цей варіант також характеризується оптимальним співвідношенням маси, складності виготовлення та адаптивності до антропометрії обличчя.

Для узагальнення послідовності проведеного дослідження та систематизації основних етапів удосконалення конструкції фільтрувального респіратора було сформовано інтегровану схему оцінювання ефективності

конструктивних рішень. У процесі дослідження послідовно виконувались етапи аналізу проблем герметичності, розроблення конструктивних варіантів обтюратора, математичного моделювання, інтегрального оцінювання та експериментальної перевірки ізоляційних властивостей респіратора. Основні етапи дослідження та їх взаємозв'язок з інтегральним оцінюванням наведено в табл. 3.20.

Таблиця 3.20

**Основні етапи удосконалення конструкції респіратора та їх
взаємозв'язок з інтегральним оцінюванням**

Етап дослідження	Зміст етапу	Методи та програмні засоби	Основний результат	Зв'язок з інтегральною моделлю
Аналіз проблеми герметичності	Визначення основних причин підсмоктування аерозолю вздовж лінії обтюрації	Аналіз літературних джерел, аналіз конструкції респіратора	Встановлено критичні зони: перенісся, щоки, підборіддя	Формування критеріїв оцінювання герметичності
Розроблення конструктивних рішень	Формування трьох варіантів перфорації обтюратора	Конструкторський аналіз	Запропоновано три варіанти удосконалення конструкції	Формування альтернатив для інтегрального оцінювання
Математичне моделювання	Дослідження розподілу контактного тиску та деформацій обтюратора	«ANSYS» і «Solid works»	Визначено вплив перфорації на адаптивність та герметичність	Отримання параметрів для інтегральної моделі
Оцінювання технічних параметрів	Аналіз маси, геометричних параметрів та складності конструкції	Функція загальної корисності	Визначено вагові коефіцієнти критеріїв	Формування інтегрального показника ефективності
Порівняння конструктивних варіантів	Комплексне оцінювання ефективності трьох моделей	Інтегральна модель оцінювання	Найкращим визначено другий варіант конструкції	Вибір оптимального рішення
Лабораторні дослідження	Перевірка коефіцієнта підсмоктування аерозолю	EN 140:1998, EN 149:2001+ A1:2009, тест-аерозоль NaCl	Підтверджено зменшення проникнення аерозолю	Експериментальна верифікація інтегральної моделі

Продовж. табл. 3.20

Аналіз результатів	Порівняння результатів моделювання та експерименту	Статистичне та порівняльне оцінювання	Підтверджено ефективність локальної перфорації	Підтвердження адекватності інтегральної моделі
Формування рекомендацій	Вибір оптимальної конструкції респіратора	Комплексний аналіз результатів	Рекомендовано локальну перфорацію в зоні перенісся та щік	Перехід до практичного впровадження та наступного підрозділу

Джерело: складено автором на основі результатів математичного моделювання, експериментальних досліджень та даних, наведених у [32,33,34].

Наведена послідовність дослідження дозволила комплексно оцінити вплив конструктивних параметрів обтюратора на ізоляційні властивості фільтрувального респіратора та обґрунтувати вибір найбільш ефективного варіанта конструкції. Результати математичного моделювання та лабораторних випробувань підтвердили доцільність використання локальної перфорації в зоні перенісся та щік, що забезпечує покращення герметичності прилягання напівмаски без суттєвого зниження механічної міцності конструкції. Отримані результати стали основою для подальшого формування рекомендацій щодо практичного удосконалення засобів індивідуального захисту органів дихання.

Удосконалення конструкції обтюратора фільтрувального респіратора шляхом локальної перфорації є важливим технічним заходом у складі інтегральної моделі оцінки професійних ризиків. Запропоноване рішення дозволяє суттєво зменшити один із найпоширеніших експлуатаційних дефектів – порушення герметичності обтюратора – і підвищити надійність захисту органів дихання в реальних умовах гірничої та металургійної промисловості.

3.3.2. Удосконалення системи кріплення фільтрувального респіратора

Разом із геометричною адаптацією обтюратора важливе значення для забезпечення ефективності фільтрувальних респіраторів є стабільність

притискання напівмаски до поверхні обличчя користувача. Навіть за високих фільтраційних характеристик фільтрувального матеріалу захисні властивості респіратора можуть суттєво погіршуватися внаслідок утворення зазорів між обличчям та напівмаскою. Особливо це проявляється під час повторного використання респіратора, коли еластичні ремені головного кріплення поступово втрачають свої пружні властивості. Це призводить до зниження сили притискання півмаски до обличчя та збільшення об'єму підсосу забрудненого повітря. Тому наступним напрямом удосконалення конструктивних елементів ЗІЗОД є оптимізація системи кріплення респіратора.

У процесі експлуатації фільтрувальних респіраторів одним із ключових факторів забезпечення стабільних захисних властивостей є надійність системи кріплення, зокрема збереження еластичності ремінців. Проведені дослідження показали, що втрата пружних властивостей елементів кріплення призводить до зміни сили натягу та порушення стабільності прилягання півмаски до поверхні обличчя. Особливо це проявляється в умовах тривалого носіння, повторного використання респіратора та виконання працівником активних виробничих рухів.

Для дослідження впливу еластичності ремінців головного кріплення на захисні властивості фільтрувальних респіраторів були проведені лабораторні дослідження різних типів еластомерних ремінців. Випробування здійснювали відповідно до вимог стандарту EN 149:2001+A1:2009 [34] із використанням лабораторної установки з манекенами.

У дослідженні оцінювали параметри еластичних ремінців залежно від кількості циклів надягання та знімання респіратора. Основними характеристиками були подовження ремінців та сила їх натягу. Встановлено, що зі збільшенням кількості циклів використання спостерігається поступове зростання подовження ремінців та одночасне зменшення сили натягу, що негативно впливає на герметичність прилягання напівмаски. Тобто під час багаторазового надягання та знімання респіратора еластичні ремінці

поступово витягуються, а їх залишкова сила натягу зменшується на 38-74 % вже після 8-10 циклів експлуатації [36]. Це призводить до ослаблення притискання напівмаски, збільшення об'єму підсмоктування забрудненого повітря через щілини вздовж лінії обтюрації та, як наслідок, зниження загальної захисної ефективності ЗІЗОД.

У роботі [36] детально досліджено вплив еластичності головних ремінців на захисні властивості фільтрувальних респіраторів. Для оцінювання впливу параметрів еластомерних ременів на захисні властивості респіратора було сформовано математичну модель фільтрувального респіратора, яка описує залежність об'єму підсосу забрудненого повітря (Q_s) від зміни розрахункової площі ремінця (ΔS) та сили натягу (F). Під час побудови моделі використовували метод планування експерименту [37].

У математичній моделі враховували три основні параметри: силу натягу головного кріплення; ширину еластомерного ремня; об'єм повітря, що підсмоктується через зазори між обличчям та напівмаскою.

Схему досліджуваного об'єкта розглядали як трифакторну модель із двома вхідними параметрами та одним вихідним параметром. Вихідним параметром Y був об'єм забрудненого повітря, що проникає в підмасковий простір через стрічку обтюратора. Вхідними параметрами X_1 та X_2 були площа еластичного ремня та сила натягу напівмаски.

Під час побудови математичної моделі спочатку визначали ступінь полінома, після чого розраховували його коефіцієнти. Метод планування експерименту передбачав цілеспрямовану зміну значень вхідних параметрів із одночасним експериментальним визначенням функції відгуку.

Модель ґрунтувалася на таких припущеннях:

- вхідні параметри змінювались у визначених межах;
- кроки варіювання охоплювали весь діапазон технічних параметрів ременів;
- залежність між параметрами описувалась поліномом першого порядку [38].

Відповідно до результатів експериментальних досліджень було визначено діапазони зміни контрольованих параметрів ширини ременя та сили натягу. Для опису залежності між параметрами еластичних ременів головного кріплення та об'ємом підсмоктування забрудненого повітря використовували лінійну математичну модель виду:

$$Y = b_0X_0 + b_1X_1 + b_2X_2, \quad (3.9)$$

де Y – об'єм підсмоктуваного забрудненого повітря;

X_1 – площа еластичного ременя;

X_2 – сила натягу ременів головного кріплення;

b_0, b_1, b_2 – коефіцієнти математичної моделі, визначені за результатами експериментальних досліджень [36].

Запропонована математична модель дозволила оцінити вплив геометричних параметрів еластичних ременів та сили їх натягу на величину підсмоктування нефільтрованого повітря вздовж лінії обтюрації респіратора. Отримані залежності використовували для визначення оптимальних параметрів головного кріплення та прогнозування зміни захисних властивостей респіратора в процесі експлуатації.

У результаті математичного моделювання було отримано функції відгуку для різних типів еластичних ременів. Порівняння отриманих функцій показало, що ремінь №1 характеризувався найгіршими показниками захисних властивостей та надійності, тому його не розглядали в подальших оптимізаційних розрахунках.

Для оцінювання точності математичної моделі визначали відносне відхилення між розрахунковими та експериментальними значеннями об'єму підсмоктування забрудненого повітря. Встановлено, що лінійна модель забезпечує достатнє наближення результатів експерименту, оскільки відносне відхилення не перевищувало 2,5 %

Результати досліджень показали, що зі збільшенням площі еластичного ремня зростає об'єм повітря, що підсмоктується під лицьову частину респіратора. Це пояснюється збільшенням подовження ременів унаслідок повторних циклів надягання та знімання.

Найбільше збільшення витоку повітря спостерігалось для ремня №2, тоді як найкращі результати були отримані для ремня №3. Саме для ремня №3 об'єм підсмоктування відповідав встановленим обмеженням щодо герметичності респіратора.

Установлено, що зниження сили натягу еластичних ременів під час тривалої експлуатації може бути пов'язане з руйнуванням поперечних зв'язків у структурі матеріалу або деформацією спіральної структури ремня. У результаті ремені поступово втрачають здатність відновлювати свої початкові геометричні параметри.

Ефективність фільтрувального респіратора в реальних умовах експлуатації визначається не лише початковими конструктивними характеристиками, а й здатністю системи кріплення забезпечувати стабільне прилягання півмаски під час виконання виробничих операцій. Проведені дослідження показали, що в процесі трудової діяльності на герметичність респіратора суттєво впливають рухова активність працівника, тривалість носіння ЗІЗОД та повторне використання респіратора. Зміна сили натягу ремінців і зміщення півмаски можуть призводити до локального порушення герметичності та збільшення підсосу забрудненого повітря у підмасковий простір. У зв'язку з цим доцільно систематизувати основні експлуатаційні фактори, які впливають на стабільність герметичності респіратора в процесі його використання (табл. 3.21).

Наведені результати підтверджують, що стабільність герметичності респіратора має динамічний характер і суттєво залежить від умов його експлуатації. Встановлено, що інтенсивні рухи голови, фізичне навантаження та тривале носіння респіратора спричиняють зміну натягу системи кріплення

і можуть призводити до порушення щільності прилягання півмаски до поверхні обличчя.

Таблиця 3.21

**Вплив експлуатаційних умов на стабільність герметичності
респіратора**

Експлуатаційний фактор	Вплив на систему кріплення	Результат
Інтенсивні рухи голови	Перерозподіл натягу ремінців	Зростання ризику витоків
Тривале носіння	Ослаблення фіксації	Погіршення герметичності
Повторне надягання респіратора	Деформація ремінців	Зниження стабільності прилягання
Фізичне навантаження	Зміщення півмаски	Збільшення підсосу аерозолю

Джерело: сформовано автором на основі результатів досліджень [36]

Особливо небезпечним є багаторазове надягання респіратора, яке прискорює деформацію ремінців та знижує стабільність фіксації ЗІЗОД. Отримані результати свідчать про необхідність врахування експлуатаційних факторів під час оцінювання ефективності респіраторного захисту та підтверджують доцільність включення динамічних характеристик герметичності до системи інтегральної оцінки професійних ризиків при експлуатації ЗІЗОД.

Крім того, встановлено, що суттєвий вплив на герметичність має нерівномірність натягу верхнього та нижнього ременів головного кріплення. Нерівномірний натяг призводить до неоднакового розподілу стискаючих сил уздовж лінії обтюрації та виникнення локальних зон витоків повітря.

Для вирішення цієї проблеми та підвищення стабільності прилягання напівмаски до поверхні обличчя протягом усього часу експлуатації в межах дисертаційного дослідження запропоновано комплексне удосконалення системи кріплення респіратора, яке включає два взаємопов'язані та взаємодоповнюючі напрями.

Перший напрям передбачає оптимізацію параметрів еластичних ремінців, зокрема обґрунтований вибір їх ширини та конструкції залежно від

режиму експлуатації, кількості циклів надягання та знімання респіратора, а також необхідної сили натягу. Встановлено, що оптимальний рівень натягу ремінців повинен перебувати в межах 5-6 Н, що забезпечує необхідний рівень герметичності без надмірного механічного навантаження на поверхню обличчя користувача.

Коефіцієнти математичної моделі визначали методом найменших квадратів. Для цього використовували результати експериментальних досліджень та систему рівнянь, сформовану на основі значень функції відгуку.

Запропонована математична модель дозволила оцінити вплив геометричних параметрів еластичних ременів та сили їх натягу на величину підсмоктування нефільтрованого повітря вздовж лінії обтюрації респіратора. Отримані залежності використовували для визначення оптимальних параметрів головного кріплення та прогнозування зміни захисних властивостей респіратора в процесі експлуатації.

У дослідженні [36] містяться дані про п'ять типів еластичних ремінців (ширина 3,0 мм; 4,0 мм; 7,0 мм; 5,0 мм; 6,0 мм), результати випробувань на витягування, залишкову силу натягу та об'єм підсосу повітря. Тому доцільно скласти порівняльну таблицю, яка б одночасно включала ширину ремінця, залишкову силу натягу після 10 циклів, об'єм підсосу повітря при $F = 5$ Н та відсоток зниження сили натягу.

Для узагальнення результатів експериментальних досліджень та порівняльного оцінювання експлуатаційних характеристик різних типів еластичних ремінців було сформовано таблицю, що містить основні параметри їх роботи після багаторазових циклів експлуатації. У таблиці наведено значення залишкової сили натягу, об'єму підсмоктування повітря та відносного зниження сили натягу для різних типів ремінців головного кріплення. Порівняльні характеристики досліджених типів ремінців наведено в табл. 3.22.

Результати, що наведені в табл. 3.22, свідчать про суттєвий вплив геометричних параметрів еластичних ремінців на стабільність сили натягу та герметичність прилягання респіратора до поверхні обличчя користувача.

Таблиця 3.22

**Порівняння експлуатаційних характеристик різних типів
еластичних ремінців фільтрувального респіратора**

Тип ремінця	Ширина, мм	Залишкова сила натягу після 10 циклів, Н	Об'єм підсосу повітря при $F = 5 \text{ Н}$, $\text{см}^3/\text{хв}$	Відносне зниження сили натягу, %	Рекомендація
1	3,0	2,1-2,8	174	62-74	Не рекомендується
2	4,0	3,2-3,7	124	48-55	Прийнятний
3	7,0	5,1-5,6	98	38-42	Оптимальний
4	5,0	3,8-4,3	116	45-52	Добрий
5	6,0	4,4-4,9	103	41-48	Добрий

Джерело: авторська інтерпретація та узагальнення даних [36], адаптованою під стиль і потреби даного дослідження

Найгірші результати отримано для ремінця №1 шириною 3,0 мм, для якого спостерігалось найбільше зниження сили натягу та максимальний об'єм підсмоктування повітря. Найкращими експлуатаційними характеристиками характеризувався ремінець №3 шириною 7,0 мм, який забезпечував мінімальний об'єм підсмоктування повітря та найменше зниження сили натягу після циклів експлуатації. Отримані результати підтверджують доцільність використання ремінців більшої ширини для забезпечення стабільності захисних властивостей фільтрувального респіратора під час тривалої експлуатації.

Результати проведених досліджень дозволили сформулювати підхід до вибору геометричних параметрів еластичних ременів головного кріплення за критерієм забезпечення допустимого рівня підсмоктування забрудненого повітря в підмасковий простір. Установлено, що вже після восьми циклів надягання та знімання респіратора сили натягу еластичних ременів можуть зменшуватися на 38-74 %, що суттєво погіршує захисні властивості респіратора.

Другий напрям – впровадження вставок-індикаторів контролю натягу. Для підвищення стабільності герметичного прилягання напівмаски та забезпечення оперативного контролю сили натягу еластичних ремінців у

межах дослідження запропоновано використання спеціальних вставок-індикаторів контролю натягу, які фіксуються на корпусі півмаски. Конструкція вставки включає контрольну пружину та багатоколірні індикаторні пластини, які дозволяють візуально оцінювати рівень натягу ремінців під час експлуатації респіратора. Залежно від сили натягу ремінця пружина розтягується, і через спеціальний паз стає видимим відповідний колір (рис. 3.8):

- зелений – оптимальний натяг (5-6 Н), забезпечує надійну герметичність;
- помаранчевий – недостатній натяг (нижче 4 Н сигналізує про необхідність підтягування);
- червоний – надмірний натяг (понад 7 Н), що може спричинити дискомфорт і пошкодження шкіри.

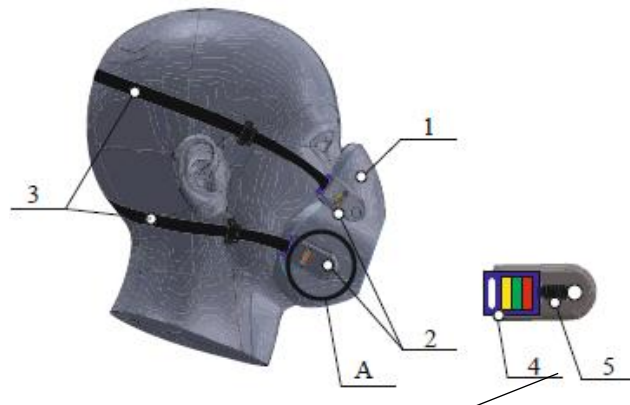


Рис. 3.8. Конструкція спеціальних вставок-індикаторів для контролю натягу еластичних ремінців фільтрувального респіратора:

1 – корпус півмаски; 2 – спеціальна вставка; 3 – еластичний ремінець; 4 – багатоколірні індикаторні пластини; 5 – пружина.

Джерело: візуалізовано автором за матеріалами [36]

На рис. 3.8 зображено загальний вигляд фільтрувального респіратора із встановленими спеціальними вставками-індикаторами. У збільшеному вигляді показано будову вставки, яка складається з корпусу, контрольної пружини та багатоколірних індикаторних пластин. Залежно від сили натягу ремінця через спеціальний прозорий паз стає видимим відповідний колір індикатора. Зелений колір відповідає оптимальному рівню натягу та

забезпечує необхідний рівень герметичності. Помаранчевий колір сигналізує про недостатній натяг ремінців (менше 4 Н), що може призводити до порушення герметичності напівмаски. Червоний колір відповідає надмірному натягу понад 7 Н, який може викликати дискомфорт та надмірний механічний тиск на поверхню обличчя користувача.

Запропонована конструкція вставок-індикаторів дозволяє оперативно контролювати технічний стан системи кріплення респіратора безпосередньо під час експлуатації та своєчасно виявляти послаблення ремінців. Це забезпечує стабільність притискання напівмаски до поверхні обличчя та сприяє підтриманню необхідного рівня захисної ефективності фільтрувального респіратору протягом усієї робочої зміни.

Слід зазначити, що запропоновані вставки-індикатори не призначені для безперервного візуального контролю під час виконання виробничих операцій. Їх основною функцією є оперативний контроль правильності натягу ремінців під час надягання респіратору, після регулювання системи кріплення, а також під час регламентованих перевірок перед початком роботи або після тривалої експлуатації. Такий підхід забезпечує підтримання рекомендованого рівня натягу ремінців (5-6 Н), що сприяє стабільності герметичного прилягання напівмаски протягом робочої зміни.

Таким чином, результати проведених досліджень підтвердили, що ефективність фільтрувального респіратору значною мірою залежить не лише від конструкції обтюратора, а й від стабільності сили натягу еластичних ременів головного кріплення. Використання систем контролю натягу дозволяє своєчасно виявляти послаблення ременів та підтримувати необхідний рівень герметичності напівмаски під час експлуатації респіратору.

Проведений аналіз результатів експериментальних досліджень показав, що технічний стан системи кріплення респіратору безпосередньо впливає як на рівень герметичності півмаски, так і на ефективність респіраторного захисту в цілому. Встановлено, що зміна еластичних властивостей ремінців у процесі експлуатації призводить до порушення стабільності фіксації респіратору та збільшення ймовірності проникнення забрудненого повітря у підмасковий простір. Одночасно надмірний натяг системи кріплення може

спричиняти підвищене фізіологічне навантаження та дискомфорт працівника під час тривалого використання ЗІЗОД. У зв'язку з цим виникає необхідність комплексного аналізу взаємозв'язку між характеристиками системи кріплення респіратора, його експлуатаційними властивостями та рівнем професійного ризику працівника (табл. 3.23).

Таблиця 3.23

Взаємозв'язок еластичності ремінців та рівня професійного ризику

Параметр системи кріплення	Вплив на експлуатаційні характеристики	Вплив на професійний ризик
Стабільність натягу	Забезпечення герметичності	Зниження ризику проникнення аерозолію
Втрата еластичності	Погіршення прилягання	Зростання ризику інгалаційного впливу
Деформація ремінців	Нестабільність фіксації	Підвищення ймовірності витоків
Адаптивність системи кріплення	Комфортність використання	Зниження фізіологічного навантаження

Джерело: сформовано автором за результатами аналізу впливу еластичності ремінців на захисні властивості респіратора

Наведені результати підтверджують, що еластичність ремінців є одним із ключових факторів забезпечення стабільної герметичності фільтрувального респіратора в процесі експлуатації. Встановлено, що втрата пружних властивостей системи кріплення призводить до погіршення прилягання півмаски та підвищення ризику проникнення шкідливих аерозолів у підмасковий простір. Одночасно адаптивність системи кріплення та стабільність натягу сприяють зниженню фізіологічного навантаження на працівника, підвищенню комфортності використання ЗІЗОД і збереженню належного рівня захисних властивостей респіратора [39]. Отримані результати свідчать про необхідність врахування параметрів системи кріплення під час інтегральної оцінки професійних ризиків та підтверджують, що ефективність ЗІЗОД повинна оцінюватися з урахуванням як технічних, так і ергономічних характеристик конструкції.

Для систематизації результатів проведених досліджень та узагальнення етапів удосконалення конструкції фільтрувального респіратора доцільно представити комплексну характеристику виконаних досліджень, методів оцінювання та отриманих результатів. Узагальнення дозволяє простежити

логічний взаємозв'язок між етапами математичного моделювання, лабораторних випробувань, конструктивного удосконалення респіратору та інтегрального оцінювання його ефективності (табл. 3.24).

Таблиця 3.24

Узагальнення етапів удосконалення конструкції фільтрувального респіратору та результатів математичного моделювання

Етап дослідження	Зміст дослідження	Метод	Основний результат	Практичне значення
Аналіз герметичності	Визначення причин підсмоктування	Аналіз конструкції	Виявлено критичні зони	Формування критеріїв
Розроблення перфорації	3 варіанти перфорації	Конструкторський аналіз	Сформовано 3 конструкції	Основа моделювання
Математичне моделювання	Тиск і деформації	«ANSYS» і «Solid works»	Оцінено адаптивність	Вибір оптимальної конструкції
Лабораторні дослідження	Підсмоктування аерозолі	EN 149	Визначено ефективність	Верифікація моделі
Дослідження ременів	Зміна натягу	Планування експерименту	Виявлено втрату натягу	Оптимізація ременів
Математична модель	Залежність Q_s від F і ΔS	Метод найменших квадратів	Побудовано модель	Прогноз герметичності
Вставки-індикатори	Контроль натягу	Конструкторська розробка	Візуальний контроль	Підвищення надійності
Інтегральне оцінювання	Порівняння конструкцій	Інтегральна модель	Обрано варіант 2	Практичне впровадження

Джерело: сформовано автором за результатами досліджень конструктивних елементів ЗІЗОД

Наведені результати свідчать про комплексний характер проведених досліджень та підтверджують ефективність запропонованих конструктивних рішень щодо підвищення герметичності та стабільності захисних властивостей фільтрувального респіратору. Поєднання математичного моделювання, експериментальних досліджень та інтегрального оцінювання дозволило обґрунтувати оптимальні параметри конструкції респіратору та сформулювати рекомендації щодо його практичного використання.

У підрозділі розроблено комплекс удосконалень конструктивних елементів ЗІЗОД, спрямованих на підвищення герметичності прилягання та ергономічності фільтрувальних респіраторів у реальних умовах експлуатації.

Встановлено, що одним із головних джерел експлуатаційного ризику є порушення герметичності вздовж лінії обтюрації, яке виникає внаслідок антропометричних особливостей обличчя користувачів, нерівномірного розподілу контактного тиску та деградації елементів системи кріплення під час експлуатації респіратора.

На підставі результатів математичного моделювання та експериментальних досліджень обґрунтовано ефективність локальної перфорації обтюратора в зоні перенісся та щік, що забезпечує підвищення адаптивності прилягання та зменшення коефіцієнта проникнення аерозолію на 65-68 % порівняно зі стандартною конструкцією респіратора.

Доведено, що поступове ослаблення еластичних ремінців у процесі багаторазового використання призводить до зменшення сили притискання напівмаски до поверхні обличчя та збільшення підсосу забрудненого повітря в підмасковий простір. Установлено, що найбільш ефективними є ремінці шириною 7 мм, які забезпечують стабільність сили натягу та мінімальний об'єм витоків повітря під час експлуатації.

Удосконалення системи кріплення шляхом оптимізації еластичності ремінців та впровадження вставок-індикаторів контролю натягу дозволяє своєчасно виявляти втрату герметичності та підтримувати стабільність захисних властивостей респіратора протягом робочої зміни.

Отримані результати підтверджують, що конструктивні параметри ЗІЗОД безпосередньо впливають на рівень професійного ризику працівника, оскільки визначають фактичний обсяг підсмоктування нефільтрованого повітря, стабільність герметичності та рівень фізіологічного навантаження під час використання респіратора.

Таким чином, запропоновані конструктивні удосконалення слід розглядати не лише як технічний напрям модернізації ЗІЗОД, а і як складову системи інтегрального оцінювання професійних ризиків при експлуатації фільтрувальних респіраторів у промислових умовах.

3.4. Удосконалення математичних моделей та програмних засобів оцінювання захисної ефективності ЗІЗОД

3.4.1 Розроблення математичних моделей оцінювання захисної ефективності ЗІЗОД

У підрозділах 3.1-3.3 було розроблено комплекс організаційних та конструктивних заходів щодо підвищення ефективності ЗІЗОД, спрямований на підвищення герметичності прилягання та стабільності експлуатації фільтрувального респіратора. Проте для кількісного оцінювання отриманого ефекту необхідна математична модель, яка дозволяє більш точно визначати фактичний рівень захисту працівника. та врахувала реальні динамічні процеси під час дихання.

Коефіцієнт захисту є одним із основних показників ефективності засобів індивідуального захисту органів дихання та характеризує здатність респіратора зменшувати концентрацію шкідливих аерозолів, що надходять до органів дихання працівника. У практиці оцінювання захисних властивостей фільтрувальних респіраторів коефіцієнт захисту визначають як відношення концентрації аерозолу в навколишньому середовищі до концентрації аерозолу в підмасковому просторі [40].

Класична модель визначення коефіцієнта захисту має вигляд:

$$K_{ЗР} = C / C_i, \quad (3.10)$$

де $K_{ЗР}$ – коефіцієнт захисту респіратора;

C – концентрація аерозолу в навколишньому середовищі;

C_i – концентрація аерозолу в підмасковому просторі.

Коефіцієнт захисту респіратора характеризує здатність засобу індивідуального захисту органів дихання знижувати концентрацію шкідливих аерозолів, що потрапляють до органів дихання працівника. Фізично цей

показник відображає, у скільки разів концентрація аерозолю в підмасковому просторі є меншою за концентрацію забруднювача в навколишньому середовищі. Чим більше значення коефіцієнта захисту, тим вищий рівень захисної ефективності респіратора та менша кількість шкідливих частинок потрапляє до органів дихання користувача [41].

Фізичний зміст коефіцієнта захисту полягає у визначенні кратності зниження концентрації шкідливої речовини під час використання респіратора. Наприклад, значення $K_{зр} = 100$ означає, що концентрація аерозолю в підмасковому просторі у 100 разів менша порівняно з концентрацією в навколишньому повітрі.

У традиційному підході коефіцієнт захисту визначається як відношення концентрації аерозолю в навколишньому середовищі до концентрації аерозолю, виміряної у підмасковому просторі респіратора. При цьому передбачається, що виміряна підмаскова концентрація повністю характеризує кількість частинок, які проникають до органів дихання людини. Однак такий підхід не враховує низку фізичних процесів, що відбуваються під час руху аерозольних частинок від навколишнього середовища до дихальних шляхів працівника [42].

Разом із тим аналіз наукових досліджень та існуючих підходів до визначення коефіцієнта захисту (п. 2.4.2) показав, що класична модель має низку суттєвих обмежень. Під час визначення підмаскової концентрації не враховуються процеси осадження аерозольних частинок у пробовідбірному зонді вимірювальної системи, підмасковому просторі респіратора та органах дихання людини. Крім того, класичний підхід не враховує особливості руху повітряних потоків під час вдиху та видиху, хоча саме динаміка дихального циклу значною мірою визначає характер перенесення та осадження частинок. Унаслідок цього виміряна концентрація аерозолю може відрізнятися від фактичної концентрації, що надходить до органів дихання працівника, а отримані значення коефіцієнта захисту можуть бути завищеними. Це може

впливати на достовірність оцінювання захисних властивостей респіратора [43].

Отже, незважаючи на простоту застосування та широке використання, традиційний підхід до визначення коефіцієнта захисту респіратора має низку обмежень, пов'язаних зі спрощеним описом процесів проникнення аерозольних частинок до органів дихання користувача. Основні недоліки класичної моделі наведено в табл. 3.25.

Таблиця 3.25

Недоліки класичної моделі визначення коефіцієнта захисту респіратора

Недолік	Наслідок
Не враховується осадження частинок у зонді	Спотворення результатів вимірювання
Не враховується осадження в підмасковому просторі	Завищення КЗР
Не враховується осадження в органах дихання	Неточна оцінка інгаляційного впливу
Не враховується цикл вдихання-видихання	Спрощення реальних умов експлуатації
Не враховується підсмоктування через нещільності	Недооцінка реальної експозиції

Джерело: сформовано автором за [42].

Як видно з табл. 3.25, традиційна модель не враховує низку процесів, які безпосередньо впливають на формування фактичної концентрації аерозолі в підмасковому просторі. Зокрема, не враховується осадження частинок на поверхнях пробовідбірної системи, усередині респіратору та в органах дихання користувача. Крім того, у моделі відсутній поділ процесів вдихання та видихання, хоча циклічний характер дихання суттєво впливає на переміщення та накопичення аерозольних частинок. У результаті вимірювання підмаскова концентрація не завжди відповідає фактичній кількості частинок, що досягають органів дихання працівника.

Таким чином, традиційна модель може призводити до завищення значень коефіцієнта захисту респіратору та, відповідно, до переоцінки його захисної ефективності. Для усунення зазначених недоліків класичної моделі було запропоновано удосконалений підхід до визначення коефіцієнта захисту

респіратор, який ґрунтується на врахуванні процесів осадження аерозольних частинок на різних етапах їх переміщення від навколишнього середовища до органів дихання працівника. Аналіз результатів експериментальних досліджень, наведених у роботі [42], показав, що частина аерозольних частинок не досягає точки вимірювання через осадження у пробовідбірному зонді, підмасковому просторі респіатора та дихальних шляхах людини. Унаслідок цього виміряна концентрація аерозолію може відрізнятись від фактичної концентрації, що надходить до органів дихання користувача.

Для врахування процесів осадження аерозольних частинок у дослідженні [42] запропоновано використовувати систему поправочних коефіцієнтів, що характеризують окремі механізми втрат частинок у процесі їх переміщення від навколишнього середовища до органів дихання користувача. Зокрема, запропоновано враховувати осадження частинок у пробовідбірному зонді $SD(x)$, підмасковому просторі респіатора $SH(x)$, органах дихання людини $LD(x)$, а також додаткові похибки вимірювання та перемішування аерозолію $SB(x)$.

У роботі [42] наведено концепцію використання зазначених поправочних коефіцієнтів та обґрунтовано необхідність їх урахування під час визначення коефіцієнта захисту респіатора. Разом із тим аналітичні залежності для розрахунку коефіцієнтів $SD(x)$, $SH(x)$, $LD(x)$ та $SB(x)$ авторами не наведено, оскільки основну увагу приділено оцінюванню їх впливу на результати визначення підмаскової концентрації аерозолію та коефіцієнта захисту.

Тому в межах даного дослідження зазначені коефіцієнти розглядаються як узагальнені поправочні функції, що враховують відповідні фізичні процеси осадження та втрат аерозольних частинок.

Для наочного представлення фізичного змісту поправочних коефіцієнтів, запропонованих у роботі [42], їх призначення наведено в табл. 3.26.

Таблиця 3.26

Фізичний зміст поправочних коефіцієнтів удосконаленої моделі

Позначення	Призначення
$SD(x)$	Осадження частинок у пробовідбірному зонді
$SH(x)$	Осадження частинок у підмасковому просторі
$LD(x)$	Осадження частинок у дихальних шляхах людини
$SB(x)$	Похибки вимірювання та перемішування аерозолі

Джерело: сформовано автором за [42].

Як видно з табл. 3.26, коефіцієнти $SD(x)$, $SH(x)$, $LD(x)$ та $SB(x)$ описують усі основні етапи переміщення аерозольних частинок від навколишнього середовища до органів дихання користувача. Їх використання дозволяє перейти від спрощеного визначення підмаскової концентрації до більш повного врахування фізичних процесів осадження та втрат частинок. Це створює теоретичне підґрунтя для подальшого формування удосконаленої математичної моделі визначення коефіцієнта захисту респіратора. У роботі [42] зазначені коефіцієнти використовуються як поправочні функції, що враховують процеси осадження та вимірювальні похибки.

На основі зазначеної концепції в межах дисертаційного дослідження запропоновано уточнений вираз для визначення реальної підмаскової концентрації аерозолі, який дозволяє більш повно врахувати особливості формування аерозольного середовища під лицьовою частиною респіратора. На відміну від традиційного підходу, запропонована залежність враховує циклічний характер дихання працівника, різницю між фазами вдихання та видихання, а також можливість проникнення нефільтрованого повітря через нещільності по лінії обтюрції.

Необхідність такого уточнення обумовлена тим, що фактична концентрація аерозолі в підмасковому просторі формується під впливом сукупності фізичних процесів, серед яких визначальними є повітрообмін під час дихання, осадження частинок на внутрішніх поверхнях респіратора та підсмоктування забрудненого повітря через локальні порушення герметичності. Ігнорування зазначених процесів може призводити до

завищення розрахункових значень коефіцієнта захисту та недостатньо точного оцінювання ефективності засобів індивідуального захисту органів дихання в реальних умовах експлуатації.

На основі підходу, запропонованого в [42], та з урахуванням необхідності врахування динаміки дихального циклу і підсмоктування нефільтрованого повітря запропоновано вираз для визначення реальної підмаскової концентрації аерозолі:

$$C_{ia} = C_i / (T_{вдох} \times (1 + K_{нідс}) \times CF_{вдох} + (1 - T_{вдох}) \times (1 + K_{нідс}) \times CF_{видих}), \quad (3.11)$$

де C_{ia} – уточнена реальна концентрація аерозолі в підмасковому просторі;

$T_{вдох}$ – частка часу циклу, що припадає на вдих;

$CF_{вдох}$ – поправочний коефіцієнт для фази вдиху;

$CF_{видих}$ – поправочний коефіцієнт для фази видиху;

$K_{нідс}$ – коефіцієнт підсмоктування нефільтрованого повітря через нещільності обтюраторів.

Для врахування процесів осадження аерозольних частинок та особливостей їх переміщення під час дихального циклу в удосконаленій моделі використовуються поправочні коефіцієнти для фаз вдихання та видихання. Зазначені коефіцієнти дозволяють врахувати втрати частинок на різних етапах їх руху від навколишнього середовища до органів дихання працівника. Поправочний коефіцієнт для фази вдихання визначається за залежністю:

$$CF_{вдох} = \int_0^{\infty} fi(x) \times (1 - SD(x)) \times (1 + SB_{вдох}(x)) \times (1 + SH_{вдох}(x)) dx, \quad (3.12)$$

де $fi(x)$ – масова функція розподілу аерозольних частинок за розмірами;

$SD(x)$ – коефіцієнт осадження частинок у пробовідбірному зонді;

$SB_{\text{вдих}}(x)$ – поправка на похибки вимірювання та перемішування аерозолію під час вдихання;

$SH_{\text{вдих}}(x)$ – коефіцієнт осадження частинок у підмасковому просторі внаслідок впливу вологості та контакту з внутрішніми поверхнями респіратору.

Аналогічно для фази видихання використовується коефіцієнт:

$$CF_{\text{видих}} = \int_0^{\infty} fi(x) \times (1 - LD(x)) \times (1 - SD(x)) \times (1 + SB_{\text{видих}}(x)) \times (1 + SH_{\text{видих}}(x)) dx, \quad (3.13)$$

де $LD(x)$ – коефіцієнт осадження частинок в органах дихання працівника;

$SB_{\text{видх}}(x)$ – поправка на похибки вимірювання під час видихання;

$SH_{\text{видх}}(x)$ – коефіцієнт осадження частинок у підмасковому просторі під час видихання.

Таким чином, коефіцієнт $CF_{\text{вдих}}$ характеризує частку аерозольних частинок, яка фактично потрапляє до підмаскового простору під час вдихання з урахуванням втрат у системі відбору проб та всередині респіратору. У свою чергу коефіцієнт $CF_{\text{видх}}$ враховує процеси осадження частинок у дихальних шляхах і втрати під час видихання. Використання зазначених поправочних коефіцієнтів дозволяє перейти від спрощеного визначення підмаскової концентрації до більш реалістичного опису процесів проникнення та осадження аерозольних частинок, що відбуваються під час експлуатації фільтрувальних респіраторів. Вони дозволяють врахувати втрати частинок у зонді, підмасковому просторі, органах дихання та похибки вимірювання, що забезпечує більш достовірне визначення підмаскової концентрації аерозолію.

Таким чином, введені поправочні коефіцієнти дозволяють врахувати основні процеси втрат аерозольних частинок, що виникають під час їх руху від навколишнього середовища до органів дихання користувача. На відміну від традиційного підходу, в якому коефіцієнт захисту визначається на основі безпосередньо виміряної концентрації аерозолію в підмасковому просторі, запропонований підхід передбачає використання уточненої підмаскової

концентрації C_{ia} , яка враховує осадження частинок у пробовідбірній системі, вплив вологості підмаскового простору, осадження в органах дихання та особливості дихального циклу працівника. У результаті розрахункове значення концентрації аерозолю наближається до реальних умов експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання.

З урахуванням уточненої підмаскової концентрації коефіцієнт захисту респіратора доцільно визначати як відношення концентрації аерозолю в навколишньому середовищі до розрахованої реальної концентрації аерозолю в підмасковому просторі:

$$K_{3P} = C / C_{ia}, \quad (3.14)$$

де C_{ia} — уточнена концентрація аерозолю в підмасковому просторі, визначена з урахуванням процесів осадження частинок та параметрів дихального циклу.

Запропонована залежність є узагальненням класичної моделі визначення коефіцієнта захисту респіратора та дозволяє враховувати фактори, які раніше залишалися поза межами розрахунку. Це забезпечує підвищення достовірності оцінювання захисних властивостей респіраторів, особливо під час визначення рівня професійного ризику в умовах впливу вискодисперсних промислових аерозолів. Використання уточненої підмаскової концентрації дозволяє більш обґрунтовано оцінювати фактичну ефективність ЗІЗОД та створює основу для подальшого вдосконалення методів прогнозування їх захисної дії в реальних умовах експлуатації.

Після розроблення удосконаленої математичної моделі визначення коефіцієнта захисту респіратора виникає необхідність оцінювання її адекватності та практичної придатності для використання під час оцінювання ефективності засобів індивідуального захисту органів дихання. З цією метою було проведено експериментальні дослідження, результати яких наведено в [42].

Експериментальні дослідження проводилися на 6 добровольцях із використанням напівмасок типу «Стандарт» класу FFP2. Методологія базувалася на вимогах ДСТУ EN 149:2017 «Засоби індивідуального захисту органів дихання. Півмаски фільтрувальні для захисту від аерозолів. Вимоги, випробування, маркування» [44] та ДСТУ EN 13274-1:2005 «Засоби індивідуального захисту органів дихання. Методи випробування. Частина 1. Визначення коефіцієнта проникання і загального коефіцієнту проникання» [45] щодо визначення загального коефіцієнта проникання аерозолію.

Процедура експериментальних досліджень проводилася з дотриманням етичних норм та вимог безпеки. Усі добровольці пройшли попередній інструктаж щодо регламенту випробувань і надали письмову згоду на участь у дослідженні та обробку персональних даних. Перед початком тестування випробувачі самостійно здійснювали підгонку напівмасок відповідно до інструкцій виробника. Контроль герметичності прилягання (fit-test) виконувався якісним методом із застосуванням контрольного аерозолію (бітрексу). До подальших випробувань допускалися лише ті особи, для яких було підтверджено повну герметичність обтюрації. Експериментальна установка та методика визначення захисної ефективності повністю відповідають вимогам ДСТУ EN 149:2017 [44].

Програма експериментальних досліджень передбачала виконання добровольцями циклу із семи послідовних вправ, що імітують рухову та дихальну активність у реальних виробничих умовах. Загальна тривалість тестового циклу становила 14 хвилин, при цьому кожна вправа виконувалася протягом 2 хвилин у послідовності – звичайне та глибоке дихання, артикуляційні вправи, повороти голови, ходьба зі швидкістю 6 км/год та нахили тулуба.

Генерація аерозольного середовища NaCl забезпечувалася поєднанням стандартного пневматичного генератора та ультразвукового розпилювача. Це дозволило отримати полідисперсну хмару з широким спектром діаметрів часток – від нанорозмірного діапазону (0,02 мкм) до великих механічних

фракцій (100 мкм), що необхідно для комплексної перевірки ефективності обтюрації та фільтрації ЗІЗОД.

Вимірювання концентрації тест-аерозолі проводилося спектрофотометром «Селмі С-115М1Е» на фоні базової запиленості камери 8-10 мг/м³. Метрологічне підтвердження даних забезпечувалося гравіметричним аналізом проб, відібраних аспіратором «Тайфун-Б» на фільтри АФА. Зважування наважок виконувалося на вагах ANZ100C з похибкою не більше 1 %. Запропонована схема дозволила розрахувати загальну концентрацію аерозолі та окремо виділити фракцію часток діаметром понад 10 мкм, виходячи з різниці масових показників фільтрів.

Відбір аерозольних проб із підмаскового простору та камери здійснювався зі швидкістю 3 дм³/хв, що виключало вплив вакуумметричного тиску на герметичність обтюрації. Постійна реєстрація концентрацій під час виконання тестових вправ забезпечила високу дискретність даних. Обробка результатів проводилася за допомогою програмного забезпечення AAS-2009, яке здійснювало автоматичне осереднення показників та їх подальшу генерацію у вигляді звітних таблиць і графіків.

Оцінка результатів випробувань проводилася на основі осереднених значень із розрахунком невизначеності вимірювань при $P < 0,05$. Розрахункові процедури виконувалися відповідно до міжнародного керівництва JCGM 100:2008 [46] та рекомендацій ILAC-G17:01/2021 [47], що забезпечило відповідність експериментальних даних принципам сучасної метрології та міжнародним стандартам тестування ЗІЗ.

Наведена методика дозволила отримати експериментальні дані щодо концентрації аерозольних частинок у навколишньому середовищі та підмасковому просторі респіратору в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації ЗІЗОД. Отримані результати були використані для порівняння значень коефіцієнта захисту, розрахованих за традиційною та удосконаленою математичними моделями, а також для оцінювання впливу

процесів осадження частинок на достовірність визначення захисної ефективності респіратора.

Результати досліджень показали, що для дрібнодисперсних частинок вплив процесів осадження є відносно незначним, тоді як зі збільшенням розміру частинок частка аерозолі, яка осідає в пробовідбірній системі, підмасковому просторі та органах дихання, істотно зростає. У результаті використання традиційної моделі призводить до завищення фактичних значень коефіцієнта захисту.

Удосконалена модель дозволяє розрахувати реальну підмаскову концентрацію аерозолі C_{ia} , яка враховує динаміку дихального процесу та фізичні явища осадження частинок на різних етапах їх переміщення до органів дихання користувача. Урахування зазначених процесів підвищує точність визначення коефіцієнта захисту респіратора та дозволяє усунути систематичне завищення його значень, характерне для традиційного підходу. Це забезпечує перехід від умовної лабораторної концентрації аерозолі, отриманої прямими вимірюваннями, до більш реалістичної оцінки фактичної концентрації частинок у підмасковому просторі під час експлуатації респіратора.

Для перевірки адекватності удосконаленої математичної моделі було проведено порівняння результатів теоретичних розрахунків із даними експериментальних досліджень, виконаних відповідно до вимог ДСТУ EN 149:2017 та ДСТУ EN 13274-1:2005 [44,45]. Оцінювання здійснювали на основі результатів випробувань фільтрувальних респіраторів на добровольцях із використанням тестового аерозолі хлориду натрію.

Для оцінювання фактичних захисних властивостей фільтрувального респіратору були проведені експериментальні дослідження з використанням тестового аерозолі хлориду натрію [48]. Під час випробувань визначали концентрацію аерозолі в навколишньому середовищі та підмасковому просторі респіратору для різних діапазонів розмірів частинок. На основі отриманих результатів було розраховано експериментальні значення коефіцієнта захисту респіратору, які наведено в табл. 3.27.

Таблиця 3.27

**Експериментальні значення коефіцієнта захисту респіратора для
аерозольних частинок різної дисперсності**

Діапазон розмірів частинок, мкм	Концентрація аерозолю в камері, мг/м ³	Підмаскова концентрація аерозолю, мг/м ³	Похибка вимірювання, %	Коефіцієнт захисту респіратора
< 5	6,895	0,316	10	21,8 ± 2,2
5–10	1,346	0,021	10	63,1 ± 6,3
> 10	0,229	0,002	10	135,0 ± 13,0

Джерело: сформовано автором за результатами експериментальних досліджень [42].

Аналіз наведених у табл. 3.27 результатів свідчить, що коефіцієнт захисту респіратора зростає зі збільшенням розміру аерозольних частинок. Для частинок діаметром понад 10 мкм спостерігаються найвищі значення коефіцієнта захисту, що пояснюється підвищенням ефективності їх осадження та затримання фільтрувальним матеріалом. Отримані експериментальні дані були використані для перевірки адекватності розробленої математичної моделі та подальшого порівняння з результатами теоретичних розрахунків.

Для перевірки достовірності запропонованої математичної моделі було виконано теоретичний розрахунок коефіцієнта захисту респіратора з використанням розроблених залежностей, що враховують процеси осадження аерозольних частинок та особливості дихального циклу.

Отримані експериментальні результати дозволяють оцінити фактичні захисні властивості фільтрувального респіратора в умовах дії аерозолів різної дисперсності. Для перевірки адекватності розробленої математичної моделі було виконано зіставлення експериментально визначених значень коефіцієнта захисту з результатами теоретичних розрахунків, отриманими за удосконаленою моделлю. Таке порівняння дає можливість оцінити ступінь відповідності розрахункових залежностей реальним процесам проникнення та осадження аерозольних частинок у системі «навколишнє середовище – респіратор – органи дихання працівника». Результати порівняння наведено в табл. 3.28.

Таблиця 3.28

**Порівняння експериментальних та розрахункових значень
коефіцієнта захисту респіратора**

Діапазон розмірів частинок, мкм	Розрахунковий КЗР	Експериментальний КЗР	Абсолютне відхилення,±	Відносне відхилення (%),±
< 5	19,1	21,8	+2,7	+12,4
5-10	61,3	63,1	+1,8	+2,9
> 10	142,3	135,0	-7,3	-5,4

Джерело: розраховано автором за даними [42].

Максимальне відносне відхилення між експериментальними та розрахунковими значеннями коефіцієнта захисту не перевищує 12,4 %, а для основної респірабельної фракції частинок (5-10 мкм) становить менше 3 %. Це свідчить про достатню адекватність розробленої математичної моделі та можливість її використання для прогнозування захисної ефективності фільтрувальних респіраторів в умовах виробничого аерозольного навантаження.

Для наочного оцінювання ступеня відповідності між результатами експериментальних досліджень та розрахунками за удосконаленою моделлю виконано їх графічне порівняння (рис. 3.9).

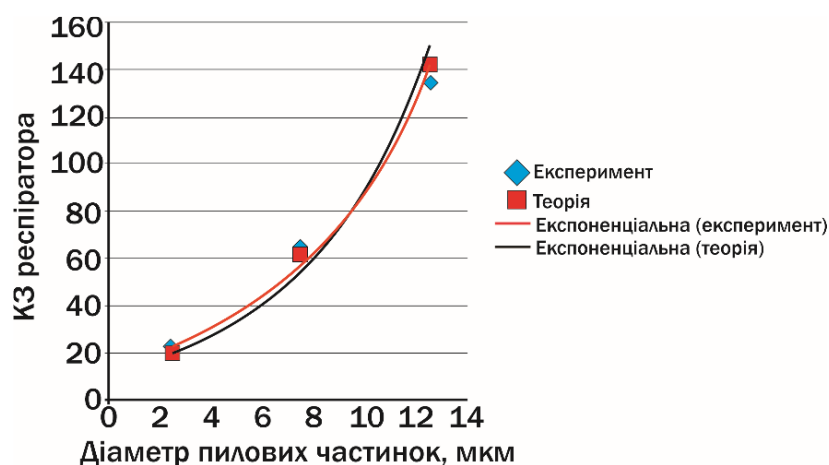


Рис. 3.9. Порівняння експериментальних та теоретичних значень
коефіцієнта захисту респіратора залежно від розміру частинок
аерозолі (за [42])

Порівняння результатів розрахунків показало, що врахування процесів осадження аерозольних частинок забезпечує більш реалістичне визначення підмаскової концентрації аерозолю. При цьому найбільші відмінності між результатами традиційної та удосконаленої моделей спостерігаються для частинок великого аеродинамічного діаметра, для яких процеси інерційного осадження відіграють визначальну роль.

Отримані результати підтвердили, що класичний підхід до визначення коефіцієнта захисту не повною мірою враховує фізичні процеси, які відбуваються під час проникнення аерозолю в підмасковий простір. Запропонована математична модель дозволяє усунути зазначені обмеження шляхом урахування впливу дихального циклу та процесів осадження частинок на різних етапах їх руху [49].

У зв'язку з цим доцільно узагальнити вплив окремих елементів удосконаленої моделі на параметри подальшої інтегральної оцінки ризику (табл. 3.29).

Таблиця 3.29

Використання результатів удосконалення моделі коефіцієнта захисту в інтегральній оцінці професійного ризику

Елемент удосконаленої моделі	Вплив на визначення $K_{Зр}$	Значення для інтегральної моделі ризику
Урахування осадження частинок у зонді	Уточнення вимірної концентрації	Підвищення достовірності вихідних даних
Урахування осадження в підмасковому просторі	Більш точне визначення реальної експозиції	Зменшення похибки оцінки ризику
Урахування осадження в органах дихання	Визначення фактичного надходження аерозолю	Уточнення показника інгалаційного впливу
Урахування циклу вдихання–видихання	Відображення реальних умов експлуатації	Підвищення адекватності оцінки ризику
Визначення уточненої концентрації C_{ia}	Уточнення коефіцієнта захисту	Формування коректного показника ефективності ЗІЗОД
Удосконалений коефіцієнт захисту $K_{Зр}$	Реалістична оцінка захисних властивостей	Один із ключових параметрів інтегральної моделі

Джерело: авторська розробка на основі результатів дослідження [42]

Дані табл. 3.29 свідчать, що запропоноване удосконалення математичної моделі має не лише значення для підвищення точності визначення коефіцієнта захисту респіратора, а й створює основу для подальшого оцінювання професійного ризику в умовах впливу аерозольних забруднень. На відміну від традиційних підходів, удосконалена модель дозволяє враховувати реальний рівень інгаляційної експозиції працівника з урахуванням особливостей проникнення та осадження аерозольних частинок у системі «навколишнє середовище – респіратор – органи дихання».

Урахування зазначених процесів забезпечує більш достовірне визначення ефективності засобів індивідуального захисту органів дихання та дозволяє використовувати уточнений коефіцієнт захисту як один із вхідних параметрів інтегральної моделі оцінювання професійного ризику [50]. Таким чином, результати удосконалення математичної моделі розрахунку коефіцієнта захисту формують науково-методичне підґрунтя для подальшого розроблення інтегрального підходу до оцінювання ризику, в якому ефективність ЗІЗОД розглядається як один із ключових чинників зниження шкідливого впливу виробничих аерозолів на працівника.

Отже, виконано удосконалення математичної моделі визначення коефіцієнта захисту фільтрувального респіратора з урахуванням фізичних процесів, що відбуваються під час проникнення аерозольних частинок до органів дихання працівника. Проведений аналіз показав, що традиційний підхід до визначення коефіцієнта захисту не враховує осадження частинок у пробовідбірній системі, підмасковому просторі та органах дихання, а також особливості циклу вдихання-видихання, що може призводити до завищення оцінки захисної ефективності респіратора.

На основі результатів досліджень, наведених у роботі [42], обґрунтовано доцільність використання системи поправочних коефіцієнтів для врахування втрат аерозольних частинок на різних етапах їх переміщення від навколишнього середовища до органів дихання користувача. Запропоновано уточнений підхід до визначення підмаскової концентрації аерозолі, який

враховує процеси осадження частинок та параметри дихального циклу працівника, що дозволяє більш адекватно відображати реальні умови експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання.

Розроблена удосконалена математична модель забезпечує визначення коефіцієнта захисту на основі уточненої підмаскової концентрації аерозолю та дозволяє підвищити достовірність оцінювання захисних властивостей респіраторів в умовах впливу промислових аерозолів різного дисперсного складу. Результати експериментальної перевірки підтвердили доцільність урахування процесів осадження частинок і динаміки дихання під час оцінювання ефективності ЗІЗОД.

Встановлено, що найбільший вплив на результати розрахунку коефіцієнта захисту мають процеси осадження частинок великого аеродинамічного діаметра та особливості їх переміщення під час вдихання і видихання. Урахування зазначених факторів дозволяє отримувати більш реалістичні значення коефіцієнта захисту та зменшувати невизначеність під час оцінювання інгаляційного ризику працівників.

Отримані результати мають важливе практичне значення для подальшого формування інтегральної моделі оцінювання професійного ризику, оскільки забезпечують уточнення одного з її ключових параметрів — реальної ефективності засобів індивідуального захисту органів дихання. Запропонований підхід створює наукове підґрунтя для більш обґрунтованого прогнозування рівня професійного ризику в умовах впливу аерозольних забруднень та підвищення достовірності оцінювання захисних властивостей ЗІЗОД під час їх експлуатації.

3.4.2 Розроблення програмного комплексу прогнозування захисних властивостей ЗІЗОД

Одним із ключових факторів забезпечення ефективного захисту працівників під час використання фільтрувальних засобів індивідуального

захисту органів дихання є своєчасна заміна протигазових фільтрів після вичерпання їх сорбційної здатності. Невчасна заміна фільтра призводить до проникнення шкідливих хімічних речовин у підмасковий простір та суттєвого зниження рівня захисту працівника [51]. У зв'язку з цим важливого значення набуває визначення часу захисної дії фільтрів за конкретних умов експлуатації.

На сьогодні для оцінювання часу захисної дії протигазових фільтрів застосовуються два основні підходи. Перший базується на використанні індикаторів закінчення строку служби фільтрів, які можуть бути пасивного або активного типу. Пасивні індикатори дозволяють візуально контролювати ступінь відпрацювання фільтра шляхом зміни кольору індикаторного елемента, тоді як активні системи використовують хімічні сенсори та електронні датчики для подачі світлового або звукового сигналу про необхідність заміни фільтра. Проте застосування таких систем має низку обмежень, пов'язаних із конструктивними особливостями розташування датчиків, складністю контролю їх показників під час роботи та можливими похибками визначення моменту вичерпання захисних властивостей фільтра [52].

Другий підхід передбачає використання графіків заміни фільтрів або рекомендацій виробників щодо строків їх експлуатації. У цьому випадку спеціалісти з охорони праці формують регламент заміни фільтрів на підставі нормативних рекомендацій виробника та фактичного часу використання засобів захисту. Однак такий підхід також не забезпечує достатньої точності прогнозування, оскільки більшість рекомендацій виробників базуються на стандартних умовах випробувань і не враховують реальних виробничих факторів, зокрема концентрацію шкідливих речовин у повітрі робочої зони, температуру та вологість повітря, інтенсивність фізичного навантаження працівника та режим його дихання [52].

З огляду на це існує необхідність застосування більш гнучких інструментів оцінювання ресурсу протигазових фільтрів, які дозволяли б

враховувати конкретні умови виробничого середовища та особливості виконуваних робіт. Одним із перспективних напрямів вирішення зазначеної проблеми є використання спеціалізованих програмних засобів для прогнозування часу захисної дії фільтрів.

У відкритому доступі на сьогодні представлені окремі програмні продукти провідних виробників засобів індивідуального захисту органів дихання та профільних наукових організацій, призначені для підбору фільтрів і орієнтовного прогнозування строків їх експлуатації (табл. 3.30).

Таблиця 3.30

Існуючі програмні засоби прогнозування часу захисної дії фільтрів

Розробник	Програмний продукт	Основне призначення
3M (США) [53]	Select and Service Life	Підбір фільтрів та оцінювання часу захисної дії
MSA Safety (США) [54]	Cartridge Life Expectancy Calculator	Розрахунок ресурсу протигазових картриджів
NPPTL CDC (NIOSH, США) [55]	MultiVapor	Багатофакторний прогноз часу захисної дії фільтрів

Джерело: сформовано автором за [53-55]

Аналіз наведених програмних продуктів свідчить, що їх основним призначенням є допомога користувачеві у виборі необхідного типу фільтра та орієнтовне прогнозування часу його експлуатації. Перевагою таких програм є використання актуальних довідкових баз даних виробників та можливість швидкого підбору засобів захисту залежно від типу шкідливої речовини.

Разом із тим існуючі програмні продукти мають низку обмежень. Насамперед вони орієнтовані на типові умови використання фільтрів і не дозволяють повною мірою враховувати особливості конкретного виробництва. У більшості випадків відсутня можливість оцінювання впливу реальної концентрації шкідливих речовин, параметрів мікроклімату, режиму роботи працівника та інших виробничих чинників на тривалість захисної дії фільтра. Унаслідок цього результати розрахунків можуть суттєво відрізнятись від фактичних умов експлуатації [56].

Зазначені недоліки обумовлюють необхідність розроблення спеціалізованого програмного комплексу, який забезпечуватиме прогнозування захисних властивостей ЗІЗОД з урахуванням реальних виробничих умов та дозволитиме використовувати результати розрахунків під час оцінювання професійних ризиків. Саме розробленню такого програмного комплексу присвячено подальші дослідження, наведені в даному підрозділі.

Ефективність прогнозування часу захисної дії протигазових фільтрів значною мірою визначається адекватністю математичної моделі, покладеної в основу розрахунків. Саме тому під час розроблення програмного комплексу було проведено аналіз існуючих підходів до моделювання процесів сорбції шкідливих речовин у фільтрувальних елементах засобів індивідуального захисту органів дихання.

Однією з найбільш відомих моделей є рівняння Wheeler-Jonas, яке широко застосовується для прогнозування часу захисної дії протигазових фільтрів з активованим вугіллям. Перевагою даної моделі є її відносна простота, можливість використання експериментально визначених параметрів сорбенту та достатньо висока точність прогнозування в широкому діапазоні умов експлуатації. У роботах багатьох дослідників зазначається, що рівняння Wheeler-Jonas забезпечує прийнятну збіжність між розрахунковими та експериментальними значеннями часу захисної дії фільтрів навіть за наявності змінних концентрацій шкідливих речовин у повітрі робочої зони [57].

Іншим поширеним підходом є використання моделі Yoon-Nelson, яка базується на описі процесу прориву забруднювача через шар сорбенту за допомогою статистичних параметрів та експериментально визначених констант. Дана модель дозволяє оцінювати момент досягнення певної ймовірності прориву шкідливої речовини через фільтр, однак потребує попереднього визначення параметрів моделі для кожного конкретного типу сорбенту та речовини [58]. У зв'язку з цим її застосування в умовах оперативного прогнозування є більш складним порівняно з моделлю Wheeler-Jonas.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із використанням моделей хвильового перенесення маси, які описують рух фронту адсорбції в шарі гранульованого активованого вугілля. Такі моделі дозволяють більш детально враховувати процеси масообміну та кінетику сорбції, проте потребують значного обсягу вихідних даних і складніших обчислювальних процедур. Практичне використання таких моделей у виробничих умовах часто ускладнюється необхідністю визначення великої кількості параметрів сорбційного процесу [56].

Порівняльний аналіз наведених підходів показав, що для цілей прогнозування часу захисної дії протигазових фільтрів в умовах реального виробництва найбільш доцільним є використання рівняння Wheeler-Jonas. Зазначена модель поєднує достатню точність прогнозування, відносну простоту реалізації та можливість врахування основних характеристик фільтра, сорбенту та шкідливої речовини. Саме тому вона була обрана як математична основа розробленого програмного комплексу.

Розрахунок прогнозного часу захисної дії фільтрів у програмному комплексі здійснюється на основі залежності Wheeler-Jonas, детально розглянутої в п. 2.4.3 (див. формулу (2.6)).

Аналіз структури рівняння Wheeler-Jonas свідчить, що тривалість захисної дії безпосередньо залежить від сорбційної ємності активованого вугілля, маси сорбенту та концентрації шкідливої речовини у повітрі. Водночас модель дозволяє враховувати інтенсивність дихання працівника через параметр витрати повітря, що є особливо важливим під час виконання робіт різної важкості. Саме ця особливість стала підставою для використання рівняння Wheeler-Jonas як базового розрахункового інструменту в розробленому програмному комплексі прогнозування захисних властивостей ЗІЗОД.

Математичною основою розробленого програмного комплексу є модель Wheeler-Jonas (п. 2.4.3.) Зазначена модель використовується для прогнозування часу захисної дії протигазових фільтрів залежно від

характеристик сорбенту, властивостей шкідливої речовини та умов експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання.

У межах програмного комплексу реалізовано алгоритм автоматизованого розрахунку прогностного часу захисної дії фільтра на основі сукупності параметрів, що характеризують як конструкцію фільтра, так і параметри виробничого середовища. До основних розрахункових параметрів належать маса активованого вугілля у фільтрі, сорбційна ємність сорбенту, щільність його пакування, концентрація шкідливої речовини у повітрі робочої зони, витрата повітря через фільтр та допустима проскокова концентрація забруднювача [59].

Маса активованого вугілля визначає загальну кількість сорбенту, що бере участь у процесі поглинання шкідливої речовини. Зі збільшенням маси сорбенту зростає сумарна поглинальна здатність фільтра та відповідно збільшується прогностний час його захисної дії. Важливим параметром також є сорбційна ємність активованого вугілля, яка характеризує максимальну кількість речовини, що може бути поглинута одиницею маси сорбенту.

Щільність пакування сорбенту визначає умови проходження повітряного потоку через шар активованого вугілля та впливає на інтенсивність масообмінних процесів у фільтрі. Концентрація шкідливої речовини в повітрі робочої зони є одним із головних факторів, що визначають швидкість вичерпання ресурсу сорбенту. Зі збільшенням концентрації забруднювача прогностний час захисної дії фільтра закономірно зменшується.

Окрему роль у розрахунках відіграє витрата повітря через фільтр, яка безпосередньо пов'язана з інтенсивністю дихання працівника. Під час виконання робіт різної важкості величина повітряного потоку може суттєво змінюватися, що впливає на швидкість надходження шкідливої речовини до сорбенту та відповідно на тривалість його ефективної роботи. Для оцінювання моменту завершення захисної дії використовується показник проскокової концентрації, який визначає допустимий рівень забруднювача після проходження через фільтр.

Оскільки в технічній документації виробників та міжнародних довідкових базах концентрації шкідливих речовин часто подаються в одиницях ppm, а розрахунки за моделлю Wheeler-Jonas виконуються з використанням масових концентрацій, у програмному комплексі реалізовано автоматичне перетворення концентрацій із ppm у мг/м³. Для цього використовується залежність [57]:

$$Ci = \frac{C_{ppm} \times \mu}{24,055}, \quad (3.15)$$

де Ci – концентрація шкідливої речовини, що розраховується, мг/м³;

C_{ppm} – початкова концентрація шкідливої речовини, ppm;

μ – молярна маса шкідливої речовини, г/моль;

24,055 – молярний об'єм ідеального газу, л/моль.

Використання зазначеного перетворення дозволяє уніфікувати вихідні дані незалежно від форми їх подання та забезпечує коректне використання довідкової інформації про шкідливі речовини під час виконання розрахунків. Таким чином, математичний апарат програмного комплексу поєднує перевірену модель прогнозування часу захисної дії фільтрів із засобами автоматизованої обробки вихідних даних, що створює основу для подальшої реалізації алгоритму роботи програмного забезпечення.

Для забезпечення коректної роботи програмного комплексу та підвищення достовірності прогнозування часу захисної дії протигазових фільтрів необхідним етапом стало визначення параметрів математичної моделі, що використовуються під час розрахунків. Вихідні дані для моделі були отримані шляхом проведення комплексу лабораторних досліджень у випробувальній лабораторії засобів індивідуального захисту органів дихання ТОВ «Стандарт Капітал Інвест» (м. Дніпро). Експериментальні дослідження виконувалися відповідно до вимог ДСТУ EN 14387:2021 щодо випробування протигазових та комбінованих фільтрів [60].

У процесі досліджень визначалися основні фізичні характеристики фільтрів та сорбентів, необхідні для реалізації математичної моделі Wheeler-Jonas у програмному середовищі. До таких параметрів належали маса активованого вугілля, геометричні характеристики фільтрів, щільність пакування сорбенту, витрата повітря через фільтр, а також параметри навколишнього середовища, зокрема температура та відносна вологість повітря [56].

Маса активованого вугілля у фільтрах визначалась методом прямого зважування на електронних вагах. Отримані значення використовувалися для подальшого розрахунку сорбційної ємності та прогнозного часу захисної дії фільтра. Геометричні параметри корпусів фільтрів визначалися шляхом вимірювання їх основних розмірів із використанням електронного штангенциркуля. На основі отриманих даних розраховувалися внутрішній об'єм фільтра та щільність пакування активованого вугілля [56].

Особлива увага приділялася контролю витрати повітря через фільтр, оскільки саме цей параметр безпосередньо впливає на швидкість вичерпання ресурсу сорбенту. Витрата повітря контролювалася за допомогою ротаметра та надалі використовувалася як один із ключових параметрів під час моделювання різних режимів роботи користувача. Додатково під час випробувань здійснювався контроль температури та відносної вологості повітря, що дозволяло враховувати вплив зовнішніх умов на процеси адсорбції шкідливих речовин активованим вугіллям [56].

Основні параметри, визначені під час експериментальних досліджень та використані для формування бази даних програмного комплексу, наведено в табл. 3.31.

Для перевірки адекватності математичної моделі та визначення фактичного часу захисної дії фільтрів використовувався спеціалізований стенд для оцінювання поглинальної здатності протигазових фільтрів. Принцип роботи стенда полягав у подачі до випробувальної камери контрольованої концентрації тестової речовини та безперервному контролі концентрації забруднювача після проходження через фільтр.

Таблиця 3.31

**Експериментально визначені параметри, використані для
налаштування математичної моделі програмного комплексу**

Параметр	Метод визначення	Засіб вимірювання
Маса активованого вугілля	Пряме зважування	Електронні ваги СВА-300-0,005
Геометричні параметри фільтра	Лінійні вимірювання	Електронний штангенциркуль Siltek
Щільність пакування сорбенту	Розрахунковий метод	За результатами вимірювань маси та об'єму
Витрата повітря через фільтр	Контроль повітряного потоку	Ротаметр РМ-2,5 ГУЗ
Температура повітря	Пряме вимірювання	Термогігрометр TFA 35110201
Відносна вологість повітря	Пряме вимірювання	Термогігрометр TFA 35110201
Час захисної дії фільтра	Лабораторні випробування	Стенд визначення поглинальної здатності

Джерело: сформовано автором за [56].

Момент появи проскокової концентрації приймався за завершення часу захисної дії фільтра. Такий підхід дозволив отримати експериментальні значення, необхідні для подальшої верифікації розробленого програмного комплексу [56].

Отримані експериментальні параметри були використані для наповнення бази даних програмного комплексу та налаштування його розрахункового модуля. Це забезпечило можливість прогнозування часу захисної дії протигазових фільтрів з урахуванням реальних характеристик сорбентів, конструктивних особливостей фільтрів та умов їх експлуатації.

Одним із ключових етапів розроблення програмного комплексу прогнозування захисних властивостей засобів індивідуального захисту органів дихання стало формування його функціональної структури. Під час проєктування програмного забезпечення основну увагу було приділено забезпеченню зручності використання, можливості оперативного введення вихідних даних, автоматизації розрахунків та наочному поданню результатів прогнозування.

Аналіз алгоритму визначення часу захисної дії проти газових фільтрів показав, що процес прогнозування включає декілька взаємопов'язаних етапів: збір та обробку вихідної інформації, збереження довідкових даних, виконання математичних розрахунків та відображення результатів користувачу. Відповідно до цього структура програмного комплексу була реалізована у вигляді чотирьох функціональних модулів, взаємодія яких забезпечує повний цикл прогнозування захисних властивостей фільтрів [56].

До складу програмного комплексу входять:

- модуль введення початкових даних;
- модуль пам'яті;
- модуль обчислення часу захисної дії;
- модуль візуалізації результатів.

Функціональну структуру розробленого програмного комплексу наведено на рис. 3.10.

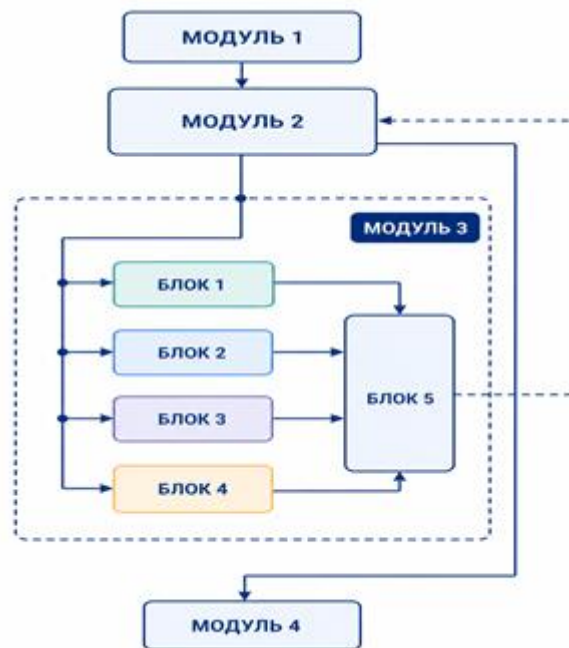


Рис. 3.10 Структурно-функціональна схема програмного комплексу прогнозування захисних властивостей проти газових фільтрів:

модуль 1 – введення початкових даних; модуль 2 – формування та зберігання масиву даних і специфікацій; модуль 3 – обчислення та аналіз даних, який включає: блок 1 – формування масиву даних про небезпечні хімічні речовини; блок 2 – формування характеристик типу виконуваних робіт; блок 3 – вибір типу фільтра; блок 4 – перерахунок концентрацій шкідливих речовин; блок 5 – розрахунок прогнозованого часу захисної дії фільтра; модуль 4 – виведення та візуалізація результатів розрахунку.

Джерело: наведено автором за матеріалами дослідження [56]

Модуль введення початкових даних призначений для внесення користувачем інформації про шкідливу речовину, її концентрацію в повітрі робочої зони, параметри навколишнього середовища та характеристики фільтра. Саме на цьому етапі формується сукупність вихідних параметрів, необхідних для виконання подальших розрахунків.

Модуль пам'яті забезпечує збереження та обробку довідкової інформації щодо фізико-хімічних властивостей шкідливих речовин, характеристик сорбентів та конструктивних параметрів протигазових фільтрів. Використання окремого модуля пам'яті дозволяє мінімізувати обсяг інформації, яку необхідно вводити користувачу вручну, та підвищує оперативність виконання розрахунків.

Основним елементом програмного комплексу є модуль обчислення часу захисної дії, у якому реалізовано математичний апарат прогнозування ресурсу фільтрів на основі моделі Wheeler-Jonas. Модуль здійснює автоматичне перетворення вихідних даних, розрахунок необхідних параметрів та визначення прогнозного часу захисної дії за заданих умов експлуатації.

Модуль візуалізації забезпечує подання результатів розрахунків у зручній для користувача формі. Результати можуть відображатися у вигляді числових значень, таблиць та графічних залежностей, що дозволяє оперативно оцінювати вплив зміни концентрації шкідливої речовини або режиму роботи працівника на ресурс фільтра [56].

Запропонована модульна структура програмного комплексу забезпечує можливість подальшого розширення функціоналу програмного забезпечення, зокрема шляхом включення додаткових математичних моделей, нових типів фільтрів та інтеграції з системами оцінювання професійних ризиків. Такий підхід створює основу для використання програмного комплексу не лише як інструменту прогнозування часу захисної дії фільтрів, а й як елемента комплексної системи підтримки прийняття рішень у сфері охорони праці.

Після формування функціональної структури програмного комплексу було розроблено алгоритм його роботи, який визначає послідовність обробки

інформації від моменту введення вихідних даних до отримання результатів прогнозування часу захисної дії фільтра. Алгоритм реалізує логіку прийняття рішень щодо вибору засобу захисту та забезпечує автоматизоване виконання розрахунків на основі математичної моделі Wheeler-Jonas [56,57].

Основною метою алгоритму є забезпечення оперативного прогнозування захисних властивостей протигазових фільтрів залежно від характеристик виробничого середовища та умов експлуатації ЗІЗОД. Для наочного відображення послідовності роботи програмного комплексу основні етапи алгоритму систематизовано в табл. 3.32.

Таблиця 3.32

Основні етапи роботи програмного комплексу

Етап	Зміст
1	Аналіз небезпеки
2	Введення вихідних даних
3	Вибір типу фільтра
4	Розрахунок часу захисної дії
5	Формування результатів

Джерело: сформовано автором на основі алгоритму роботи програмного комплексу, наведеного у [56].

Дані табл. 3.32 свідчать, що алгоритм роботи програмного комплексу охоплює весь цикл прийняття рішень щодо використання протигазових фільтрів. На першому етапі виконується аналіз виробничої небезпеки та ідентифікація шкідливої речовини, від впливу якої необхідно забезпечити захист працівника. Після цього користувач вводить вихідні параметри, необхідні для розрахунків, зокрема концентрацію забруднювача, характеристики фільтра та умови експлуатації.

На третьому етапі здійснюється вибір відповідного типу фільтра залежно від фізико-хімічних властивостей небезпечної речовини. Далі програмний комплекс автоматично виконує розрахунок прогнозного часу захисної дії із використанням реалізованої математичної моделі. Завершальним етапом є формування та відображення результатів розрахунків у зручній для користувача формі [56].

Запропонований алгоритм забезпечує послідовну обробку інформації та мінімізує ймовірність помилок під час визначення ресурсу протигазових фільтрів. Крім того, його структура дозволяє легко адаптувати програмний комплекс до нових типів фільтрів, небезпечних речовин та умов експлуатації. Це створює передумови для використання програмного забезпечення не лише як інструменту прогнозування часу захисної дії, а й як складової системи підтримки прийняття рішень у сфері управління професійними ризиками.

Після формування математичного апарату та алгоритму роботи програмного комплексу було виконано його програмну реалізацію. Основною метою розроблення програмного забезпечення стало створення інструменту, який дозволяє автоматизувати процес прогнозування часу захисної дії протигазових фільтрів та забезпечує можливість оперативного аналізу впливу різних виробничих факторів на ефективність засобів індивідуального захисту органів дихання.

Для реалізації програмного комплексу було використано мову програмування Python 3.8, яка є однією з найбільш поширених мов розробки інженерних та наукових застосунків. Вибір Python обумовлений наявністю широкого набору математичних бібліотек, зручністю реалізації розрахункових алгоритмів та можливістю подальшого розширення функціоналу програмного забезпечення. Розроблення програмного коду та налагодження програмного комплексу здійснювалися у середовищі Visual Studio Code, яке забезпечує зручні засоби редагування, тестування та супроводу програмних проєктів [61].

Програмний комплекс реалізує алгоритм прогнозування часу захисної дії фільтрів на основі математичної моделі Wheeler-Jonas та забезпечує автоматичне виконання необхідних розрахунків після введення користувачем вихідних параметрів. У процесі роботи програми здійснюється обробка введених даних, виконуються необхідні перетворення одиниць вимірювання, визначаються параметри математичної моделі та розраховується прогнозний час захисної дії фільтра за заданих умов експлуатації.

Особлива увага під час розроблення програмного комплексу приділялася створенню зручного користувацького інтерфейсу. Інтерфейс програми забезпечує введення характеристик шкідливої речовини, параметрів фільтра та умов експлуатації, а також відображення результатів розрахунків у зрозумілій для користувача формі. Це дозволяє використовувати програмний комплекс як фахівцям з охорони праці, так і працівникам, відповідальним за вибір та експлуатацію засобів індивідуального захисту органів дихання.

Інтерфейс забезпечує введення вихідних параметрів, вибір типу шкідливої речовини, автоматичне виконання розрахунків та відображення результатів прогнозування. Реалізований підхід дозволяє мінімізувати час підготовки вихідних даних та спрощує використання програмного комплексу в практичній діяльності фахівців з охорони праці [56].

Розроблений програмний комплекс дозволяє оперативно оцінювати вплив концентрації шкідливих речовин, характеристик сорбенту та режиму експлуатації на ресурс протигазового фільтра. Використання автоматизованих розрахунків суттєво скорочує час прийняття рішень щодо вибору фільтра та визначення періодичності його заміни порівняно з традиційними довідковими методами.

Реалізація програмного комплексу створила практичну основу для подальшої перевірки працездатності розробленого алгоритму та проведення серії розрахункових експериментів щодо прогнозування часу захисної дії фільтрів за різних умов використання. Отримані результати наведено в наступному підрозділі.

Після завершення програмної реалізації було виконано серію розрахункових експериментів, спрямованих на оцінювання працездатності розробленого програмного комплексу та аналіз впливу концентрації шкідливих речовин на тривалість захисної дії протигазових фільтрів. Моделювання проводилося для найбільш поширених типів фільтрів ФРПА-G A1, ФРПА-G B1 та ФРПА-G K1, призначених для захисту від органічних парів, кислих газів та аміаку відповідно [56].

Розрахунки виконувалися на основі математичної моделі Wheeler-Jonas з використанням параметрів сорбенту та характеристик фільтрів, визначених під час експериментальних досліджень. Основною метою моделювання було встановлення закономірностей зміни прогнозного часу захисної дії залежно від концентрації шкідливої речовини в повітрі робочої зони [56].

Для оцінювання практичного значення результатів моделювання важливим є не лише визначення прогнозного часу захисної дії фільтрів, а й встановлення можливостей використання отриманих результатів під час оцінювання професійного ризику. Розроблений програмний комплекс дозволяє прогнозувати зміну захисних властивостей фільтрів залежно від концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони, що створює основу для обґрунтованого планування термінів заміни фільтрів та підвищення ефективності застосування ЗІЗОД. Для узагальнення результатів моделювання та визначення їх ролі в системі оцінювання професійного ризику результати проведених розрахунків систематизовано в табл. 3.33.

Таблиця 3.33

**Використання результатів прогнозування часу захисної дії
фільтрів під час оцінювання професійного ризику**

Тип фільтра	Шкідлива речовина	Результат моделювання	Значення для оцінки ризику
ФРПА-G A1	Циклогексан	Зменшення ресурсу при зростанні концентрації	Уточнення періодичності заміни фільтра
ФРПА-G B1	Діоксид сірки	Висока залежність ресурсу від умов експлуатації	Зниження ризику прориву забруднювача
ФРПА-G K1	Аміак	Необхідність оперативного контролю ресурсу	Підвищення надійності респіраторного захисту

Джерело: авторське узагальнення результатів моделювання за [56].

Дані табл. 3.33 свідчать, що результати прогнозування часу захисної дії протигазових фільтрів мають безпосереднє практичне значення для забезпечення безпечних умов праці. Встановлено, що зі збільшенням концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони ресурс фільтрів закономірно зменшується, що потребує своєчасного коригування режимів їх експлуатації та періодичності заміни. Використання розробленого програмного комплексу дозволяє враховувати ці закономірності під час

планування заходів із захисту працівників та забезпечує більш обґрунтоване визначення залишкового ризику після застосування ЗІЗОД.

Особливого значення набуває можливість інтеграції результатів прогнозування до загальної системи оцінювання професійного ризику, оскільки час захисної дії фільтра безпосередньо впливає на ефективність респіраторного захисту працівника в умовах дії небезпечних хімічних речовин. Отримані результати підтверджують доцільність використання програмного комплексу як інструменту підтримки прийняття рішень щодо вибору, експлуатації та своєчасної заміни протигазових фільтрів у виробничих умовах.

Для підтвердження коректності реалізації математичної моделі у розробленому програмному комплексі проведено його верифікацію шляхом порівняння результатів прогнозування часу захисної дії протигазових фільтрів із результатами, отриманими за допомогою спеціалізованих програмних продуктів 3M Select and Service Life та MSA Cartridge Life Expectancy Calculator, які широко застосовуються для прогнозування часу захисної дії протигазових фільтрів у промислових умовах [53–56].

Порівняння здійснювали за однакових вихідних даних, що включали характеристики небезпечної речовини, її концентрацію, тип протигазового фільтра та умови експлуатації. Такий підхід забезпечив об'єктивне порівняння результатів розрахунку незалежно від особливостей реалізації математичної моделі у різних програмних продуктах. Узагальнені результати верифікації наведено в табл. 3.34.

Таблиця 3.34

Результати порівняльної верифікації розробленого програмного комплексу

Показник	Результат
Порівнювані програмні продукти	3M Select and Service Life, MSA Cartridge Life Expectancy Calculator
Максимальне відносне відхилення	не більше 10 %
Висновок	Розроблений програмний комплекс забезпечує прогнозування часу захисної дії фільтрів із достатньою точністю

Джерело: сформовано автором за результатами верифікації програмного комплексу [53-56].

Аналіз наведених у табл. 3.34 результатів показує, що розраховані значення часу захисної дії, отримані за допомогою розробленого програмного комплексу, мають високу збіжність із результатами спеціалізованих програмних продуктів. При цьому найбільше відхилення між порівнюваними результатами не перевищує 10 %, що свідчить про достатню точність реалізації математичної моделі.

Слід зазначити, що метою проведеної верифікації було не підтвердження математичної моделі Wheeler-Jonas, яка є загальновизнаною і широко застосовується для прогнозування часу захисної дії сорбційних фільтрів, а перевірка правильності її програмної реалізації та працездатності розробленого програмного комплексу.

Таким чином, результати верифікації підтверджують коректність програмної реалізації математичної моделі Wheeler-Jonas. Максимальне відносне відхилення результатів прогнозування не перевищує 10 %, що свідчить про достатню точність розрахунків та можливість практичного використання розробленого програмного комплексу у виробничих умовах.

На відміну від існуючих програмних засобів, які переважно орієнтовані на визначення часу захисної дії окремих типів протигазових фільтрів, розроблений програмний комплекс розглядається в межах даного дисертаційного дослідження як елемент системи оцінювання професійного ризику під час використання засобів індивідуального захисту органів дихання. Його практичне значення полягає не лише у визначенні прогнозованого часу захисної дії фільтра, а й у можливості оцінювання залишкового рівня захисту працівника в процесі виконання виробничих операцій.

Розроблений програмний комплекс дозволяє прогнозувати залишковий час захисної дії протигазових фільтрів залежно від концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони, режиму роботи працівника та характеристик фільтрувального елемента. Завдяки цьому з'являється можливість своєчасно визначати момент наближення до вичерпання захисних властивостей фільтра

та запобігати його використанню після завершення ефективного строку служби.

Особливого значення набуває можливість використання результатів прогнозування під час інтегрального оцінювання професійного ризику. У межах дисертаційного дослідження час захисної дії фільтра розглядається як один із параметрів, що характеризують ефективність засобу індивідуального захисту органів дихання. Зменшення прогнозованого часу захисної дії фільтра призводить до зростання ймовірності проникнення шкідливих речовин у підмасковий простір та, відповідно, до підвищення рівня професійного ризику для працівника.

Використання програмного комплексу дозволяє перейти від регламентованих або довідкових строків заміни фільтрів до їх прогнозування з урахуванням фактичних умов експлуатації. Це забезпечує більш обґрунтоване планування заходів із захисту працівників та підвищує достовірність оцінювання залишкового ризику після застосування ЗІЗОД.

Таким чином, розроблений програмний комплекс може бути використаний як інструмент підтримки прийняття рішень щодо вибору, експлуатації та своєчасної заміни протигазових фільтрів у виробничих умовах. Отримані результати створюють підґрунтя для подальшого формування інтегральної моделі оцінювання професійного ризику, у якій ефективність засобів індивідуального захисту органів дихання визначається з урахуванням фактичних захисних властивостей фільтрувальних елементів та реальних умов експлуатації.

Для узагальнення отриманих результатів та визначення їх значення для подальшого розвитку методів оцінювання ефективності засобів індивідуального захисту органів дихання доцільно систематизувати основні наукові та практичні результати, отримані в підрозділі 3.4. Узагальнення результатів дослідження наведено в табл. 3.35.

Таблиця 3.35

**Узагальнення результатів удосконалення математичних моделей
та розроблення програмного забезпечення для оцінювання
ефективності ЗІЗОД**

Напрямок дослідження	Основний результат	Практичне значення
Удосконалення математичної моделі визначення коефіцієнта захисту респіратора	Запропоновано уточнений підхід до визначення підмаскової концентрації аерозолі з урахуванням процесів осадження частинок та особливостей дихального циклу	Підвищення достовірності оцінювання фактичної ефективності респіраторного захисту
Експериментальна перевірка удосконаленої моделі	Підтверджено відповідність результатів моделювання експериментальним даним	Можливість практичного використання моделі для оцінювання ефективності ЗІЗОД
Розроблення програмного комплексу прогнозування захисних властивостей ЗІЗОД	Реалізовано програмний комплекс для автоматизованого прогнозування часу захисної дії протигазових фільтрів	Підвищення оперативності та обґрунтованості прийняття рішень щодо експлуатації ЗІЗОД
Верифікація програмного комплексу	Встановлено, що відносна похибка прогнозування не перевищує 10 % порівняно з програмними продуктами провідних виробників	Підтвердження достовірності розрахунків та можливості практичного застосування
Використання результатів у системі оцінювання професійного ризику	Обґрунтовано можливість врахування коефіцієнта захисту та часу захисної дії фільтрів під час інтегрального оцінювання професійного ризику	Формування науково-методичної основи для подальшого удосконалення систем управління професійними ризиками

Джерело: сформовано автором за результатами досліджень

Дані табл. 3.35 свідчать, що виконані дослідження охоплюють як удосконалення математичного апарату оцінювання ефективності респіраторного захисту, так і створення інструментальних засобів для практичного прогнозування захисних властивостей ЗІЗОД. Запропонована математична модель дозволяє більш точно визначати фактичний рівень захисту працівника від аерозольних забруднювачів, а розроблений програмний комплекс забезпечує прогнозування ресурсу протигазових фільтрів з урахуванням умов їх експлуатації.

У сукупності отримані результати створюють науково-методичне підґрунтя для переходу від окремого оцінювання характеристик ЗІЗОД до комплексного врахування їх ефективності під час інтегрального оцінювання професійного ризику. Це забезпечує більш обґрунтоване визначення залишкового ризику після застосування засобів індивідуального захисту та створює основу для подальшого вдосконалення систем управління безпекою праці.

3.5. Розроблення інтегральної моделі оцінки професійних ризиків з урахуванням економічних критеріїв та принципів безперервного вдосконалення

3.5.1 Економічне обґрунтування вибору ЗІЗОД у складі інтегральної моделі оцінки професійних ризиків

У попередніх підрозділах третього розділу було розглянуто комплекс взаємопов'язаних заходів, спрямованих на підвищення ефективності засобів індивідуального захисту органів дихання. Зокрема, удосконалено підходи до оцінювання впливу людського фактора на виникнення небезпечних подій, розроблено методичні підходи до ідентифікації ризиків під час вибору та експлуатації ЗІЗОД, запропоновано конструктивні удосконалення елементів респіратора, а також удосконалено математичну модель визначення коефіцієнта захисту та розроблено програмний комплекс прогнозування захисних властивостей фільтрів. Разом із тим підвищення рівня захисту працівника повинно оцінюватися не лише з позицій безпеки, але й з урахуванням економічної доцільності впроваджуваних рішень.

Сучасна концепція управління професійними ризиками базується на принципі досягнення максимально можливого рівня безпеки за умови раціонального використання наявних ресурсів. Практика свідчить, що підвищення ефективності засобів захисту майже завжди супроводжується

збільшенням витрат на їх придбання, експлуатацію та технічне обслуговування. Водночас недостатній рівень захисту призводить до зростання ризику професійних захворювань, виробничого травматизму та пов'язаних із ними економічних втрат. Тому під час вибору засобів індивідуального захисту органів дихання необхідно забезпечити оптимальне співвідношення між витратами на захисні заходи та можливими збитками від реалізації професійних ризиків.

З позицій ризик-орієнтованого підходу економічна ефективність заходів захисту визначається не абсолютною величиною витрат на їх впровадження, а сумарним економічним результатом, який досягається внаслідок зниження ризику несприятливих подій. У загальному випадку задача вибору найбільш доцільного варіанта захисту може бути представлена як задача мінімізації сумарних витрат і збитків [62]:

$$F = B + Z \rightarrow \min, \quad (3.16)$$

де B – витрати на реалізацію заходів захисту;

Z – очікувані збитки від реалізації небезпечних подій.

Наведена залежність відображає загальний принцип економічного обґрунтування заходів безпеки, відповідно до якого під час вибору засобів індивідуального захисту необхідно забезпечити мінімізацію сумарних витрат на захист та очікуваних збитків від реалізації професійних ризиків. При цьому недостатні витрати на захисні заходи можуть призводити до зростання професійної захворюваності та виробничого травматизму, тоді як надмірне збільшення витрат не завжди супроводжується пропорційним підвищенням рівня безпеки. Тому раціональний вибір ЗІЗОД повинен здійснюватися на основі комплексного врахування як технічних характеристик засобів захисту, так і економічних наслідків їх застосування [63].

Економічна складова вибору засобів індивідуального захисту органів дихання є важливим елементом системи управління професійними ризиками,

оскільки дозволяє враховувати не лише технічні характеристики засобів захисту, а й економічні наслідки їх використання. Теоретичні засади формування інтегрального економічного критерію вибору ЗІЗОД, а також складові витрат і можливих економічних втрат детально розглянуто в підрозділі 2.5. У межах даного дослідження зазначений підхід використовується як одна зі складових інтегральної моделі оцінки професійних ризиків.

Для подальшого включення економічної складової до інтегральної моделі оцінки професійних ризиків використовується комплексний економічний критерій, який враховує витрати на придбання та експлуатацію засобів захисту, можливі наслідки професійних захворювань, втрати продуктивності праці та економічні наслідки нещасних випадків: $F = B_{\Pi} + E_O + E_H + E_{\Pi} + E_B \rightarrow \min$ (див. формулу 2.7).

На відміну від підрозділу 2.5, де основна увага приділялася теоретичному обґрунтуванню зазначеного критерію та аналізу його складових, у даному підрозділі він розглядається як інструмент інтеграції економічних показників до системи оцінювання професійного ризику та подальшого обґрунтування вибору найбільш ефективного варіанта ЗІЗОД. У зв'язку з цим подальші дослідження спрямовані на аналіз окремих складових економічного критерію та визначення їх впливу на результати інтегральної оцінки професійних ризиків.

При застосуванні інтегрального економічного критерію порівняння здійснюється лише для тих варіантів ЗІЗОД, які задовольняють установленим нормативним, технічним та експлуатаційним вимогам. Зокрема, розглядаються лише засоби індивідуального захисту органів дихання, що відповідають умовам виробничого середовища, забезпечують необхідний рівень захисту та прогнозований час захисної дії відповідно до характеру виконуваних робіт. За цих умов оптимальним вважається варіант ЗІЗОД, для якого значення інтегрального економічного критерію є мінімальним. Таким

чином, порівняння альтернатив здійснюється не серед усіх можливих варіантів, а лише серед допустимих, що відповідають зазначеним вимогам.

Однією з основних складових інтегрального економічного критерію є витрати на придбання та експлуатацію засобів індивідуального захисту органів дихання. Величина цих витрат залежить від конструктивного виконання респіратора, терміну його служби, необхідності заміни окремих елементів та інтенсивності використання в процесі виробничої діяльності. У зв'язку з цим для обґрунтованого порівняння різних типів ЗІЗОД необхідно враховувати не лише їх початкову вартість, але й сукупні витрати протягом усього періоду експлуатації [63].

У роботі [64] витрати на придбання та експлуатацію засобів індивідуального захисту органів дихання запропоновано визначати за залежністю:

$$B_n = \frac{B_p}{T} + n_\phi B_\phi, \quad (3.17)$$

де B_p – вартість респіратора, грн;

T – термін експлуатації, роки;

n_ϕ – кількість змінних фільтрів, що використовуються протягом року шт.;

B_ϕ – вартість одного фільтра, грн.

Наведена залежність дозволяє врахувати особливості експлуатації різних типів засобів індивідуального захисту органів дихання. Для одноразових фільтрувальних півмасок витрати на придбання безпосередньо залежать від кількості виробів, необхідних для забезпечення працівника протягом визначеного періоду часу. У випадку багаторазових респіраторів доцільно враховувати термін служби лицьової частини, що дозволяє розподілити початкові витрати на весь період експлуатації.

Особливе значення мають витрати, пов'язані із заміною протигазових або протиаерозольних фільтрів. Саме фільтрувальні елементи є основним витратним компонентом багаторазових ЗІЗОД, а їх ресурс безпосередньо

залежить від концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони, умов праці та інтенсивності використання засобу захисту. Тому навіть за однакової вартості лицьової частини різні типи респіраторів можуть суттєво відрізнятися за загальними експлуатаційними витратами [63].

Крім того, тривалість використання багаторазового респіратора визначається не лише нормативним терміном служби виробу, але й умовами його експлуатації, якістю догляду та своєчасністю заміни окремих елементів конструкції. У зв'язку з цим оцінювання витрат на придбання та експлуатацію повинно здійснюватися з урахуванням фактичних умов використання ЗІЗОД на конкретному підприємстві.

Таким чином, витрати на придбання та експлуатацію є важливою складовою економічного критерію вибору засобів індивідуального захисту органів дихання. Разом із тим їх величина не може розглядатися як єдиний критерій прийняття рішення, оскільки дешевші засоби захисту не завжди забезпечують необхідний рівень безпеки працівника. Тому для економічно обґрунтованого вибору ЗІЗОД необхідно додатково враховувати можливі наслідки професійних захворювань, що виникають унаслідок недостатньої ефективності захисту органів дихання.

Важливою складовою економічного критерію вибору засобів індивідуального захисту органів дихання є оцінювання економічних наслідків професійних захворювань, які можуть виникати внаслідок недостатньої ефективності захисту працівника від впливу шкідливих виробничих чинників. На відміну від витрат на придбання та експлуатацію ЗІЗОД, які можуть бути визначені безпосередньо, професійне захворювання має імовірнісний характер. Його виникнення залежить від багатьох факторів, зокрема рівня запиленості повітря робочої зони, тривалості впливу шкідливих речовин, індивідуальних особливостей працівника та ефективності застосовуваних засобів захисту [65].

У зв'язку з цим оцінювання економічних наслідків професійної захворюваності доцільно здійснювати на основі ризик-орієнтованого підходу,

який передбачає врахування ймовірності виникнення захворювання та очікуваних економічних збитків від його реалізації. У роботі [64] економічні наслідки професійних захворювань запропоновано визначати за залежністю:

$$E_n = p_i Z_{oc} \quad (3.18)$$

де p_i – ймовірність виникнення професійного захворювання;

Z_{oc} – очікувані економічні збитки від одного випадку професійного захворювання.

Для визначення ймовірності виникнення професійного захворювання використовується залежність [66]:

$$p_i = \frac{10^{-6} v k C_{mp} t N}{\Pi_{кр}}, \quad (3.19)$$

де v – легенева вентиляція працівника, м³/год;

k – коефіцієнт проникнення пилу через засіб захисту;

C_{mp} – максимально разова концентрація пилу в повітрі робочої зони, мг/м³;

t – тривалість робочої зміни, год;

N – кількість робочих змін за період трудової діяльності;

$\Pi_{кр}$ – критичне пилове навантаження, мг.

Критичне пилове навантаження визначається за формулою [63]:

$$\Pi_{кр} = 145 C_{зdk} \quad (3.20)$$

де $C_{зdk}$ – гранично допустима концентрація пилу в повітрі робочої зони, мг/м³.

Оскільки рівень ризику безпосередньо залежить від ефективності застосовуваного респіратору, коефіцієнт проникнення пилу визначається через коефіцієнт захисту засобу індивідуального захисту органів дихання [63]:

$$k = \frac{1}{K_{зр}}, \quad (3.21)$$

де $K_{зр}$ – коефіцієнту захисту респіратору.

Підставляючи наведені залежності у формулу економічних наслідків професійного захворювання та враховуючи значення очікуваних економічних збитків, у роботі [64] отримано узагальнений вираз:

$$E_H = \frac{0,014VC_{мр}tN}{K_{зр}C_{гдк}}. \quad (3.22)$$

Отримана залежність дозволяє кількісно оцінити вплив захисних властивостей респіратору на економічні наслідки професійної захворюваності. Аналіз формули показує, що економічні втрати зростають зі збільшенням концентрації пилу в повітрі робочої зони, тривалості впливу шкідливого фактора та інтенсивності легеневої вентиляції працівника. Водночас підвищення коефіцієнта захисту респіратору призводить до зменшення ризику професійного захворювання і, відповідно, до зниження очікуваних економічних втрат.

Таким чином, коефіцієнт захисту респіратору впливає не лише на рівень безпеки працівника, а й безпосередньо визначає економічну ефективність використання засобів індивідуального захисту органів дихання. Саме тому показник $K_{зр}$, удосконалений у підрозділі 3.4, надалі використовується як один із ключових параметрів інтегральної моделі оцінки професійних ризиків. Отриманий висновок свідчить, що зі збільшенням коефіцієнта захисту респіратору економічні наслідки професійної захворюваності зменшуються, що підтверджує доцільність врахування ефективності ЗІЗОД під час прийняття управлінських рішень у сфері охорони праці.

Поряд із ризиком виникнення професійних захворювань важливою складовою економічного обґрунтування вибору засобів індивідуального захисту органів дихання є оцінювання їх впливу на працездатність працівників. Використання респіратору забезпечує зниження впливу

шкідливих виробничих факторів, однак одночасно створює додатковий опір диханню, який збільшує фізіологічне навантаження на організм людини. Зі зростанням опору диханню погіршується газообмін, підвищується енергетична вартість виконання роботи та прискорюється розвиток втоми. У результаті цього можливе зниження продуктивності праці працівників, що також повинно враховуватися під час вибору засобів захисту [63].

Для оцінювання впливу опору диханню на працездатність працівника у роботі [67] використано залежність, запропоновану Caretti, яка встановлює зв'язок між продуктивністю праці та опором диханню респіратора:

$$Y = 100 - 5.08X, \quad (3.23)$$

де Y – продуктивність праці працівника, % від номінальної;

X – опір диханню респіратора, кПа.

Наведена залежність свідчить, що зі збільшенням опору диханню продуктивність праці зменшується практично лінійно. Таким чином, використання респіраторів із високим аеродинамічним опором може призводити до додаткових економічних втрат навіть за умови забезпечення високого рівня захисту органів дихання.

Для кількісного врахування впливу респіраторів на продуктивність праці необхідно оцінити можливе зниження працездатності працівників залежно від важкості виконуваних робіт та умов виробничого середовища. Аналіз результатів досліджень, наведених у роботах [68-70], показав, що величина втрати працездатності суттєво залежить не лише від опору диханню респіратора, а й від рівня фізичного навантаження та параметрів мікроклімату. Узагальнені значення втрати працездатності для умовного респіратора з опором фільтра 100 Па наведено в табл. 3.36. Саме ці дані надалі використовуються як базові під час розрахунку економічних наслідків, пов'язаних зі зниженням продуктивності праці працівників при використанні ЗІЗОД.

Таблиця 3.36

**Втрата працездатності працівників при використанні респіраторів
залежно від характеру роботи та умов мікроклімату [64]**

Характер роботи	Втрата працездатності, %	
	за оптимальних та допустимих параметрів мікроклімату	за шкідливих умов праці
Легкі роботи	5	10
Роботи середньої важкості	10	25
Важкі роботи	25	50

Наведені в табл. 3.36 дані свідчать, що зі збільшенням важкості виконуваної роботи та погіршенням параметрів виробничого середовища негативний вплив респіатора на працездатність працівника суттєво посилюється. Якщо для легких робіт втрата працездатності є відносно незначною, то під час виконання важких робіт за шкідливих мікрокліматичних умов вона може досягати 50 %. Це підтверджує необхідність врахування не лише захисних властивостей респіатора, але й його аеродинамічного опору під час економічного обґрунтування вибору ЗІЗОД. Для адаптації наведених значень до конкретного типу респіатора необхідно врахувати фактичний опір диханню фільтра, що реалізується за допомогою подальших розрахункових залежностей.

Дані табл. 3.36 характеризують граничні значення втрати працездатності працівників залежно від характеру виконуваних робіт та умов праці. Для подальших економічних розрахунків доцільно використовувати середнє значення втрати працездатності, яке визначається як середнє арифметичне мінімального та максимального значень для відповідної категорії робіт [69]:

$$P_c = 0.5(P_n + P_{\max}). \quad (3.24)$$

де P_c – середня втрата працездатності працівника, %;

P_n – мінімальне значення втрати працездатності для відповідної категорії робіт, %;

P_{max} – максимальне значення втрати працездатності для відповідної категорії робіт, %.

Втрата продуктивності праці призводить до відповідного зменшення виробітку працівника. Величина недоотриманого виробітку визначається за залежністю [69]:

$$B_p = 0.01B_{100}P_c. \quad (3.25)$$

де B_p – втрачений виробіток працівника;

B_{100} – виробіток працівника за відсутності впливу респіратора;

P_c – середня втрата працездатності, %.

На основі отриманого значення втрати виробітку можуть бути визначені економічні наслідки зниження продуктивності праці під час використання респіраторів [69]:

$$E_n = 0,0137B_pZ_n. \quad (3.26)$$

де E_n – економічні втрати, пов'язані зі зниженням продуктивності праці, грн;

B_p – втрачений виробіток;

Z_n – середньорічна заробітна плата працівника, грн.

Отримані залежності дозволяють кількісно оцінити економічні втрати, пов'язані зі зниженням продуктивності праці під час використання респіраторів. Аналіз результатів свідчить, що підвищення захисних характеристик ЗІЗОД не завжди супроводжується підвищенням їх економічної ефективності. У ряді випадків використання респіраторів із високим опором диханню може призводити до суттєвих втрат продуктивності праці, особливо під час виконання важких робіт та за несприятливих параметрів виробничого середовища. Тому під час вибору ЗІЗОД необхідно забезпечувати

раціональний баланс між рівнем захисту працівника та економічними наслідками їх використання.

Окремою складовою інтегрального економічного критерію є економічні наслідки нещасних випадків, які потенційно можуть бути пов'язані з використанням засобів індивідуального захисту органів дихання. Незважаючи на те, що основним призначенням ЗІЗОД є підвищення рівня безпеки працівника, окремі конструктивні особливості респіраторів можуть опосередковано впливати на ймовірність виникнення небезпечних ситуацій. Зокрема, використання засобів захисту може супроводжуватися обмеженням поля зору, зниженням комфорту роботи, підвищенням фізіологічного навантаження та швидкості розвитку втоми працівника [64].

Разом із тим кількісне оцінювання економічних наслідків нещасних випадків є значно складнішим порівняно з оцінюванням професійної захворюваності або втрат продуктивності праці. Це пояснюється багатофакторністю причин виробничого травматизму, істотними відмінностями умов праці на різних підприємствах, а також обмеженою кількістю статистичних даних, які дозволяли б достовірно встановити залежність між конструктивними характеристиками ЗІЗОД та частотою виникнення нещасних випадків.

У зв'язку з цим у роботі [64] зазначена складова розглядається як потенційний елемент економічного критерію, який доцільно враховувати під час комплексного аналізу ефективності засобів захисту, однак її кількісне оцінювання потребує проведення окремих спеціалізованих досліджень. Тому в межах даної роботи основна увага приділяється тим складовим економічного критерію, для яких існують обґрунтовані математичні залежності та достатня експериментальна база, а саме витратам на придбання та експлуатацію ЗІЗОД, економічним наслідкам професійних захворювань і втратам продуктивності праці.

Таким чином, економічні наслідки нещасних випадків розглядаються як додатковий фактор, який потенційно може впливати на результати економічного обґрунтування вибору ЗІЗОД, однак на сучасному етапі розвитку досліджень не може бути достовірно формалізований у вигляді універсальної розрахункової залежності.

Для перевірки практичної придатності запропонованого економічного критерію було виконано порівняльне оцінювання найбільш поширених типів протипилових респіраторів, які відрізняються конструктивним виконанням, класом захисту, вартістю та аеродинамічними характеристиками. До аналізу включено як респіратори вітчизняного виробництва, так і засоби індивідуального захисту провідних зарубіжних виробників. Основні характеристики досліджуваних респіраторів наведено в табл. 3.37.

Таблиця 3.37

Вартість та основні характеристики протипилових респіраторів [64]

Тип, півмаски (маски), виробництво, тип фільтрів	Вартість півмаски (маски), грн	Вартість фільтрів, грн за пару	Клас захисту	P_n при 95 л/хв, Па	P_{max} за ДСТУ EN 143, Па
РУ-60М, Тополь (ZIZ Dnipro м. Дніпро, Україна), з фільтрами A1B1E1P1	210	44	P1	50	240
РПА-ДС (ТОВ НВП «СТАНДАРТ». м. Дніпро, Україна), з фільтрами ФРПА	390	42	P2	50	240
Пульс-К (Укрфільтрсервіс, Україна), з фільтрами ПФ 1А Пульс	387	42	P2	50	240
ETNA Eurmask 2000 (Італія) з фільтрами E 952 P2	984	384	P2	70	240
ETNA Eurmask 2000 (Італія) з фільтрами E 953 P3	984	444	P3	120	300
Півмаска 6300 (3М, США) з фільтрами 3М 2128	499	387	P2	70	240
Маска 6800 (3М, США) з фільтрами 3М 6099	3399	1550	P3	120	300

Дані табл. 3.37 свідчать, що досліджувані респіратори суттєво відрізняються за вартістю та експлуатаційними характеристиками. Так,

вартість вітчизняних респіраторів РУ-60М, РПА-ДС та Пульс-К становить 210–390 грн, тоді як вартість імпортованих аналогів сягає 3399 грн. Одночасно спостерігається збільшення опору диханню зі зростанням класу захисту: для респіраторів класу Р2 він становить 50-70 Па, а для респіраторів класу Р3 досягає 120 Па. Зазначені відмінності створюють передумови для комплексного економічного аналізу, який дозволяє оцінити не лише вартість придбання респіратора, а й економічні наслідки його використання.

На першому етапі було виконано розрахунок інтегрального економічного критерію для допустимих умов праці, за яких параметри виробничого мікроклімату відповідають нормативним вимогам. Результати розрахунків наведено в табл. 3.38.

Таблиця 3.38

**Розрахункові значення річних витрат та збитків при використанні
різних типів респіраторів за допустимих мікрокліматичних
умов праці [64]**

Тип, півмаски (маски)	B_n	B_o	E_n	E_n	F
За відсутності респіратора	-	-	453600	-	453600
РУ-60М, Тополь	210	308	113400	24660	138518
РПА-ДС, Пульс-К	390	294	37800	24660	63084
ETNA Eurmask 2000 з фільтрами Е 952	984	2688	37800	49320	90792
ETNA Eurmask 2000 з фільтрами Е 953	984	3108	9072	69048	82212
Півмаска 6300 з фільтрами 3М 2128	499	2709	37800	49320	90328
Маска 6800 з фільтрами 3М 6099	3399	10850	9072	69048	92369

Аналіз результатів, наведених у табл. 3.38, свідчить, що використання будь-якого із досліджуваних респіраторів є економічно доцільнішим порівняно з виконанням робіт без застосування засобів індивідуального захисту органів дихання. За відсутності респіратора значення інтегрального

економічного критерію становить 453600 грн, що обумовлено значними економічними наслідками професійної захворюваності.

Серед досліджуваних засобів захисту найменше значення інтегрального критерію отримано для респіраторів РПА-ДЄ та Пульс-К (63084 грн). Це пояснюється оптимальним поєднанням помірної вартості, достатнього рівня захисту класу Р2 та незначного впливу на продуктивність праці працівника. Для респіратора РУ-60М значення критерію є майже вдвічі більшим і становить 138518 грн, що пов'язано зі зростанням економічних наслідків професійної захворюваності внаслідок нижчого класу захисту Р1.

Особливий інтерес становлять результати для респіраторів класу Р3. Незважаючи на те, що використання ETNA Eurmask 2000 з фільтрами Е953 та маски 6800 з фільтрами ЗМ 6099 дозволяє зменшити економічні наслідки професійної захворюваності до 9072 грн, загальне значення інтегрального критерію залишається вищим порівняно з респіраторами класу Р2. Причиною цього є збільшення витрат на придбання та експлуатацію, а також зростання витрат продуктивності праці внаслідок підвищеного опору диханню.

Отримані результати підтверджують, що максимальний клас захисту респіратора не завжди забезпечує мінімальні сумарні економічні витрати. Економічно доцільним є такий варіант засобу захисту, який забезпечує раціональний баланс між рівнем захисту працівника, витратами на експлуатацію та впливом на його працездатність. Для перевірки стійкості зазначених закономірностей подальший аналіз було виконано для умов праці з несприятливими параметрами виробничого мікроклімату.

Оскільки умови реального виробництва часто характеризуються підвищеною температурою та вологістю повітря робочої зони, наступним етапом дослідження стало оцінювання економічної ефективності використання респіраторів за шкідливих мікрокліматичних умов. Результати розрахунків наведено в табл. 3.39.

Таблиця 3.39

Розрахункові значення річних витрат та збитків при використанні різних типів респіраторів для шкідливих за метрологічними параметрами умов праці [64]

Тип, півмаски (маски)	B_n	B_o	E_n	E_n	F
За відсутності респіратора	-	-	453600	-	453600
РУ-60М, Тополь	210	308	113400	61650	175568
РПА-ДЄ, Пульс-К	390	294	37800	61650	100134
ETNA Eurmask 2000 з фільтрами E 952	984	2688	37800	123600	165072
ETNA Eurmask 2000 з фільтрами E 953	984	3108	9072	172620	185784
Півмаска 6300 з фільтрами 3М 2128	499	2709	37800	123600	164608
Маска 6800 з фільтрами 3М 6099	3399	10850	9072	172620	195941
Моторований респіратор	16700	14500	9072	-	40273

Аналіз результатів, наведених у табл. 3.39, свідчить, що погіршення параметрів виробничого мікроклімату суттєво впливає на економічну ефективність використання засобів індивідуального захисту органів дихання. Порівняно з допустимими умовами праці значно зростають економічні втрати, пов'язані зі зниженням продуктивності працівників. Так, для респіраторів РУ-60М, РПА-ДЄ та Пульс-К величина показника E_n збільшується з 24660 грн до 61650 грн, тобто у 2,5 раза. Для респіраторів ETNA Eurmask 2000 з фільтрами E952 та півмаски 6300 з фільтрами 3М 2128 значення E_n зростає з 49320 грн до 123600 грн, а для респіраторів класу РЗ досягає 172620 грн.

Унаслідок зростання втрат продуктивності праці суттєво змінюються результати економічного обґрунтування вибору ЗІЗОД. Якщо за допустимих умов праці найменше значення інтегрального економічного критерію спостерігалось для респіраторів РПА-ДЄ та Пульс-К, то за несприятливих мікрокліматичних умов величина критерію для них зростає до 100134 грн. Аналогічна тенденція характерна і для інших респіраторів, особливо для моделей із підвищеним опором диханню.

Особливе значення мають результати, отримані для моторизованого респіратора. Незважаючи на значні витрати на придбання та експлуатацію, величина інтегрального економічного критерію для нього становить лише 40273 грн, що є найменшим значенням серед усіх досліджуваних варіантів.

Такий результат пояснюється практично повною відсутністю втрат продуктивності праці, оскільки подача очищеного повітря здійснюється примусово та не створює додаткового опору диханню працівника.

Отримані результати підтверджують, що за важких умов праці вирішальне значення для економічної ефективності використання ЗІЗОД можуть мати не лише захисні характеристики респіратора, а й його ергономічні властивості. Зростання класу захисту без урахування впливу засобу захисту на фізіологічний стан працівника не завжди забезпечує зменшення сумарних економічних втрат.

Таким чином, результати проведених розрахунків підтвердили доцільність використання інтегрального економічного критерію під час вибору засобів індивідуального захисту органів дихання. Запропонований підхід дозволяє одночасно враховувати витрати на придбання та експлуатацію респіраторів, економічні наслідки професійної захворюваності та втрати продуктивності праці, що забезпечує більш обґрунтоване прийняття рішень порівняно з вибором ЗІЗОД лише за вартістю або класом захисту.

Проведене порівняння результатів для допустимих та шкідливих умов праці свідчить про чутливість інтегрального економічного критерію до зміни умов експлуатації ЗІЗОД. Найбільший вплив на величину критерію мають параметри виробничого середовища, які визначають економічні втрати від професійної захворюваності та зниження продуктивності праці. Отримані результати підтверджують, що економічно доцільний тип респіратора залежить від конкретних умов виробництва, а інтегральний критерій забезпечує можливість обґрунтованого вибору засобу захисту залежно від зміни вихідних параметрів. Проведення детального аналізу чутливості із варіюванням окремих параметрів (концентрації пилу, вартості фільтрів, рівня заробітної плати тощо) є перспективним напрямом подальших досліджень.

Для узагальнення результатів проведених досліджень та визначення місця економічного критерію в системі оцінювання професійних ризиків доцільно систематизувати основні фактори, які впливають на економічну ефективність використання засобів індивідуального захисту органів дихання (табл. 3.40).

Таблиця 3.40

**Складові економічного критерію вибору ЗІЗОД та їх вплив на
результати оцінювання**

Складова	Основний параметр	Напрямок впливу	Практичне значення
Витрати на придбання та експлуатацію ЗІЗОД $V_{\text{п}}$	Вартість респіратора, ресурс, вартість фільтрів	Зі збільшенням витрат зростає значення економічного критерію	Характеризує прямі витрати підприємства
Економічні наслідки професійних захворювань $E_{\text{н}}$	Коефіцієнт захисту $K_{\text{зр}}$, концентрація шкідливих речовин, тривалість впливу	Зі збільшенням $K_{\text{зр}}$ значення $E_{\text{н}}$ зменшується	Відображає вплив ЗІЗОД на професійний ризик
Економічні втрати від зниження продуктивності праці $E_{\text{п}}$	Опір диханню, важкість роботи, параметри мікроклімату	Зі збільшенням опору диханню значення $E_{\text{п}}$ зростає	Враховує фізіологічний вплив респіратора
Умови праці	Концентрація забруднювачів, температура, вологість	Впливають одночасно на $E_{\text{н}}$ та $E_{\text{п}}$	Визначають умови експлуатації ЗІЗОД
Захисні характеристики ЗІЗОД	Клас захисту, коефіцієнт захисту	Зменшують ризик професійного захворювання	Характеризують ефективність засобу захисту

Джерело: авторське узагальнення результатів на основі результатів досліджень [64]

Дані табл. 3.40 свідчать, що економічна ефективність використання ЗІЗОД формується під впливом комплексу взаємопов'язаних технічних, економічних та виробничих чинників. При цьому коефіцієнт захисту респіратора, ризик професійного захворювання, вплив засобу захисту на працездатність працівника, умови праці та експлуатаційні витрати повинні розглядатися як елементи єдиної системи. Отримані результати підтверджують необхідність переходу від оцінювання окремих показників до інтегральної моделі професійного ризику, яка дозволяє комплексно обґрунтовувати рішення щодо вибору та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання. Саме розробленню такої моделі присвячено підрозділ 3.5.2.

Отримані результати свідчать, що окремі показники, розглянуті в попередніх підрозділах, характеризують різні аспекти професійного ризику та ефективності засобів індивідуального захисту органів дихання. Разом із тим практичне прийняття рішень щодо вибору ЗІЗОД потребує не ізольованого аналізу окремих параметрів, а їх комплексного врахування в межах єдиної системи оцінювання. Для визначення місця кожного з розглянутих показників у структурі майбутньої інтегральної моделі доцільно узагальнити їх функціональне призначення та характер впливу на результати оцінювання професійних ризиків (табл. 3.41).

Таблиця 3.41

**Основні складові інтегральної моделі оцінки професійних ризиків
при використанні ЗІЗОД та їх функціональне призначення**

Показник	Джерело формування	Вплив на інтегральний ризик
Кзр	підрозділ 3.4	зменшує ризик
Ен	економічний критерій	характеризує наслідки захворювання
Еп	економічний критерій	характеризує втрату працездатності
Вп	економічний критерій	характеризує прямі витрати
Людський фактор	підрозділ 3.2	впливає на ймовірність помилки

Джерело: розроблено автором на основі результатів власних досліджень

Наведені в табл. 3.41 дані демонструють, що всі розглянуті показники є взаємопов'язаними елементами єдиної системи управління професійними ризиками. При цьому коефіцієнт захисту респіратора визначає рівень надходження шкідливих речовин до органів дихання працівника, економічний критерій характеризує наслідки реалізації ризику з урахуванням витрат на захисні заходи, а людський фактор впливає на ймовірність виникнення помилок під час вибору та експлуатації ЗІЗОД. Отже, забезпечення обґрунтованого вибору засобів індивідуального захисту потребує інтеграції технічних, економічних та поведінкових показників у межах єдиної моделі оцінювання.

Проведені дослідження підтвердили, що економічна ефективність використання засобів індивідуального захисту органів дихання визначається

сукупною дією взаємопов'язаних технічних, економічних та виробничих факторів і не може оцінюватися виключно за показником вартості респіратора або його класу захисту. Отримані результати показали, що як мінімальні витрати на придбання засобу захисту, так і використання респіраторів із максимальними захисними характеристиками не завжди забезпечують мінімізацію сумарних економічних втрат.

Таким чином, проведене дослідження дозволило обґрунтувати доцільність використання економічного критерію як одного з елементів комплексної системи оцінювання професійних ризиків. На відміну від традиційних підходів, які розглядають окремі характеристики засобів захисту ізольовано, запропонований підхід забезпечує можливість одночасного врахування ризику професійного захворювання, коефіцієнта захисту респіратора, втрат працездатності працівників, умов праці та експлуатаційних витрат.

Отримані результати створюють методичне підґрунтя для подальшого формування інтегральної моделі оцінки професійних ризиків при виборі та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання. Саме тому економічний критерій у подальшому розглядається як одна зі складових інтегральної моделі ризику, розроблення якої наведено в підрозділі 3.5.2.

3.5.2 Формування інтегральної моделі оцінки професійних ризиків та механізму її безперервного вдосконалення на основі циклу PDCA

Оцінювання професійних ризиків при виборі та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання належить до складних багатофакторних завдань, оскільки рівень ризику визначається одночасним впливом технічних, організаційних, виробничих, фізіологічних та економічних чинників. При цьому кожний із зазначених факторів характеризує лише окрему сторону процесу забезпечення безпеки працівника

і не може бути використаний як самостійний критерій прийняття рішень щодо вибору ЗІЗОД.

Проведений аналіз наукових джерел та існуючих методичних підходів показав, що більшість моделей оцінювання ризиків базуються на дослідженні окремих компонентів системи «працівник – виробниче середовище – засіб захисту». Так, методи оцінки надійності людини дозволяють визначати ймовірність помилкових дій працівника, однак не враховують захисні характеристики респіратора. Методи аналізу небезпек і ризиків забезпечують ідентифікацію потенційно небезпечних подій, проте не враховують ефективність засобів захисту та їх технічний стан. Моделі визначення коефіцієнта захисту респіратора характеризують рівень захисної ефективності ЗІЗОД, але не дозволяють оцінити вплив людського фактора або експлуатаційних ризиків. Аналогічно, економічні методи вибору ЗІЗОД враховують витрати та можливі збитки, проте не забезпечують кількісного врахування реального рівня професійного ризику.

У результаті використання окремих показників виникає ситуація, коли різні критерії можуть приводити до різних управлінських рішень. Наприклад, респіратор із максимальним коефіцієнтом захисту не завжди є оптимальним з точки зору економічної ефективності, а засіб захисту з найменшими експлуатаційними витратами може не забезпечувати необхідного рівня безпеки працівника. Аналогічно, мінімізація експлуатаційних ризиків не гарантує мінімізації ризику професійного захворювання або помилок користувача.

Таким чином, під час вибору та експлуатації ЗІЗОД необхідно одночасно враховувати кілька груп показників, які характеризують різні аспекти професійного ризику. До таких показників належать надійність людини, експлуатаційні ризики, захисна ефективність респіратора, ресурс його захисної дії та економічна доцільність використання. Розгляд зазначених характеристик окремо не дозволяє отримати об'єктивну оцінку рівня ризику,

оскільки зміна одного з показників може суттєво впливати на значення інших. Унаслідок цього рішення, прийняте на основі лише одного критерію, може виявитися неефективним або навіть призвести до підвищення загального рівня професійного ризику.

Зазначені обставини обумовлюють необхідність впровадження інтегральної моделі оцінки професійних ризиків, яка забезпечує комплексне врахування технічних, організаційних, людських та економічних чинників у межах єдиної системи оцінювання. На відміну від існуючих підходів, така модель дозволяє не лише оцінювати окремі складові ризику, але й визначати їх сукупний вплив на безпеку працівника та ефективність використання ЗІЗОД. Це створює передумови для прийняття більш обґрунтованих рішень щодо вибору засобів захисту, організації їх експлуатації та планування заходів зі зниження професійних ризиків.

Важливо зазначити, що предметом даного дисертаційного дослідження є інтегральна оцінка професійних ризиків при виборі та експлуатації засобів індивідуального захисту. Разом із тим практична реалізація запропонованої моделі здійснюється на прикладі засобів індивідуального захисту органів дихання, які виступають об'єктом дослідження.

Такий підхід обумовлений низкою причин. По-перше, засоби індивідуального захисту органів дихання належать до найбільш складних та багатофакторних видів ЗІЗ, ефективність яких визначається одночасним впливом технічних, фізіологічних, організаційних та експлуатаційних чинників. На відміну від більшості інших засобів захисту, для ЗІЗОД характерна наявність складних процесів взаємодії між людиною, засобом захисту та виробничим середовищем, що істотно впливає на рівень професійного ризику.

По-друге, саме для ЗІЗОД найбільш повно проявляються всі складові інтегральної моделі, запропонованої в роботі. Рівень безпеки працівника залежить не лише від захисних властивостей респіратора, але й від

правильності його використання, надійності дій користувача, герметичності прилягання до обличчя, ресурсу фільтрувальних елементів, своєчасності їх заміни, умов праці та економічної доцільності застосування. Таким чином, ЗІЗОД є найбільш показовим прикладом складної системи, для якої використання інтегрального підходу є об'єктивно необхідним.

По-третє, компоненти інтегральної моделі мають універсальний характер і не обмежуються виключно засобами захисту органів дихання. Зокрема, блок оцінки надійності людини може застосовуватися під час використання будь-яких засобів індивідуального захисту. Аналогічно, методика оцінювання експлуатаційних ризиків на основі інтеграції HAZOP та FMEA, економічний критерій вибору засобів захисту та механізм безперервного вдосконалення на основі циклу PDCA можуть бути адаптовані до інших видів ЗІЗ. Водночас показники захисної ефективності та ресурсу захисної дії набувають конкретного змісту залежно від типу засобу захисту та особливостей його експлуатації.

Отже, запропонована інтегральна модель має дворівневу структуру. На концептуальному рівні вона є універсальною моделлю оцінки професійних ризиків при виборі та експлуатації засобів індивідуального захисту. На прикладному рівні її апробація, параметризація та перевірка адекватності виконані на прикладі засобів індивідуального захисту органів дихання як одного з найбільш складних та критично важливих класів ЗІЗ. Такий підхід забезпечує як наукову обґрунтованість моделі, так і можливість її подальшого поширення на інші види засобів індивідуального захисту.

Для реалізації зазначеного підходу до складу інтегральної моделі включено п'ять взаємопов'язаних компонентів, які відповідають основним напрямкам досліджень, виконаних у межах дисертаційної роботи. Структуру інтегральної моделі оцінки професійних ризиків наведено в табл. 3.42.

Таблиця 3.42

**Компоненти інтегральної моделі оцінки професійних ризиків при
виборі та експлуатації ЗІЗОД**

Компонент моделі	Позначення	Зміст компонента	Результат дослідження
Надійність людини	R	Імовірність безпомилкової експлуатації ЗІЗОД з урахуванням психофізіологічних та організаційних факторів	Модифікована модель SPAR-H (підрозділ 3.1)
Експлуатаційний ризик	RPN	Рівень ризику відмов, помилок та небезпечних подій під час використання ЗІЗОД	Інтеграція методів HAZOP та FMEA (підрозділ 3.2)
Захисна ефективність	Kзр	Реальний коефіцієнт захисту ЗІЗОД з урахуванням особливостей експлуатації	Удосконалені конструкції та математична модель КЗР (підрозділ 3.4.1)
Ресурс захисної дії	Tзах	Час ефективної роботи фільтрувальних елементів до досягнення граничних параметрів	Програмний комплекс прогнозування захисних властивостей ЗІЗОД (підрозділ 3.4.2)
Економічний критерій	F	Комплексна економічна оцінка використання ЗІЗОД	Економічне обґрунтування вибору ЗІЗОД (підрозділ 3.5.1)

Джерело: розроблено автором на підставі власних досліджень

Дані табл. 3.42 свідчать, що запропонована інтегральна модель об'єднує всі ключові результати дисертаційного дослідження в межах єдиної системи оцінювання професійних ризиків. Кожний із компонентів характеризує окрему групу факторів, що впливають на безпеку працівника, проте лише їх спільне врахування дозволяє отримати об'єктивну оцінку рівня ризику при виборі та експлуатації засобів індивідуального захисту.

Наведені компоненти формують концептуальну основу інтегральної моделі оцінки професійних ризиків при виборі та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання. Однак для забезпечення комплексного оцінювання ризику важливим є не лише визначення окремих складових моделі, а й встановлення взаємозв'язків між ними. З цією метою розроблено структурну схему формування інтегрального професійного ризику, яка відображає місце кожного компонента в загальній системі оцінювання та порядок їх інтеграції в єдиний показник ризику (рис. 3.11).



Рис. 3.11. Структурна схема формування інтегрального професійного ризику при виборі та експлуатації ЗІЗОД

Джерело: розроблено автором на основі результатів власних досліджень, візуалізацію виконано з використанням інструментів штучного інтелекту

Ця структурна схема відображає концепцію формування інтегрального професійного ризику на основі поєднання п'яти взаємопов'язаних складових, кожна з яких характеризує окремий аспект безпеки працівника під час використання ЗІЗОД.

Першим елементом моделі є блок надійності людини, сформований на основі модифікованого методу SPAR-H. Даний блок враховує вплив людського фактора на безпеку використання засобів індивідуального захисту та характеризує імовірність безпомилкових дій працівника під час їх вибору, підготовки до використання та експлуатації. Зменшення показника надійності людини свідчить про підвищення ймовірності помилок та, відповідно, збільшення професійного ризику.

Другим компонентом виступає блок ідентифікації та оцінювання експлуатаційних ризиків, реалізований на основі інтеграції методів HAZOP та

FMEA. У межах даного блоку визначається пріоритетне число ризику RPN, яке характеризує ймовірність виникнення небезпечної події, тяжкість її наслідків та можливість своєчасного виявлення. Зростання значення RPN свідчить про збільшення рівня експлуатаційного ризику під час використання ЗІЗОД.

Третій блок моделі характеризує технічну ефективність засобу індивідуального захисту. Основним показником даного блоку є коефіцієнт захисту респіратора $K_{зр}$, визначення якого базується на удосконаленій математичній моделі та результатах конструктивного вдосконалення елементів респіратора. Чим вищим є коефіцієнт захисту, тим меншою є частка шкідливих речовин, що потрапляють до органів дихання працівника.

Четвертим компонентом є блок прогнозування ресурсу захисної дії фільтрів. Він реалізований на основі розробленого програмного комплексу прогнозування захисних властивостей ЗІЗОД та дозволяє визначати прогнозований час ефективної роботи фільтра залежно від умов його експлуатації. Збільшення часу захисної дії фільтра забезпечує зменшення ймовірності втрати захисних властивостей засобу індивідуального захисту в процесі використання.

П'ятим компонентом інтегральної моделі виступає блок економічного обґрунтування, який дозволяє враховувати витрати на придбання та експлуатацію ЗІЗОД, економічні наслідки професійних захворювань, втрати продуктивності праці та інші пов'язані витрати. Таким чином забезпечується врахування не лише технічної, але й економічної ефективності використання засобів захисту.

Сукупний вплив зазначених компонентів формує інтегральний професійний ризик при виборі та експлуатації ЗІЗОД, який є узагальненим показником рівня безпеки працівника в конкретних умовах праці. Особливістю запропонованого підходу є те, що до складу моделі включено не лише традиційні показники безпеки та захисної ефективності, але й характеристики надійності людини, ресурсу захисної дії та економічної доцільності використання ЗІЗОД. У результаті інтегральна модель забезпечує

можливість комплексного оцінювання ризику протягом усього життєвого циклу засобу захисту – від його вибору до завершення експлуатації.

Представлена структурна схема визначає склад основних компонентів інтегральної моделі та логіку їх взаємодії. Для практичного використання моделі під час оцінювання професійних ризиків необхідно формалізувати встановлені взаємозв'язки та представити їх у вигляді математичної залежності, яка дозволяє отримати кількісну оцінку інтегрального професійного ризику.

Перед формуванням інтегрального показника професійного ризику необхідно врахувати, що складові моделі характеризують різні аспекти функціонування системи «працівник – ЗІЗОД – виробниче середовище» та мають різну фізичну природу. Зокрема, показник надійності людини R є імовірнісною величиною, показник RPN характеризує пріоритетність ризику виникнення небезпечних подій, коефіцієнт захисту респіратору $K_{зр}$ відображає рівень захисної ефективності ЗІЗОД, показник $T_{зах}$ характеризує ресурс захисної дії фільтра, а економічний показник F оцінює сукупні витрати та економічні наслідки використання засобу захисту.

Безпосереднє використання зазначених показників у межах єдиної математичної моделі є некоректним через відмінність їх масштабів та одиниць вимірювання. Крім того, абсолютні значення окремих показників можуть суттєво відрізнятися між собою, що призводить до домінування однієї складової над іншими та ускладнює інтерпретацію інтегрального оцінювання.

З метою забезпечення порівнюваності компонентів інтегральної моделі та можливості їх подальшої інтеграції кожний показник приводиться до безрозмірного відносного індексу. Таке перетворення дозволяє оцінювати не абсолютні значення окремих параметрів, а їх внесок у формування інтегрального професійного ризику. Використання відносних індексів відповідає принципам побудови інтегральних показників та багатокритеріальних моделей прийняття рішень, у яких інтегруються параметри різної фізичної природи [71]. У результаті нормування всі складові моделі набувають однакової розмірності та можуть бути використані для формування єдиного інтегрального індексу професійного ризику.

Слід зазначити, що в межах даного дослідження інтегральний показник IPR не є абсолютною мірою професійного ризику, а використовується як узагальнений критерій оцінювання ефективності застосування ЗІЗОД. Результатом розрахунку є безрозмірний інтегральний індекс, який комплексно враховує вплив надійності людини, експлуатаційних ризиків, захисної ефективності респіратора, ресурсу захисної дії фільтра та економічних факторів. Значення показника IPR дозволяє здійснювати порівняльний аналіз альтернативних варіантів ЗІЗОД, при цьому найбільш ефективним вважається варіант, для якого значення інтегрального професійного ризику є мінімальним. При цьому критерій вибору буде обґрунтований після формування остаточної математичної моделі.

Після визначення структури інтегральної моделі необхідно обґрунтувати процедуру нормування окремих компонентів. Зокрема, показник $(1-R)$ характеризує ймовірність помилкових дій працівника під час вибору та експлуатації ЗІЗОД, показник RPN відображає рівень експлуатаційного ризику, коефіцієнт захисту респіратора $K_{зр}$ характеризує ефективність зниження концентрації шкідливих речовин у підмасковому просторі, прогнозований час захисної дії фільтра $T_{зах}$ визначає ресурс збереження захисних властивостей фільтра, а показник F відображає сукупні економічні витрати та втрати, пов'язані з використанням засобу індивідуального захисту.

При цьому показники $(1-R)$, RPN та $K_{зр}$ вже безрозмірними величинами. Показник $(1-R)$ характеризує ймовірність помилкових дій працівника, показник RPN є інтегральним індексом експлуатаційного ризику, а коефіцієнт захисту респіратора являє собою відношення концентрацій шкідливої речовини та також не має фізичної розмірності. Тому зазначені показники можуть безпосередньо використовуватися в структурі інтегральної моделі без додаткового нормування. Водночас прогнозований час захисної дії фільтра $T_{зах}$ та економічний критерій F характеризуються різними одиницями вимірювання та потребують приведення до відносного вигляду для забезпечення коректного поєднання всіх компонентів моделі.

Показник $T_{зах}$ вимірюється в одиницях часу, а показник F у грошових одиницях. Безпосереднє використання таких показників у межах єдиної

математичної моделі може призвести до спотворення результатів оцінювання через суттєву відмінність їх масштабів та одиниць вимірювання. Крім того, абсолютні значення окремих показників можуть істотно відрізнятися між собою, що спричиняє непропорційний вплив окремих складових на кінцевий результат інтегрального оцінювання.

З метою приведення показників, що мають різні одиниці вимірювання та різні масштаби зміни, до єдиного безрозмірного вигляду використано метод відносного нормування за максимальним значенням [71] серед альтернативних варіантів ЗІЗОД, що розглядаються в межах конкретного сценарію оцінювання. Вибір такого підходу обумовлений його простотою, наочністю та можливістю забезпечення порівнюваності показників без втрати їх фізичного змісту. У результаті всі відносні індекси набувають значень у межах від 0 до 1, що дозволяє використовувати їх у складі єдиної інтегральної моделі. Нормування здійснюється в межах множини альтернативних варіантів ЗІЗОД, що розглядаються під час прийняття конкретного управлінського рішення.

Відносний індекс прогнозованого часу захисної дії фільтра визначається за залежністю [71]:

$$T_{\text{зах}}^* = T_{\text{зах}} / \max T_{\text{зах}}, \quad (3.27)$$

де $T_{\text{зах}}^*$ – відносний індекс прогнозованого часу захисної дії фільтра;

$T_{\text{зах}}$ – прогнозований час захисної дії досліджуваного фільтра, визначений за допомогою програмного комплексу прогнозування захисних властивостей ЗІЗОД;

$\max T_{\text{зах}}$ – максимальне значення прогнозованого часу захисної дії серед альтернативних варіантів ЗІЗОД, що порівнюються.

Використання зазначеної залежності дозволяє оцінити ресурс захисної дії конкретного фільтра відносно найкращого варіанта, прийнятого за одиницю. Чим ближче значення $T_{\text{зах}}^*$ до 1, тим більшим є ресурс захисної дії

відповідного фільтра та тим меншим буде його внесок у формування інтегрального професійного ризику.

Фізичний зміст такого перетворення полягає в оцінюванні ресурсу захисної дії конкретного фільтра відносно найкращого варіанта з точки зору тривалості захисту. При цьому варіант, який має максимальний прогнозований час захисної дії, отримує значення відносного індексу, що дорівнює одиниці, а всі інші варіанти набувають значень менше одиниці пропорційно до зменшення їх ресурсу захисної дії. Оскільки збільшення часу захисної дії сприяє підвищенню безпеки працівника та зменшенню ризику втрати захисних властивостей фільтра в процесі експлуатації, у структурі інтегральної моделі даний показник використовується у вигляді оберненої величини.

Аналогічно відносний економічний індекс визначається залежністю [71]:

$$F^* = F / \max F, \quad (3.28)$$

де F^* – відносний економічний індекс;

F – значення економічного критерію, визначене відповідно до методики, наведеної в підрозділі 3.5.1;

$\max F$ – максимальне значення економічного критерію серед альтернативних варіантів ЗІЗОД, що розглядаються.

Зазначений підхід відповідає загальноприйнятим принципам побудови інтегральних показників та багатокритеріальних моделей прийняття рішень, відповідно до яких показники з різними одиницями вимірювання попередньо приводяться до безрозмірного вигляду шляхом формування відносних індексів через максимум, оскільки це один із класичних способів лінійної нормалізації показників у багатокритеріальному аналізі, який дозволяє зберегти пропорційність значень та забезпечити їх порівнюваність [71].

У даному випадку відносний економічний індекс характеризує частку сукупних економічних витрат та втрат досліджуваного варіанта відносно найбільш витратного рішення. Значення $F^*=1$ відповідає варіанту з найбільшими економічними витратами, тоді як менші значення свідчать про вищу економічну ефективність використання відповідного засобу захисту.

Застосування даної залежності дозволяє оцінювати економічні витрати та втрати кожного варіанта відносно найбільш витратного рішення. Варіант із максимальними витратами отримує значення відносного індексу, що дорівнює одиниці, тоді як більш економічно ефективні рішення характеризуються меншими значеннями показника F . Оскільки економічний критерій F включає витрати на придбання та експлуатацію ЗІЗОД, економічні наслідки професійних захворювань, втрати продуктивності праці та інші пов'язані витрати, його збільшення свідчить про погіршення загальної ефективності системи захисту. Саме тому в інтегральній моделі професійного ризику показник F входить до складу формули прямо пропорційно – зі збільшенням економічних втрат значення інтегрального показника ризику також зростає.

Таким чином, використання відносних індексів $T_{\text{зах}}$ та F дозволяє усунути вплив різних одиниць вимірювання та масштабів зміни показників, забезпечуючи їх коректне поєднання з безрозмірними показниками надійності людини, експлуатаційного ризику та коефіцієнта захисту респіратора в межах єдиної інтегральної моделі оцінювання професійних ризиків.

Результати проведених досліджень дозволяють сформувати єдину систему оцінювання професійних ризиків при виборі та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання. На відміну від існуючих підходів, які переважно орієнтовані на аналіз окремих складових ризику, запропонований підхід передбачає одночасне врахування людського фактора, експлуатаційних ризиків, захисної ефективності респіратора, ресурсу захисної дії фільтрів та економічних наслідків використання ЗІЗОД.

У межах розробленої концепції людський фактор характеризується імовірністю помилкових дій працівника $(1-R)$, експлуатаційні ризики

оцінюються за допомогою показника RPN, захисна ефективність респіратору визначається коефіцієнтом захисту $K_{зр}$, тривалість збереження захисних властивостей фільтра характеризується відносним індексом прогнозованого часу захисної дії $T_{зах}$, а економічні аспекти вибору та експлуатації ЗІЗОД враховуються за допомогою відносного економічного індексу F .

Таким чином, кожен із компонентів інтегральної моделі характеризує окремий аспект професійного ризику, а їх об'єднання в межах єдиного математичного виразу дозволяє перейти від локального аналізу окремих факторів до комплексного оцінювання безпеки використання ЗІЗОД.

З огляду на те, що професійний ризик при виборі та експлуатації ЗІЗОД формується під впливом людських, технічних, експлуатаційних та економічних чинників, інтегральний показник ризику доцільно визначати на основі мультиплікативної моделі. Такий підхід обрано з огляду на те, що кожен із факторів характеризує окрему незалежну складову професійного ризику, а погіршення будь-якої з них призводить до пропорційного зниження загальної ефективності системи захисту. Мультиплікативна модель дозволяє враховувати взаємний вплив окремих компонентів та забезпечує зростання інтегрального ризику у випадку погіршення хоча б одного з показників. На відміну від адитивних моделей, мультиплікативне агрегування не допускає компенсації критично низьких значень одних складових високими значеннями інших, що відповідає принципам оцінювання професійного ризику при використанні ЗІЗОД.

У сучасних дослідженнях для інтегрального оцінювання ризиків також застосовують моделі на основі нечіткої логіки, які є ефективними за умов високої невизначеності або переважання якісних експертних оцінок. Проте в межах даного дослідження всі складові інтегрального показника визначаються на основі кількісних розрахункових та експериментально визначених показників, що зумовило вибір детермінованої мультиплікативної моделі без використання функцій належності та нечітких правил виведення. Адитивне агрегування у даному випадку не застосовувалося, оскільки воно допускає взаємну компенсацію окремих складових інтегрального показника, що суперечить принципам оцінювання професійного ризику при використанні

ЗІЗОД. Використання моделей нечіткої логіки може бути доцільним при подальшому розвитку моделі для врахування якісних характеристик окремих факторів або неповноти вихідної інформації.

Саме тому остаточно інтегральна модель формується у вигляді мультиплікативної залежності. З урахуванням наведених положень інтегральний показник професійного ризику при виборі та експлуатації ЗІЗОД пропонується визначати за такою залежністю:

$$IPR = (1-R) \times RPN \times (1/K_{зр}) \times (1/T_{зах}^*) \times F^*, \quad (3.29)$$

де: IPR – інтегральний професійний ризик при виборі та експлуатації ЗІЗОД;

R – показник надійності людини, визначений на основі модифікованого методу SPAR-H;

RPN – пріоритетне число ризику, отримане за результатами інтегрованого аналізу HAZOP та FMEA;

$K_{зр}$ – коефіцієнт захисту респіратору;

$T_{зах}^*$ – відносний індекс прогнозованого часу захисної дії фільтра

F^* – відносний економічний індекс.

Формула не є адитивною, оскільки додавання компонентів не відображає реальну взаємодію факторів, наприклад, низька надійність людини при поганому $K_{зр}$ дає набагато вищий сумарний ризик, ніж просто сума.

Особливістю запропонованої інтегральної моделі є те, що всі її складові безпосередньо базуються на результатах теоретичних та експериментальних досліджень, виконаних у межах даної дисертаційної роботи. Таким чином забезпечується логічний зв'язок між окремими етапами дослідження та кінцевим інтегральним показником професійного ризику.

Показник надійності людини R формується на основі результатів підрозділу 3.1, у якому розроблено модель оцінювання надійності людини при експлуатації ЗІЗОД на базі модифікованого методу SPAR-H. Значення показника характеризує імовірність безпомилкових дій працівника під час

вибору, підготовки до використання та експлуатації ЗІЗОД. Відповідно збільшення значення R свідчить про підвищення рівня надійності людини та покращення безпеки виконання робіт.

Водночас інтегральний показник IPR характеризує саме рівень професійного ризику, тобто повинен збільшуватися при погіршенні умов безпеки та зменшуватися при їх покращенні. З огляду на це безпосереднє використання показника надійності людини у структурі інтегральної моделі є недоцільним, оскільки збільшення R призводило б до зростання значення інтегрального ризику, що суперечить фізичному змісту моделі.

Для усунення зазначеної суперечності в інтегральній моделі використовується не показник надійності людини R , а величина $(1-R)$, яка характеризує імовірність помилкових дій працівника під час експлуатації ЗІЗОД. У цьому випадку збільшення ймовірності помилки призводить до зростання інтегрального професійного ризику, а підвищення надійності людини, навпаки, забезпечує його зменшення, що повністю відповідає логіці ризик-орієнтованого підходу.

Таким чином, компонент $(1-R)$ у структурі інтегральної моделі відображає внесок людського фактора у формування професійного ризику та забезпечує узгодженість математичної моделі з фізичним змістом досліджуваного процесу.

Показник експлуатаційного ризику RPN визначається за результатами підрозділу 3.2, у якому запропоновано удосконалену методику ідентифікації та оцінювання експлуатаційних ризиків ЗІЗОД на основі інтеграції методів HAZOP і FMEA. Значення RPN характеризує сукупний вплив імовірності виникнення небезпечної події, тяжкості її наслідків та можливості своєчасного виявлення. Зростання величини RPN відповідає збільшенню рівня професійного ризику.

Коефіцієнт захисту респіратору $K_{зр}$ визначається на основі результатів підрозділів 3.3 та 3.4.1. У підрозділі 3.3 було запропоновано конструктивні удосконалення обтюратора та системи кріплення респіратору, які

забезпечують підвищення герметичності прилягання до обличчя користувача та зменшення підмаскового підсмоктування аерозолі. У підрозділі 3.4.1 розроблено математичну модель оцінювання захисної ефективності ЗІЗОД, яка дозволяє визначати коефіцієнт захисту з урахуванням особливостей дихання працівника та експлуатаційних умов. Оскільки збільшення коефіцієнта захисту сприяє зменшенню концентрації шкідливих речовин у підмасковому просторі, у структурі інтегральної моделі використовується обернена величина $1/K_{зр}$.

Показник прогнозованого часу захисної дії фільтра $T_{зах}$ отримується за результатами підрозділу 3.4.2, у якому розроблено програмний комплекс прогнозування захисних властивостей ЗІЗОД. Розрахунок $T_{зах}$ здійснюється автоматизовано із використанням рівняння Wheeler-Jonas та експериментально визначених параметрів фільтрів, отриманих під час лабораторних досліджень. Під час розрахунку враховуються тип шкідливої речовини, її концентрація в повітрі робочої зони, характеристики сорбенту, параметри фільтра та інтенсивність дихання працівника. Тому, на відміну від нормативних графіків заміни фільтрів, запропонований підхід дозволяє визначати прогнозований ресурс захисної дії з урахуванням конкретних умов експлуатації, концентрації шкідливих речовин та характеристик фільтрувального елемента. Таким чином, показник $T_{зах}$ характеризує прогнозований ресурс захисної дії фільтра за конкретних умов експлуатації. Оскільки збільшення часу захисної дії зменшує ймовірність втрати захисних властивостей ЗІЗОД під час виконання робіт, у моделі використовується теж обернена величина $1/T_{зах}$.

Економічний показник F формується на основі результатів підрозділу 3.5.1, присвяченого економічному обґрунтуванню вибору ЗІЗОД. До його складу входять витрати на придбання та експлуатацію засобів захисту, економічні наслідки професійних захворювань, втрати продуктивності праці та інші витрати, пов'язані з використанням ЗІЗОД. На відміну від інших компонентів моделі, економічний показник відображає не технічні

характеристики засобу захисту, а економічні наслідки прийнятих рішень щодо його вибору та експлуатації.

Слід зазначити, що економічний показник F , використаний у складі інтегральної моделі, є результатом економічного обґрунтування вибору ЗІЗОД, виконаного в підрозділі 3.5.1. У межах економічної моделі показник F виступав самостійним критерієм оптимізації, для якого раціональним вважався варіант із мінімальним значенням сумарних витрат та збитків ($F \rightarrow \min$). Водночас у складі інтегральної моделі професійного ризику показник F використовується не як критерій вибору, а як один із факторів, що характеризують наслідки прийнятого рішення. Збільшення витрат на експлуатацію ЗІЗОД, економічних втрат від професійних захворювань та зниження продуктивності праці свідчить про погіршення загальної ефективності системи захисту та супроводжується зростанням інтегрального професійного ризику. Саме тому економічний показник входить до структури інтегральної моделі прямо пропорційно, а саме зі збільшенням F значення інтегрального показника ризику також зростає.

Таким чином, кожний компонент інтегральної моделі відповідає окремому напрямку досліджень, виконаних у дисертаційній роботі, а їх сукупне використання забезпечує комплексне оцінювання професійного ризику при виборі та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання.

Запропонована інтегральна модель використовується як інструмент порівняльного оцінювання альтернативних варіантів засобів індивідуального захисту органів дихання та не передбачає визначення абсолютного рівня професійного ризику. Результатом розрахунку є безрозмірний інтегральний показник (IPR), який відображає сукупний вплив людського фактора, експлуатаційних ризиків, захисної ефективності респіратора, ресурсу захисної дії фільтра та економічних наслідків використання ЗІЗОД.

Оскільки всі складові інтегральної моделі характеризують фактори, що прямо або опосередковано впливають на рівень безпеки працівника, найбільш

ефективним слід вважати той варіант засобу захисту, для якого інтегральний показник професійного ризику набуває мінімального значення:

$$IPR \rightarrow \min. \quad (3.30)$$

Критерій мінімізації обумовлений тим, що зменшення значення показника IPR відповідає одночасному зниженню ймовірності помилкових дій працівника, зменшенню рівня експлуатаційних ризиків, підвищенню коефіцієнта захисту респіратора, збільшенню прогнозованого часу захисної дії фільтра та зменшенню сукупних економічних витрат і втрат. Таким чином, мінімальне значення інтегрального показника відповідає найбільш раціональному варіанту вибору та експлуатації ЗІЗОД з позицій забезпечення безпеки працівника, технічної ефективності засобу захисту та економічної доцільності його використання.

На відміну від існуючих підходів, які оцінюють окремі аспекти функціонування ЗІЗОД ізольовано, запропонований критерій дозволяє враховувати їх комплексний вплив у межах єдиного інтегрального показника та забезпечує обґрунтоване прийняття рішень щодо вибору найбільш ефективного варіанта засобу індивідуального захисту для конкретних умов праці.

На основі результатів досліджень, виконаних у підрозділах 3.1-3.5.1, розроблено інтегральну модель оцінки професійних ризиків при виборі та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання. Запропонована модель об'єднує в єдиній системі показники, що характеризують вплив людського фактора, експлуатаційних ризиків, захисної ефективності респіратора, ресурсу захисної дії фільтрів та економічних аспектів використання ЗІЗОД. Структуру інтегральної моделі, взаємозв'язок її складових та критерій прийняття рішення наведено на рис. 3.12.

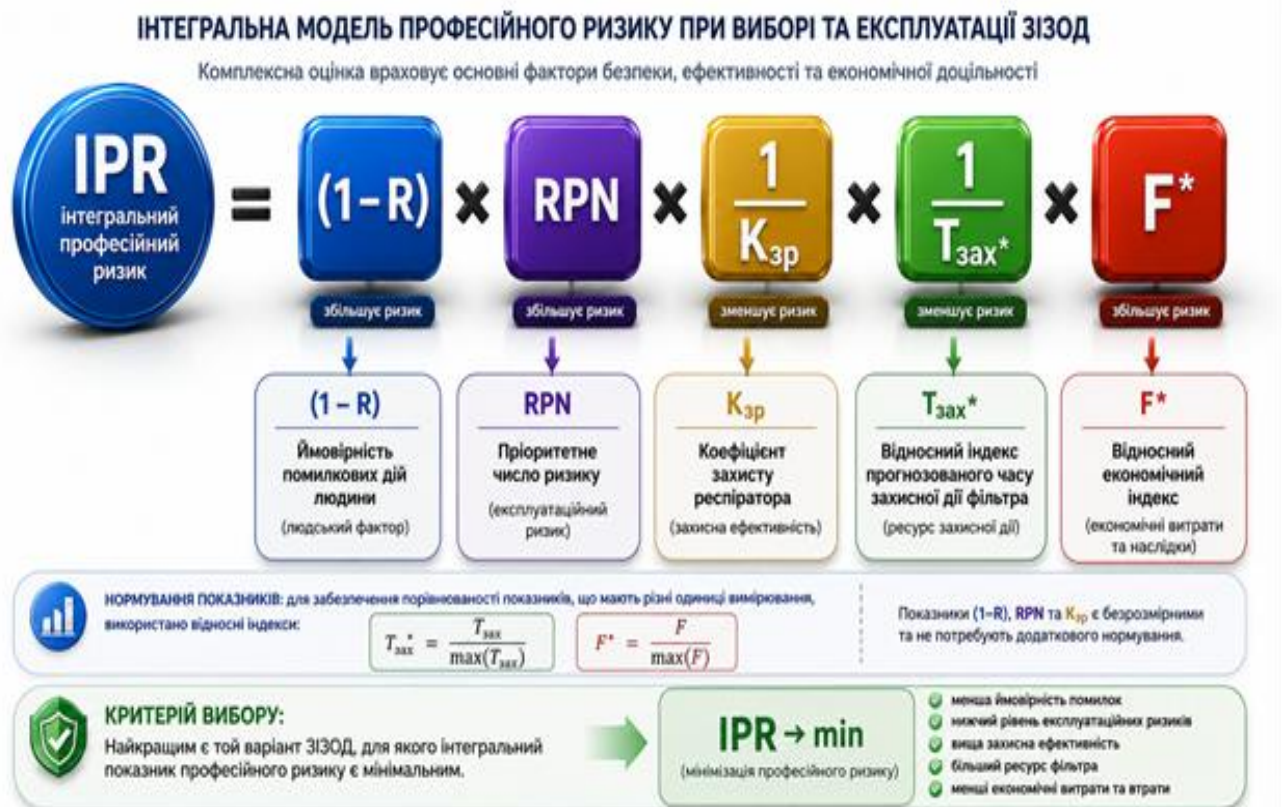


Рис. 3.12. Структурна схема інтегральної моделі оцінки професійних ризиків при виборі та експлуатації ЗІЗОД

Джерело: розроблено автором на основі узагальнених результатів власних досліджень, візуалізацію виконано з використанням інструментів штучного інтелекту

Як видно з рис. 3.12, інтегральний показник професійного ризику формується шляхом комплексного врахування п'яти основних груп факторів, кожна з яких характеризує окремий аспект безпечної та ефективної експлуатації ЗІЗОД. Людський фактор представлений імовірністю помилкових дій працівника (1-R), експлуатаційні ризики – показником RPN, захисна ефективність засобу захисту – коефіцієнтом захисту респіратора K_{zp} , довговічність захисних властивостей фільтра – відносним індексом прогнозованого часу захисної дії T_{zax}^* , а економічна складова – відносним економічним індексом F^* .

Запропонована структура моделі дозволяє перейти від оцінювання окремих характеристик ЗІЗОД до комплексного аналізу професійних ризиків у системі «працівник – ЗІЗОД – виробниче середовище». При цьому критерієм вибору є мінімізація інтегрального показника професійного ризику ($IPR \rightarrow$

min), що забезпечує одночасне врахування вимог безпеки праці, технічної ефективності засобів захисту та економічної доцільності їх застосування. Таким чином, розроблена модель створює методичне підґрунтя для обґрунтованого вибору та подальшого вдосконалення системи використання ЗІЗОД на підприємствах різних галузей промисловості.

Ця інтегральна модель є основою для побудови механізму безперервного вдосконалення системи управління професійними ризиками, реалізація якого здійснюється на основі циклу PDCA.

Оскільки професійні ризики та умови експлуатації ЗІЗОД змінюються в часі, запропонована інтегральна модель потребує механізму постійної актуалізації та вдосконалення. На відміну від статичних підходів до оцінювання ризиків, які базуються на одноразовому визначенні параметрів виробничого середовища та характеристик засобів захисту, практична експлуатація ЗІЗОД відбувається в умовах постійних змін виробничих процесів, технологій та організаційних умов праці. Унаслідок цього значення окремих складових інтегральної моделі можуть змінюватися протягом часу, що обумовлює необхідність їх періодичного перегляду та актуалізації.

Одним із факторів, що впливають на необхідність коригування результатів оцінювання професійних ризиків, є зміна технологічних процесів на підприємстві. Впровадження нового обладнання, модернізація виробництва, зміна режимів роботи або складу технологічних операцій можуть супроводжуватися появою нових небезпек або зміною рівня впливу вже існуючих шкідливих виробничих факторів. У таких умовах показники експлуатаційного ризику, визначені на попередньому етапі оцінювання, можуть втрачати актуальність та потребувати перегляду.

Важливим чинником також є зміна характеристик шкідливих виробничих факторів. Концентрації небезпечних речовин у повітрі робочої зони, параметри мікроклімату, тривалість перебування працівників у небезпечних умовах та інтенсивність фізичного навантаження можуть суттєво змінюватися залежно від виробничої ситуації. Це безпосередньо впливає на коефіцієнт захисту респіратора, прогнозований ресурс захисної дії фільтрів та інтегральний рівень професійного ризику.

Окрему увагу необхідно приділяти людському фактору. Показники надійності людини не є сталими величинами та залежать від рівня підготовки працівників, виробничого досвіду, психофізіологічного стану, рівня стомлення та якості проведеного навчання. Зміна складу персоналу, прийняття нових працівників або зміна умов виконання робіт можуть призводити до зміни імовірності помилкових дій під час використання ЗІЗОД, що потребує уточнення відповідних складових інтегральної моделі.

Не менш важливим є постійний розвиток ринку засобів індивідуального захисту. Поява нових конструкцій респіраторів, удосконалення фільтрувальних матеріалів, впровадження інноваційних систем кріплення та ущільнення створюють можливість підвищення ефективності захисту працівників. У зв'язку з цим інтегральна модель повинна забезпечувати можливість порівняння нових варіантів ЗІЗОД із засобами захисту, які вже використовуються на підприємстві, та підтримувати прийняття рішень щодо їх впровадження.

Крім того, у процесі експлуатації ЗІЗОД накопичується додаткова інформація щодо фактичної ефективності засобів захисту, результатів моніторингу виробничого середовища, випадків порушення правил використання ЗІЗОД, показників професійної захворюваності та результатів функціонування системи управління охороною праці. Використання цих даних дозволяє підвищувати достовірність оцінювання ризиків та уточнювати параметри інтегральної моделі відповідно до реальних умов виробництва.

З огляду на зазначене, для забезпечення довгострокової ефективності розробленої інтегральної моделі доцільно використовувати механізм її безперервного вдосконалення на основі циклу PDCA, теоретичні та організаційні засади якого були розглянуті в підрозділі 2.5. У межах запропонованого підходу цикл PDCA використовується не як окремий інструмент управління, а як механізм підтримання актуальності інтегральної моделі та забезпечення її адаптації до змін виробничого середовища.

Практична реалізація циклу PDCA в системі управління професійними ризиками при виборі та експлуатації ЗІЗОД із використанням розробленої інтегральної моделі наведена в табл. 3.43.

Таблиця 3.43

**Реалізація циклу PDCA в системі управління професійними
ризиками при експлуатації ЗІЗОД**

Етап	Реалізація в інтегральній моделі
Plan	Збір вихідних даних, визначення показників R, RPN, Кзр, Тзах, F, розрахунок інтегрального показника IPR та вибір оптимального варіанта ЗІЗОД
Do	Впровадження обраного варіанта ЗІЗОД, організація його експлуатації та навчання персоналу
Check	Моніторинг фактичних значень показників моделі, оцінювання ефективності використання ЗІЗОД та повторний розрахунок показника (IPR)
Act	Коригування вибору ЗІЗОД, уточнення параметрів інтегральної моделі та впровадження заходів щодо зниження професійних ризиків

Джерело: розроблено автором

Як видно з табл. 3.43, IPR стає кількісним критерієм оцінювання ефективності функціонування системи управління ризиками на кожному етапі циклу PDCA. Якщо за результатами моніторингу встановлено зростання значення IPR, це свідчить про погіршення умов безпеки або зниження ефективності використовуваних засобів захисту та потребує коригувальних дій. Навпаки, зменшення значення інтегрального показника підтверджує результативність прийнятих рішень та ефективність заходів щодо вдосконалення системи управління професійними ризиками.

Таким чином, використання циклу PDCA забезпечує перехід від одноразового оцінювання професійних ризиків до їх безперервного моніторингу та управління, а інтегральний показник IPR виступає інструментом кількісного оцінювання результативності цього процесу.

Для практичного використання розробленої інтегральної моделі оцінки професійних ризиків при виборі та експлуатації ЗІЗОД необхідно забезпечити її інтеграцію в існуючу систему управління охороною праці підприємства. На відміну від традиційних підходів, які передбачають окреме оцінювання небезпек, захисних властивостей засобів захисту або економічних показників, запропонована модель дозволяє здійснювати комплексне оцінювання професійних ризиків із урахуванням людського фактора, експлуатаційних ризиків, захисної ефективності, ресурсу захисної дії та економічної

доцільності використання ЗІЗОД. Узагальнення результатів проведених досліджень дозволило сформулювати рекомендації щодо впровадження інтегральної моделі оцінки професійних ризиків, наведені в табл. 3.44.

Таблиця 3.44

Рекомендації щодо впровадження інтегральної моделі оцінки професійних ризиків

Напрямок впровадження	Рекомендовані заходи	Очікуваний результат
Організація оцінювання ризиків	Використання інтегрального показника (IPR) під час вибору та перегляду ЗІЗОД	Підвищення обґрунтованості прийнятих рішень
Ідентифікація небезпек	Застосування інтегрованого підходу HAZOP-FMEA для визначення експлуатаційних ризиків	Підвищення повноти оцінювання небезпек
Урахування людського фактора	Періодичне оцінювання надійності працівників за модифікованим методом SPAR-H	Зниження ймовірності помилкових дій під час експлуатації ЗІЗОД
Вибір засобів захисту	Урахування коефіцієнта захисту, ресурсу захисної дії фільтрів та економічного критерію поряд із класом захисту	Підвищення ефективності вибору ЗІЗОД
Контроль експлуатації	Використання результатів моніторингу фактичних умов праці та параметрів ЗІЗОД для актуалізації моделі	Підвищення достовірності оцінювання ризиків
Моніторинг ефективності	Періодичний перерахунок інтегрального показника (IPR)	Контроль зміни рівня професійного ризику в часі
Управління змінами	Перегляд параметрів моделі при зміні технологічних процесів, умов праці або типів ЗІЗОД	Підтримання актуальності результатів оцінювання
Безперервне вдосконалення	Реалізація циклу PDCA в системі управління професійними ризиками	Забезпечення постійного зниження рівня професійних ризиків

Джерело: розроблено автором

Як видно з табл. 3.44, практичне впровадження розробленої інтегральної моделі передбачає не лише використання математичного апарату оцінювання ризиків, а й формування цілісної системи управління професійними ризиками при виборі та експлуатації ЗІЗОД. При цьому інтегральний показник IPR виступає основним кількісним критерієм прийняття рішень, який дозволяє оцінювати ефективність використовуваних засобів захисту та контролювати результати впроваджених заходів.

Запропоновані рекомендації можуть бути використані службами охорони праці, фахівцями з управління ризиками та керівниками підприємств під час організації системи забезпечення працівників засобами індивідуального захисту. Їх застосування дозволяє підвищити рівень обґрунтованості вибору ЗІЗОД, забезпечити зниження професійних ризиків та створити умови для безперервного вдосконалення системи управління безпекою праці на основі ризик-орієнтованого підходу.

Таким чином, у п. 3.5.2 розроблено інтегральну модель оцінки професійних ризиків при виборі та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання, яка забезпечує комплексне врахування основних факторів, що впливають на безпеку працівника в процесі виконання робіт у шкідливих та небезпечних умовах праці. На відміну від існуючих підходів, що переважно орієнтовані на оцінювання окремих складових ризику, запропонована модель об'єднує результати досліджень, виконаних у межах усіх попередніх підрозділів дисертаційної роботи, в єдину систему підтримки прийняття рішень щодо вибору та експлуатації ЗІЗОД.

Сформований інтегральний показник професійного ризику IPR враховує вплив людського фактора через показник надійності працівника, результати оцінювання експлуатаційних ризиків, захисну ефективність респіратора, прогнозований ресурс захисної дії фільтрів та економічні наслідки використання засобів захисту. При цьому економічний критерій, обґрунтований у підрозділі 3.5.1, інтегровано до складу загальної моделі як один із повноцінних компонентів професійного ризику, що дозволило поєднати вимоги безпеки праці та економічної доцільності в межах єдиного підходу до прийняття управлінських рішень.

Розроблена інтегральна модель забезпечує перехід від аналізу окремих характеристик ЗІЗОД до системного оцінювання професійних ризиків у системі «працівник – засіб індивідуального захисту – виробниче середовище». Це дозволяє не лише визначати найбільш ефективний варіант засобу захисту

для конкретних умов праці, але й здійснювати кількісне порівняння альтернативних рішень на основі єдиного інтегрального критерію.

Використання циклу безперервного вдосконалення PDCA забезпечує адаптацію розробленої моделі до змін виробничих умов, накопичення нових даних щодо експлуатації ЗІЗОД та постійне підвищення ефективності системи управління професійними ризиками. У цьому випадку інтегральний показник IPR виступає кількісним критерієм оцінювання результативності прийнятих рішень та дозволяє здійснювати обґрунтоване коригування заходів із забезпечення безпеки праці.

Таким чином, розроблена інтегральна модель є логічним результатом та синтезом наукових положень, методів і практичних рішень, отриманих у п. 3.1-3.5.1, і забезпечує їх об'єднання в межах єдиної ризик-орієнтованої системи оцінювання професійних ризиків. Саме інтеграція людського фактора, експлуатаційних ризиків, захисної ефективності ЗІЗОД, ресурсу захисної дії фільтрів та економічних критеріїв у межах єдиного інтегрального показника професійного ризику становить основу наукової новизни дисертаційної роботи та формує її завершену методологічну концепцію.

Висновки до розділу 3

1. Розроблено модель оцінювання надійності людини при експлуатації ЗІЗОД на основі модифікованого методу SPAR-H із запровадженням системи лінійних коригувальних коефіцієнтів K_t , K_n та K_p , що дозволяють врахувати вплив температури, відносної вологості підмаскового простору та фізіологічного навантаження (частоти пульсу) на ймовірність помилкових дій працівника. Експериментально підтверджено, що при інтенсивних фізичних навантаженнях коефіцієнт надійності повнолицьових масок деградує до рівня 0,56-0,65, тоді як півмаски зі змінними фільтрами демонструють кращі показники зазначеного коефіцієнта в діапазоні 0,74-0,79.

2. Удосконалено методику ідентифікації та оцінювання експлуатаційних ризиків ЗІЗОД шляхом інтеграції методів HAZOP та FMEA з розрахунком пріоритетного числа ризику (RPN), яка складається з чотирьох етапів: ідентифікація невідповідностей за керуючими словами HAZOP, визначення наслідків небезпечної події, оцінювання RPN та впровадження запобіжних заходів.

3. Удосконалено конструктивні елементи фільтрувального респіратора для підвищення герметичності прилягання та експлуатаційної ефективності за рахунок локальної перфорації обтюратора в зоні перенісся та щік, що забезпечує зниження коефіцієнта проникнення аерозолі на 65-68 % порівняно зі стандартною конструкцією. Для підвищення стабільності герметичного прилягання розроблено вставки-індикатори контролю натягу еластичних ремінців головного кріплення, які дозволяють візуально оцінювати оптимальний натяг (5-6 Н) та своєчасно виявляти його послаблення в процесі експлуатації.

4. Розроблено математичні моделі та програмні засоби оцінювання захисної ефективності ЗІЗОД, що дозволяють визначати коефіцієнт захисту респіратора з урахуванням реальних умов експлуатації та прогнозувати ресурс

захисної дії фільтрів залежно від концентрації шкідливих речовин, інтенсивності дихання працівника та характеристик сорбційного матеріалу.

5. Сформовано комплексний економічний критерій вибору ЗІЗОД, який інтегрує витрати на придбання та експлуатацію, економічні наслідки професійних захворювань та втрати продуктивності праці.

6. Запропоновано інтегральний показник професійного ризику, який формується як добуток п'яти безрозмірних складових: показник функціональної надійності працівника, пріоритетне число ризику, отримане інтеграцією методів HAZOP та FMEA, коефіцієнт захисту респіратора, що визначає зниження концентрації шкідливих речовин у підмасковому просторі та відносний індекс прогнозованого часу захисної дії фільтра, кожна з яких відображає окремий аспект безпеки працівника під час вибору та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання.

7. Сформовано практичні рекомендації щодо впровадження розробленої інтегральної моделі в систему управління охороною праці підприємств, що дозволяє перейти від нормативного підходу до ризик-орієнтованого вибору та експлуатації ЗІЗОД, підвищити обґрунтованість управлінських рішень та забезпечити стале зниження професійних ризиків у реальних виробничих умовах.

Основні результати, отримані в розділі 3, опубліковані в працях [8,17,32,36,42,56].

Список використаних джерел до розділу 3

1. Долженков А.П., Конопелько Є.І. Підвищення безпеки гірників за рахунок забезпечення їх ефективними засобами індивідуального захисту. Вісті Донецького гірничого інституту. 2016. Вип. 2 (39). С. 133-139. URL: <https://shortlink.uk/1wBeJ>
2. Radha K. et al. Prevalence of Physical and Psychological Impacts of Wearing Personal Protective Equipment on Health Care Workers During COVID-19: A Systematic Review and Meta-Analysis. Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine. 2022. Vol. 26, No. 3. P. 140-150. DOI: https://doi.org/10.4103/ijoem.ijoem_32_22
3. Jones J.G. The Physiological Cost of Wearing a Disposable Respirator. American Industrial Hygiene Association Journal. 1991. Vol. 52, No. 6. P. 219-225. DOI: <https://doi.org/10.1080/15298669191364631>
4. Costello J.T., Stewart K.L., Stewart I.B. The Effects of Metabolic Work Rate and Ambient Environment on Physiological Tolerance Times While Wearing Explosive and Chemical Personal Protective Equipment. BioMed Research International. 2015. Art. 857536. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/857536>
5. Панасюк І.В., Микитенко Л.І., Данилевич Н.С. Людський фактор у формуванні безпеки праці людини. Технології та дизайн. 2012. № 2 (3). С. 1-8. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/2864>
6. Степанова О.О., Дьоміна О.О., Шульга А.Г. Роль людського фактору в питаннях забезпечення промислової безпеки. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. 2012. Вип. 59. С. 135-137. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/478>
7. Tao J. et al. A Bibliometric Analysis of Human Reliability Research. Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 260. Art. 121041. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121041>
8. Кравченко Б.Д., Голінко В.І., Радчук Д.І. Оцінка надійності людини при використанні респіраторів у виробничих умовах. Науковий вісник

ДонНТУ. 2025. № 2 (15). С. 147-163. DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2025-2-15-147-163>

9. ДСТУ EN 13274-2:2022 (EN 13274-2:2019, IDT). Засоби індивідуального захисту органів дихання. Методи випробувань. Частина 2. Практичні випробування. Чинний від 01.01.2023. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. URL: <https://shortlink.uk/1wBfC>

10. JCGM 100:2008. Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM 1995 with Minor Corrections). Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), 2008. 134 p.

11. Ramezani A. et al. Human Error Probability Quantification for NPP Post-Accident Analysis Using Cognitive-Based THERP Method. Progress in Nuclear Energy. 2020. Vol. 123. Art. 103281. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103281>

12. Gertman D. et al. The SPAR-H Human Reliability Analysis Method / U.S. Nuclear Regulatory Commission. Washington: NRC, 2004. 154 p. (NUREG/CR-6883). URL: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6883/cr6883.pdf>

13. Bushman B.A. Metabolic Calculations in Action. Part 2. ACSM's Health & Fitness Journal. 2020. Vol. 24, No. 4. P. 5-8. DOI: <https://doi.org/10.1249/FIT.0000000000000577>

14. Janot J. How to Calculate Calories Expended. IDEA Health & Fitness Association. 31 May 2005 (updated 17 June 2021). URL: <https://www.ideafit.com/how-to-calculate-calories-expended/>

15. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень : затверджено постановою Головного державного санітарного лікаря України від 01.12.1999 № 42. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/va042282-99>

16. Nielsen R. et al. The Effect of Temperature and Humidity Levels in a Protective Mask on User Acceptability During Exercise. American Industrial

Hygiene Association Journal. 1987. Vol. 48, No. 7. P. 639-645. DOI: <https://doi.org/10.1080/15298668791385336>

17. Голінько В., Радчук Д., Чеберячко С., Наумов М., Кравченко Б., Дерюгін О. Оцінювання експлуатаційних ризиків засобів індивідуального захисту органів дихання. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація: зб. наук. пр. Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2024. Т. 8, № 2. С. 27-43. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2024.8.2.27.43>

18. Liu J. et al. Risk Assessment Based on FMEA Combining DEA and Cloud Model: A Case Application in Robot-Assisted Rehabilitation. Expert Systems with Applications. 2023. Vol. 214. Art. 119119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119119>

19. Alsulami F. The Operational Risk Disclosure Threshold Effect in the Earnings Management–Sustainability Firm Performance Nexus in Saudi Arabia: A Dynamic Panel Threshold Regression Model. Sustainability. 2024. Vol. 16. Art. 4264. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16104264>

20. Ayvaz B. et al. An Integrated Fine-Kinney Risk Assessment Model Utilizing Fermatean Fuzzy AHP-WASPAS for Occupational Hazards in the Aquaculture Sector. Process Safety and Environmental Protection. 2024. Vol. 186. P. 232-251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.04.025>

21. Fan C., Montewka J., Zhang D. Towards a Framework of Operational-Risk Assessment for a Maritime Autonomous Surface Ship. Energies. 2021. Vol. 14. Art. 3879. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14133879>

22. Chung H.-Y., Ting T.-H., Chang K.-H. A Novel Intuitionistic Fuzzy Set-Based Risk Priority Number Method for Solving Chemical Experiment Risk Evaluation. Systems. 2024. Vol. 12. Art. 155. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems12050155>

23. Trammell S.R., Davis B.J. Using a Modified HAZOP/FMEA Methodology for Assessing System Risk. Proceedings of the 2nd International Workshop on Engineering Management for Applied Technology (EMAT 2001)

(Austin, TX, 2001). Austin: IEEE, 2001. P. 47-53. DOI: <https://doi.org/10.1109/EMAT.2001.991310>

24. Ajith M.M., Ghosh A.K., Jansz J. Risk Factors for the Number of Sustained Injuries in Artisanal and Small-Scale Mining Operation. *Safety and Health at Work*. 2020. Vol. 11, No. 1. P. 50–60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2020.01.001>

25. Akagi F. et al. Effect of Face Shield Design on the Prevention of Sneeze Droplet Inhalation. *Physics of Fluids*. 2021. Vol. 33. Art. 037131. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0044367>

26. Akgün M. Coal Mine Accidents. *Turkish Thoracic Journal*. 2015. Vol. 16, No. 1. P. S1-S2. DOI: <https://doi.org/10.5152/ttd.2015.008>

27. Alpert S.I. The Basic Arithmetic Operations with Fuzzy Numbers and the Latest Approaches to the Application of the Theory of Fuzzy Sets in the Classification of Space Images. *Mathematical Machines and Systems*. 2020. No. 3. P. 49-59. DOI: <https://doi.org/10.34121/1028-9763-2020-3-49-59>

28. Amponsah-Tawiah K., Mensah J. Occupational Health and Safety and Organizational Commitment: Evidence from the Ghanaian Mining Industry. *Safety and Health at Work*. 2016. Vol. 7, No. 3. P. 225-230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2016.01.002>

29. Balan V. Fuzzy Modeling Toolkit in Strategic Enterprise Management. *State and Regions. Series: Economics and Business*. 2021. No. 1 (118). P. 48-56. DOI: <https://doi.org/10.32840/1814-1161/2021-1-8>

30. Bazaluk O. et al. Development of a Dust Respirator by Improving the Half Mask Frame Design. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18, No. 10. Art. 5482. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18105482>

31. Bazaluk O. et al. Research on Regularities of Cyclic Air Motion Through a Respirator Filter. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 7. Art. 3157. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11073157>

32. Cheberiachko S., Cheberiachko Y., Deryugin O., Kravchenko B. et al. Increasing the Insulation Properties of Filter Respirators to Protect Miners' Respiratory Organs from Dust. Rudarsko-geološko-naftni zbornik. 2023. Vol. 38, No. 4. P. 27-40. DOI: <https://doi.org/10.17794/rgn.2023.4.3>
33. EN 140:1998. Respiratory Protective Devices. Half-Masks and Quarter-Masks. Requirements, Testing, Marking. Brussels: CEN, 1998. 26 p.
34. EN 149:2001+A1:2009. Respiratory Protective Devices. Filtering Half Masks to Protect Against Particles. Requirements, Testing, Marking. Brussels : CEN, 2009. 41 p. URL: <https://shortlink.uk/1razi>
35. Stemen D. et al. Frame to Improve the Fit of N95 Filtering Face Mask Respirators. Journal of Occupational and Environmental Medicine. 2021. Vol. 63, No. 6. P. e362-e366. DOI: <https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000002223>
36. Tretiakova L., Cheberyachko Y., Sharovatova O., Nehrii T., Nehrii S., Kravchenko B., Zolotarova O. The Influence of Head Strap Elasticity on the Protective Properties of Filtering Facepiece Respirators. Rudarsko-geološko-naftni zbornik. 2024. Vol. 39, No. 1. P. 131-140. DOI: <https://doi.org/10.17794/rgn.2024.1.11>
37. Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments. 10th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2020. 752 p.
38. Cai M. et al. Customized Design and 3D Printing of Face Seal for an N95 Filtering Facepiece Respirator. Journal of Occupational and Environmental Hygiene. 2018. Vol. 15, No. 3. P. 226-234. DOI: <https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1411598>
39. Cheberyachko S., Cheberyachko Y., Naumov M., and Deryugin O. Development of an Algorithm for Effective Design of Respirator Half-Masks and Encapsulated Particle Filters. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics. 2022. Vol. 28, No. 2. P. 1145-1159. DOI: <https://doi.org/10.1080/10803548.2020.1869429>

40. Cornejo P., Guerrero N., Sandoval V. Aerodynamic Dispersion of Respiratory Droplets and Aerosols by Turbulent Airflow. *Fluids*. 2021. Vol. 6, No. 3. Art. 119. P. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids6030119>
41. Slavinskyi D. et al. Automated Air Pressure Control System in a Motorised Breathing Apparatus. *Machinery & Energetics*. 2024. Vol. 15, No. 1. P. 9-22. DOI: <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2024.09>
42. Чеберячко С.І., Радчук Д.І., Дерюгін О.В., Чеберячко Ю.І., Наумов М.М., Кравченко Б.Д. Удосконалення моделі для розрахунку коефіцієнта захисту фільтрувального респіратору від шкідливого аерозолі. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. Вип. 48. С. 142-157. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310702>
43. Xie X. et al. How Far Droplets Can Move in Indoor Environments – Revisiting the Wells Evaporation-Falling Curve. *Indoor Air*. 2007. Vol. 17, No. 3. P. 211-225. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2007.00469.x>
44. ДСТУ EN 149:2017 (EN 149:2001, IDT). Засоби індивідуального захисту органів дихання. Фільтрувальні півмаски для захисту від аерозолів. Вимоги, випробування, маркування. Чинний від 01.02.2018. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. 41 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=75012 (дата звернення: 15.12.2025).
45. ДСТУ EN 13274-1:2005 (EN 13274-1:2001, IDT). Засоби індивідуального захисту органів дихання. Методи випробувань. Частина 1. Визначення коефіцієнта проникання і загального коефіцієнта проникання. Чинний від 01.01.2006. Київ: Держспоживстандарт України, 2005. 18 с.
46. JCGM 100:2008. Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM 1995 with Minor Corrections). Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), 2008. 134 p. DOI: <https://doi.org/10.59161/JCGM100-2008E>
47. ILAC-G17:01/2021. Introducing the Concept of Uncertainty of Measurement in Testing in Association with the Application of the Standard

ISO/IEC 17025. International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC), 2021. 12 p. URL: https://iaac.org.mx/wp-content/uploads/2025/05/IAAC-GD-001-ILAC_G17_2021-Traduccion-ESP.pdf

48. Cornejo P., Guerrero N., Sandoval V. Aerodynamic Dispersion of Respiratory Droplets and Aerosols by Turbulent Airflow. *Fluids*. 2021. Vol. 6, No. 3. Art. 119. P. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids6030119>

49. Han Y., Hu Y., Qian F. Effects of Air Temperature and Humidity on Particle Deposition. *Chemical Engineering Research and Design*. 2011. Vol. 89, No. 10. P. 2063-2069. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.02.001>

50. Yuan Y. et al. Effects of Ambient Temperature and Humidity on Natural Deposition Characteristics of Airborne Bio-Mass Particles. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023. Vol. 20, No. 3. Art. 1890. P. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20031890>

51. Радчук Д.І. та ін. Аналіз ефективності існуючих способів визначення часу захисної дії протигазових фільтрів. *Науковий вісник ДонНТУ*. 2023. № 2 (11). С. 128-137. DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-11-128-137>

52. Lodewyckx P., Fernandez-Velasco L., Boutillara Y. Estimating the Service Life of Activated Carbon Filters for Air Purification. *Eurasian Chemico-Technological Journal*. 2019. Vol. 21, No. 3. P. 193-201. DOI: <https://doi.org/10.18321/ectj860>

53. 3M Science. Applied to Life. Select and Service Life Calculator / 3M Company. URL: <https://sls.3m.com/>

54. Cartridge Life Expectancy Calculator / MSA Safety Company. Response Guide. URL: <http://webapps.msasafety.com/ResponseGuide/ChemicalCalculator.aspx>

55. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). MultiVapor™, Version 2.2.6 / National Personal Protective Technology Laboratory (NPPTL). DHHS (NIOSH) Publication No. 2010-124C. URL: <https://www.cdc.gov/niosh/npptl/multivapor/multivapor.html>

56. Радчук Д.І., Чеберячко Ю.І., Чеберячко С.І., Наумов М.М., Кравченко Б.Д. Розробка програми для розрахунку прогнозного часу експлуатації протигазових фільтрів. Вісті Донецького гірничого інституту. 2024. № 2 (55). С. 80-91. DOI: <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2024-2-80-91>

57. Abiko H., Furuse M., Takano T. Estimation of Organic Vapor Breakthrough in Humidified Activated Carbon Beds: Application of Wheeler-Jonas Equation, NIOSH MultiVapor™ and RBT (Relative Breakthrough Time). Journal of Occupational Health. 2016. Vol. 58, No. 6. P. 570-581. DOI: <https://doi.org/10.1539/joh.15-0244-OA>

58. Respirator Change Schedules: Using a Math Model Table to Determine a Cartridge's Service Life. The Yoon-Nelson Mathematical Model / U.S. Occupational Safety and Health Administration (OSHA). URL: <https://www.osha.gov/etools/respiratory-protection/change-schedules/math-model>

59. Borsi I., Fasano A., Lenzini L. Computing the Lifetime of Granular Activated Carbon Filters by Means of Travelling Waves Solutions. Applied Mathematical Modelling. 2011. Vol. 35, No. 4. P. 1868-1880. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.10.016>

60. ДСТУ EN 14387:2021 (EN 14387:2021, IDT). Засоби індивідуального захисту органів дихання. Фільтри протигазові і фільтри комбіновані. Вимоги, випробування, маркування. Чинний від 01.08.2022. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021. URL: <http://surl.li/pkzkdy> (дата звернення: 17.10.2025).

61. Janvier F. Effect of Mixtures: Optimization of Parameters Used in Predictive Models for Respirator Cartridge Service Life for Toxic Organic Vapors: PhD thesis. Montreal: Université de Montréal, 2017. 175 p.

62. Голінько В.І., Гридяєв В.В. Прогнозування ризику виникнення професійних захворювань пилової етіології. Вісті Донецького гірничого інституту. 2022. № 2 (51). С. 25-34. DOI: <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2022-2-25-34>

63. Вагонова О.Г., Касьяненко Л.В. Економічні аспекти управління охороною праці на вугледобувних підприємствах: монографія. Дніпропетровськ: Державний ВНЗ «НГУ», 2013. 187 с.

64. Голінько В.І., Кравченко Б.Д. Економічне обґрунтування вибору засобів індивідуального захисту органів дихання. Вісті Донецького гірничого інституту. 2023. № 2 (53). С. 14-25. DOI: <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2023-2-14-25>
65. Голінько В. І. Соціально-економічний моніторинг умов праці: навч. посіб. Дніпропетровськ: Державний ВНЗ «НГУ», 2017. 150 с.
66. Голінько В.І. та ін. Методологія оцінювання та управління професійними ризиками у виготовленні та використанні засобів індивідуального захисту: монографія. Дніпро: Середняк Т.К., 2021. 224 с.
67. Caretti D.M., Whitley J.A. Exercise Performance During Inspiratory Resistance Breathing Under Exhaustive Constant Load Work. Ergonomics. 1998. Vol. 41, No. 4. P. 501-511. DOI: <https://doi.org/10.1080/001401398186973>
68. Чеберячко С.І., Чеберячко Ю.І. Оцінка впливу засобів індивідуального захисту органів дихання на працездатність людини. Науковий вісник НГУ. 2007. № 7. С. 60-63.
69. Чеберячко С.І. та ін. Експериментальні дослідження впливу параметрів мікроклімату на працездатність людини під час використання фільтрувальних респіраторів. Український журнал з проблем медицини праці. 2017. № 4 (53). С. 54-58.
70. Cheberiachko S.I. et al. Mathematical Model of Air Flow Movement in a Motorized Filter Respirator. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2023. No. 3. P. 97-103. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-3/097>
71. Hwang C.L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. New York: Springer, 1981. 270 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-48318-9>
72. Cheberiachko Y., Radchuk D., Cheberiachko S., Slavinskyi D., & Kravchenko B. Development of a Filtering Respirator with a Real-Time Monitoring Device for Pressure Drop. Social Development and Security. 2026. No. 16 (1). P. 217-226. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.1.16>

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено завдання підвищення ефективності управління професійними ризиками при виборі та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД) шляхом розроблення інтегральної моделі оцінки професійних ризиків, яка враховує людський фактор, експлуатаційні ризики, захисну ефективність, прогнозований ресурс захисної дії та економічні критерії прийняття рішень. На основі проведених досліджень можна сформулювати такі узагальнюючі висновки.

1. Проведений у розділі 1 аналіз нормативно-правової бази, наукових джерел та існуючих методів оцінки ризиків показав, що чинні підходи переважно орієнтовані на окремі складові ризику (технічні, організаційні або економічні) і не забезпечують комплексного врахування взаємозв'язку між конструктивними особливостями респіратора, фізіологічним станом працівника, динамікою експлуатаційних ризиків та економічними наслідками. Встановлено, що існуючі стандарти та методики мають переважно статичний характер і недостатньо регулюють динамічні ризики тривалої експлуатації ЗІЗОД, що створює суттєві прогалини в системі управління охороною праці.

2. Удосконалено модель оцінювання надійності людини при експлуатації ЗІЗОД на основі модифікованого методу SPAR-H (Standardized Plant Analysis Risk - Human Reliability Analysis), яка, на відміну від класичного варіанту методу, додатково враховує вплив параметрів підмаскового простору (температури, відносної вологості) та фізіологічного навантаження (частоти пульсу) на ймовірність безпомилкового виконання виробничих операцій.

3. Визначні закономірності формування лінійних коригувальних коефіцієнтів K_t , K_n та K_p , які дозволяють оцінити негативний вплив мікроклімату підмаскового простору на функціональну надійність працівника через інтенсивні фізичні навантаження, зростання опору фільтрувальних елементів, збільшення підсмоктування нефільтрованого повітря через

нешільності смуги обтюрції та накопичення вологи у підмасковому просторі респіратора.

4. Удосконалено методику ідентифікації та оцінювання експлуатаційних ризиків ЗІЗОД шляхом інтеграції методів HAZOP та FMEA, яка, на відміну від традиційного застосування цих методів до технологічних процесів, адаптована специфічно до життєвого циклу засобів індивідуального захисту, яка складається з чотириетапної процедури ідентифікації відхилень за керуючими словами HAZOP, визначення небезпечних чинників, розрахунку RPN та обґрунтуванні впровадження заходів.

5. Удосконалено конструктивні елементи фільтрувального респіратора з метою підвищення герметичності прилягання та експлуатаційної ефективності через локальну перфорацію обтюратора в зоні перенісся та щік, що забезпечує зниження коефіцієнта проникнення аерозолі на 65-68 % порівняно зі стандартною конструкцією за рахунок покращення адаптації до антропометричних особливостей обличчя.

6. Запропоновано для підвищення контролю захисної ефективності респіраторів оснастити стрічки наголів'я вставками-індикаторами контролю натягу еластичних ремінців, що дозволяють візуально підтримувати оптимальний натяг (5-6 Н) та своєчасно виявляти його послаблення в процесі експлуатації, що суттєво знижує ризик порушення герметичності.

7. Розроблено удосконалені математичні моделі оцінювання захисної ефективності ЗІЗОД та прогнозування ресурсу захисної дії фільтрувальних елементів, що на відміну від існуючих номінальних розрахунків, враховують реальні умови експлуатації через оцінювання параметрів дихального процесу працівника, концентрацію шкідливих речовин, характеристики сорбційного матеріалу та динаміку навантаження.

8. Запропоновано комплексний економічний критерій оцінювання ефективності використання ЗІЗОД, який, на відміну від традиційних підходів, орієнтованих лише на закупівельну вартість, інтегрує сукупні витрати протягом життєвого циклу засобу захисту, очікувані збитки від професійних

захворювань та втрати продуктивності праці залежно від опору диханню та умов мікроклімату.

9. Розроблено інтегральну модель оцінки професійних ризиків при виборі та експлуатації ЗІЗОД, яка об'єднує в межах єдиного безрозмірного показника IPR п'ять взаємопов'язаних складових: ймовірність помилкових дій працівника ($1-R$), експлуатаційний ризик засобу захисту (RPN), обернену захисну ефективність ($1/K_{зр}$), обернений відносний індекс прогнозованого часу захисної дії фільтра ($1/T^*_{зах}$) та відносний економічний індекс (F^*), що відображає синергетичний характер професійного ризику та дозволяє здійснювати вибір ЗІЗОД з одночасним врахуванням людського, технічного, експлуатаційного та економічного небезпечних чинників.

10. Обґрунтовано механізм безперервного вдосконалення інтегральної моделі на основі циклу PDCA, який забезпечує адаптацію системи управління професійними ризиками до змін виробничого середовища, технологічних процесів, характеристик нових засобів захисту та результатів моніторингу через оцінювання інтегрального показника професійних ризиків як кількісного критерію результативності кожного етапу циклу (Plan-Do-Check-Act).

11. Створено цілісний науково-методичний комплекс для ризик-орієнтованого вибору та експлуатації ЗІЗОД, який включає: модель оцінювання надійності людини, методику аналізу експлуатаційних ризиків, конструктивні рішення для підвищення герметичності респіраторів, математичні моделі та програмний комплекс прогнозування захисних властивостей, економічний критерій вибору та інтегральну модель професійного ризику.

ДОДАТКИ

Додаток А
Положення
про ідентифікацію невідповідностей та розрахунок пріоритетного числа
ризиків засобів індивідуального захисту працівників

Погоджено
Директор ТОВ НВП «СТАНДАРТ»


М.С. Васильченко
«4» грудня 2023 р.

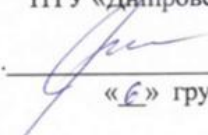
Затверджено

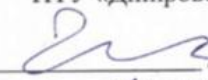
Проректор з наукової роботи
НТУ «Дніпровська політехніка»
д.г-м.н., І.С. Нікітенко
«13» грудня 2023 р.

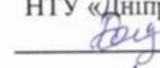
ПОЛОЖЕННЯ

про ідентифікацію невідповідностей та розрахунок пріоритетного
числа ризиків засобів індивідуального захисту працівників

Розроблено

Завідувач кафедри охорони праці та
цивільної безпеки
НТУ «Дніпровська політехніка»,

д.т.н., Голінько В.І.
«6» грудня 2023 р.

Професор кафедри охорони праці та
цивільної безпеки
НТУ «Дніпровська політехніка»,

д.т.н., Чеберячко С.І.
«6» грудня 2023 р.

Аспірант кафедри охорони праці та
цивільної безпеки
НТУ «Дніпровська політехніка»,

Кравченко Б.Д.
«1» грудня 2023 р.

Зміст:

1. Призначення.....	2
2. Сфера застосування.....	2
3. Відповідальність.....	3
4. Терміни, визначення та скорочення	4
5. Загальні положення.....	5
6. Порядок ідентифікації відмов та оцінювання ризиків і можливостей .	6
7. Періодичний аналіз актуальності ризиків	9
8. Посилання на документи	9
9. Додаток 1 Матриця визначення рівня ризиків	10
10. Додаток 2. Критерії оцінки рівня ризику.....	11
11. Додаток 3. Карта ідентифікації відмов та оцінки ризиків	12

1. Призначення

1.1 Це положення встановлює порядок планування та проведення робіт з ідентифікації невідповідностей та оцінки ризиків засобів індивідуального захисту працівників (ЗІЗП), що містять у собі:

- планування та організацію робіт з ідентифікації невідповідностей та оцінки ризиків;
- ідентифікацію невідповідностей та оцінювання ризиків;
- прийняття рішень щодо необхідності проведення дій з обробки;
- документування та оновлення інформації про ризики;
- доведення інформації про ризики та заходи з керування ними до відповідальних виконавців.

2. Сфера застосування

2.1 Положення даної документованої процедури поширюються на продукцію, що виготовляється ТОВ науково – виробниче підприємство «Стандарт».

3. Відповідальність

3.1 Вище керівництво відповідає за:

- демонстрування особистого прикладу лідерства і відданості принципам забезпечення високої якості продукції та забезпечення підтримки керівників підрозділів підприємства щодо демонстрації ними свого лідерства в такому обсязі та вигляді, що відповідають їхній зоні відповідальності;
- забезпечення процесу планування та проведення робіт з ідентифікації відмов та оцінки ризиків ЗІЗП усіма необхідними ресурсами.

3.2 Представник вищого керівництва - відповідальний за систему управління якості (керівник з якості) відповідає за:

- організацію та планування робіт з ідентифікації невідповідностей, оцінки ризиків;
- координацію та організацію заходів, спрямованих на керування ризиками у сфері якості;
- надання методологічної допомоги в проведенні ідентифікації невідповідностей, оцінки ризиків керівникам структурних підрозділів;
- надання вищому керівництву інформації про ризики ЗІЗП.

3.3 Начальник структурного підрозділу відповідає за:

- організацію та проведення навчання працівників з ідентифікації невідповідностей, оцінки ризиків;
- формування «Класифікатору невідповідностей»;
- документування та оновлення інформації про невідповідності, оцінки їх ризиків;
- організацію і проведення робіт з ідентифікації невідповідностей, оцінки ризиків;
- проведення періодичного перегляду складу та оцінок ризиків не рідше одного разу на рік, або за необхідності (при суттєвих змінах, впровадженні нових продуктів, послуг та процесів або змін, пов'язаних з

наявними продуктами, послугами та процесами розміщення робочих місць, виробничого середовища, організації робіт, умов праці, устаткування, трудових ресурсів, змін в законодавчих та інших вимогах, у знаннях або інформації про відмови чи ризики, розвитку знань і технологій з безпеки праці);

- оформлення **«Карт ідентифікації невідповідностей та оцінки ризиків» (карта ризиків)** та своєчасне надання їх керівнику з якості ;
- своєчасне виконання заходів з керування ризиками;
- аналіз наслідків незапланованих змін та вжиття заходів для зменшення негативних впливів;
- ознайомлення працівників підрозділу з оцінкою ризиків;
- забезпечення участі в процесі оцінки ризиків компетентних осіб з належною кваліфікацією.

3.4 Працівники несуть відповідальність за:

- дотримання під час виконання своєї роботи вимог стандартів та інструкцій, пов'язаних з виявленими невідповідностями та оцінкою їх ризиків;
- своєчасне інформування своїх керівників щодо виявлення нових не врахованих небезпечних умов, інших випадків, інцидентів щодо порушення вимог інструкцій та рекомендацій.

4. Терміни, визначення та скорочення

4.1 Терміни та визначення наведені згідно стандартів ISO 9001, ISO 31000, ISO 19011 та ін.:

Зацікавлена сторона - особа або організація, яка може вплинути на (або на них може вплинути, а також відчувати себе під впливом) рішення або діяльність підприємства;

Встановлення контексту (середовища) – визначення зовнішніх і внутрішніх параметрів, які слід взяти до уваги під час керування ризиками, а також встановлення області та критеріїв ризику для політики ризик-менеджменту;

Невідповідність – невиконання вимоги;

Ризик – поєднання імовірності (частоти) виникнення пов'язаної з роботою небезпечної події або впливу і тяжкості наслідків, які можуть бути викликані цією подією або впливом;

Ідентифікація невідповідностей – процес знаходження, розпізнавання і опису невідповідностей;

Аналіз ризику – процес розуміння природи ризику і визначення рівня ризику;

Критерії оцінки рівня ризику – дані, за якими оцінюється прийнятність ризику;

Число пріоритетності ризику (RPN) — напівкількісна міра критичності, яку одержують множенням чисел ранжувальних шкал (зазвичай між 1 та 10), що відповідають наслідку відмови, на правдоподібність відмови і спроможність виявити проблему.

Визначення ступеня ризику – процес порівняння результатів аналізу ризику з критеріями ризику для визначення того, чи можна прийняти величину ризику.

Джерело ризику – елемент, який сам по собі або в комбінації з іншими має внутрішній потенціал для виникнення ризику.

Керування ризиками – скоординовані дії для управління організацією з урахуванням ризику.

Підрядник – зовнішня організація, що надає послуги підприємству відповідно до погоджених вимог, строків та умов, в тому числі і послуги аутсорсингу.

5. Загальні положення

5.1 Число пріоритетності ризику визначається за усіма видами продукції щорічно.

5.2 Завдання з розрахунку числа пріоритетності ризику (до 1 лютого) формується керівником з якості та доводиться до керівників підрозділів у вигляді розпорядження.

5.3 Керівники структурних підрозділів організовують проведення розрахунку числа пріоритетності ризику у терміни згідно розпорядження.

5.4 За основу для розрахунку рівнів ризиків потрібно брати найбільш серйозні можливі наслідки та причини.

5.5 На підприємстві прийнято розраховувати число пріоритетності ризику за формулою:

$$RPN=S \times O \times D (1),$$

де: S – числове значення фактору серйозності наслідків відмови;

O – частота появи відмови;

D – ймовірність виявлення.

5.7. Шкали значимості фактору серйозності, частоти, ймовірності наведені в додатку 1.

6. Порядок ідентифікації невідповідностей та оцінювання ризиків

6.1 Керівник з якості з періодичністю 1 раз на рік не пізніше 20 числа першого місяця визначає:

- зовнішні та внутрішні чинники, які впливають на виготовлення продукції робить їх аналіз (**Аналіз робочого середовища організації**);
- зацікавлені сторони, та робить аналіз їх потреб та очікувань.

6.2 Керівник з якості розробляє **Класифікатор** невідповідностей, який переглядає не рідше одного разу на рік не пізніше 20 січня та затверджує у керівника підприємства.

6.3 Ідентифікація відмов та розрахунок числа пріоритетності ризику проводиться з кожним зразком ЗІЗ згідно **Класифікатора** невідповідностей.

6.4 Розрахунок числа пріоритетності ризиків проводиться:

- при первинному виготовленні продукції;
- планово періодично (не рідше 1-го разу на рік) робочими групами підрозділів (в терміни згідно розпорядження, які мають бути узгодженими з термінами формування системи бюджету підприємства);
- позапланово після реклаमाцій, протягом одного місяця (перегляд існуючої карти ризиків чи оформлення нової карти ризиків у випадку появи неідентифікованої раніше відмови або невірно оціненого рівня ризику);
- при змінах у технологічному процесі (наприклад: виробничих процесів, матеріалів, реконструкції чи модернізація обладнання та інше);
- при ухваленні рішення про коригування виробничих процесів.

6.5 Розрахунок числа пріоритетності ризику містить у собі наступні завдання:

- ідентифікація невідповідностей, оцінка поточного рівня причин і наслідків цих відмов;
- визначення необхідних заходів щодо усунення чи зниження поточного рівня невідповідностей за рахунок:
 - 1) усунення невідповідності - заходи зі зміни робочого процесу таким чином, щоб повністю усунути впливовий фактор (найбільш ефективний засіб);
 - 2) заміна процесів, операцій, матеріалів або устаткування;
 - 3) застосування технічних засобів;
 - 4) застосування адміністративних засобів – процедури, правила, нагляд, навчання, тренування, інструктаж тощо.

6.6 Джерелами необхідної інформації для проведення розрахунку числа пріоритетності ризику є:

- існуючий опис процесу виготовлення продукції та технічна документація з експлуатації обладнання;
- **Аналіз робочого середовища організації;**
- **Аналіз потреб та очікувань працівників та інших зацікавлених сторін, в тому числі аналіз чинних законодавчих та нормативно-правових вимог, що відносяться до даного процесу;**

- інформація про відхилення, невідповідності та порушення, виявлені раніше;

- результати внутрішніх аудитів;
- результати зовнішніх аудитів;
- **Класифікатор** невідповідностей ;
- інші дані та інформація про відхилення у процесах.

6.7 Для оформлення Класифікатора невідповідностей можуть долучатись інші компетентні працівники, яких призначає керівник з якості.

6.8 Результати ідентифікації відмов керівник з якості заносить у класифікатор, після чого проводить оцінку поточного рівня ризику та робить висновок до прийнятності ризику згідно **Додатку 2**.

6.9 У випадках, коли ризик оцінено як «Неприйнятний» (Н), керівник з якості подає інформацію керівнику структурного підрозділу та керівнику підприємства. Виробництво невідповідної продукції припиняють.

6.10 Керівник структурного підрозділу розробляє **Заходи до зниження ризику**, погоджує їх з керівником підприємства, головними спеціалістами за напрямком діяльності (головний механік, метролог, головний енергетик, технолог тощо).

6.11 У випадках, коли ризик оцінено як «Прийнятний з перевіркою» (ПП), керівник з якості подає інформацію керівнику структурного підрозділу, який на підставі цього видає розпорядження про призначення відповідального за здійснення перевірок та встановлює порядок і періодичність перевірок. **Заходи до зниження ризику** у цьому випадку не розробляються.

6.14 У випадках, коли ризик оцінено як «Прийнятний» (П), керівник з якості інформує про це керівника структурного підрозділу, **Заходи до зниження ризику** не розробляються.

6.15 У разі виявлення потреби та можливості зниження рівня ризику, що визначений як «Прийнятний з перевіркою» (ПП), керівник підрозділу розробляє **Заходи до зниження ризику** і Призначений виконавець заносить їх у **Карти розрахунку пріоритетності ризику** проводить оцінку **Залишкового рівня**

пріоритетності ризику-та робить **Висновки щодо прийнятності залишкового ризику** і подає **Карту розрахунку пріоритетності ризику** на погодження і затвердження.

6.16 Прийняття рішень щодо впровадження заходів з усунення відмов чи зниження ризиків здійснюють начальники виробництв, головні спеціалісти за напрямком діяльності (головний інженер, головний механік, головний метролог, головний енергетик, головний технолог тощо),

7. Періодичний аналіз актуальності ризиків

7.1 Керівники структурних підрозділів проводять аналіз актуальності ідентифікованих ризиків з урахуванням реалізованих за останній рік змін і зареєстрованих відмов. За результатом аналізу, подають керівнику з якості (не пізніше 10 лютого).

7.2 Отримані дані аналізу керівник з якості враховує при підготовці інформації про ступінь актуальності ризиків для проведення аналізу СУЯ з боку керівництва.

Додаток 1 Шкали значимості фактору серйозності, частоти, ймовірності

Серйозність відмови, "S"	Частота появи, "O"	Ймовірність виявлення, "D"
1	1	1
2	2	2
3	3	3
4	4	4
5	5	5
6	6	6
7	7	7
8	8	8
9	9	9
10	10	10
де «1» - неважлива «10» - катастрофічна	де «1» - дуже рідко «10» - постійно	де «1» - виявлення 100%; «10» - неможливо виявити

Додаток 2. Критерії оцінки рівня ризику

Рівень пріоритетності ризику	Якість	Відповідність вимогам	Бізнес	Частота появи	Ймовірність виявлення
	Тяжкість наслідків				
Неприйнятний більше 140 балів	Ймовірно, завдасть шкоди споживачеві	Приведе до відкликання продукції	Простий більше одного тижня або потенційна велика втрата доходу	Понад один раз протягом трьох місяців	Навряд чи може бути виявлений у більшості випадків
Прийнятний з перевіркою від 70 до 140 балів	Ймовірно, не завдасть шкоди споживачеві	Приведе до одержання попереджувального листа	Простий до одного тижня або потенційна суттєва втрата доходу	Один раз кожні тридванадцять місяців	Може бути виявлений у деяких випадках
Прийнятний менше 70 балів	Не завдають шкоди споживачеві	Приведе до виявлення невідповідності під час аудиту	Простий до одного дня або незначна втрата доходу	Один раз кожні один-три роки	Ймовірно, буде виявлено

8. Додаток 3. Карта з розрахунку числа пріоритетності ризику

КАРТА З РОЗРАХУНКУ ЧИСЛА ПРІОРИТЕТНОСТІ РИЗИКУ № _____

Дата:		Схема/фото продукту					Підпис		
Зразок: (дільниця, цех, виробництво)							ЗАТВЕРДЖЕНО: (посада, прізвище, ініціали)		
Місце виявленої відмови:							ПОГОДЖЕНО: (посада, прізвище, ініціали)		
Кому загрожує виявлена невідповідність:							Керівник підрозділу: (посада, прізвище, ініціали)		
							Розробив: (посада, прізвище, ініціали)		
№	Код продукту	Функція продукту	Опис можливої відмови	Опис можливої причини	Опис наслідків	Розрахунок числа пріоритетності ризику		Рівень RPN	Запобіжні заходи
						Серій- ність, "S"	Час- тота "O"	Ймовір- ність "D"	RPN

Примітка:

Керівник підрозділу - може підписувати керівник підрозділу
Погоджено – може підписувати начальник виробництва, головні спеціалісти (головний механік, метролог, головний енергетик, технолог)
Затверджено - директор

9. Додаток 4. - Класифікатор невідповідностей

Вид невідповідності	Наслідки прояву

Начальник _____ / _____ / «__» _____ 202__ р.
 (ініціали, прізвище) (підпис) (дата)

ДОДАТОК Б

1. Чеберячко С.І., Радчук Д.І., Дерюгін О.В., Сушко Н.С., Кравченко Б.Д. Розробка нової класифікації засобів індивідуального захисту органів дихання. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2022. Вип. 45. С. 109-119.

Особистий внесок: здобувач провів аналіз існуючих класифікацій ЗІЗОД, систематизував ознаки класифікації за функціональним призначенням, ефективністю, санітарними вимогами та конструктивними особливостями; взяв участь у формуванні ієрархічної структури класифікації та підготовці тексту статті.

2. Голінько В.І., Кравченко Б.Д. Економічне обґрунтування вибору засобів індивідуального захисту органів дихання. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2023. №2 (53). С. 14-25.

Особистий внесок: здобувачем самостійно розроблено математичні залежності для оцінювання економічних наслідків професійних захворювань та втрат продуктивності праці при використанні респіраторів; виконано порівняльні розрахунки інтегрального економічного критерію для різних типів ЗІЗОД; сформульовано висновки щодо економічної доцільності вибору засобів захисту.

3. Чеберячко С.І., Радчук Д.І., Дерюгін О.В., Чеберячко Ю.І., Наумов М.М., Кравченко Б.Д. Удосконалення моделі для розрахунку коефіцієнта захисту фільтрувального респіратора від шкідливого аерозолі. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2024. Вип. 48. С. 142-157.

Особистий внесок: здобувач проаналізував недоліки існуючих моделей розрахунку коефіцієнта захисту, обґрунтував необхідність урахування динаміки дихального циклу та осадження аерозольних частинок у підмасковому просторі; взяв участь у розробці удосконаленої математичної моделі та перевірці її адекватності.

4. Голінько В., Радчук Д., Чеберячко С., Наумов М., Кравченко Б., Дерюгін О. Оцінювання експлуатаційних ризиків засобів індивідуального захисту органів дихання. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2024. Том 8 № 2. С. 27-43.

Особистий внесок: здобувач систематизував основні експлуатаційні невідповідності та дефекти ЗІЗОД, адаптував метод FMEA для розрахунку пріоритетного числа ризику (RPN) стосовно засобів захисту органів дихання; взяв участь у розробці «Положення про ідентифікацію невідповідностей та розрахунок пріоритетного числа ризику».

5. Радчук Д.І., Чеберячко Ю.І., Чеберячко С.І., Наумов М.М., Кравченко Б.Д. Розробка програми для розрахунку прогнозного часу експлуатації протигазових фільтрів. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2024. №2 (55). С. 80-91.

Особистий внесок: здобувач здійснив аналіз існуючих математичних моделей прогнозування часу захисної дії (Wheeler-Jonas), обґрунтував вибір вхідних параметрів для програми; взяв участь у розробці алгоритму та тестуванні програмного комплексу; виконав порівняльний аналіз розрахункових та експериментальних даних.

6. Кравченко Б.Д., Голінько В.І., Радчук Д.І. Оцінка надійності людини при використанні респіраторів у виробничих умовах. *Науковий вісник ДонНТУ*. 2025. №2(15). С. 147-163.

Особистий внесок: здобувач є основним автором роботи: розробив модифіковану модель оцінювання надійності людини на основі методу SPAR-N із урахуванням параметрів підмаскового простору (температури, вологості) та фізіологічного навантаження (пульсу); спланував та провів експериментальні дослідження з випробувачами; виконав статистичну обробку результатів; сформулював основні наукові положення та висновки.

7. Cheberiachko Y., Radchuk D., Cheberiachko S., Slavinskyi D., & Kravchenko B. Development of a Filtering Respirator with a Real-Time Monitoring Device for Pressure Drop. *Social Development and Security*. 2026. 16(1). 217-226.

Особистий внесок: здобувач проаналізував існуючі методи контролю перепаду тиску у фільтрах респіраторів, обґрунтував вибір сенсорного блоку та важільного механізму; взяв участь у розробці конструкції пристрою моніторингу та проведенні експериментальних випробувань; узагальнив результати щодо точності визначення залишкового ресурсу фільтра.

8. Cheberiachko S., Cheberiachko Y., Deryugin O., Kravchenko B., Nehrii T., Nehrii S., Zolotarova O. Increasing the insulation properties of filter respirators to protect miners' respiratory organs from dust. Rudarsko-geološko-naftni zbornik. 2023. Vol. 38. № 4. № 65. P. 27-40.

Особистий внесок: здобувач провів аналіз антропометричних особливостей обличчя шахтарів та їх впливу на герметичність обтюратора; взяв участь у математичному моделюванні розподілу контактного тиску вздовж лінії обтюраторії; обґрунтував доцільність локальної перфорації обтюратора в зоні перенісся та щік; виконав порівняльний аналіз ізоляційних властивостей різних варіантів конструкції.

9. Tretiakova L., Cheberyachko Y., Sharovatova O., Nehrii T., Nehrii S., Kravchenko B., Zolotarova O. The influence of head strap elasticity on the protective properties of filtering facepiece respirators. The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin. 2024. Vol. 39. № 1. № 67. P. 131-140.

Особистий внесок: здобувач дослідив вплив кількості циклів надягання/знімання на зміну сили натягу та еластичних властивостей ремінців; розробив математичну модель залежності об'єму підсмоктування повітря від площі ремінця та сили натягу; обґрунтував необхідність впровадження вставок-індикаторів контролю натягу; виконав статистичну обробку експериментальних даних.