

УДК 355.77:614.8

І.І. Попов, І.О. Толкунов, В.В. Тютюник, О.Р. Шевчук

Національний університет цивільного захисту України, Харків

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИМІЩЕНЬ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ВІД АЕРОЗОЛЬНИХ ПРОДУКТІВ ВИБУХУ ТА ДИМУ

На основі проведеного аналізу небезпечних факторів, що виникають в умовах надзвичайних ситуацій і пов'язані з вибухами та пожежами, та існуючих математичних моделей очистки повітря визначені подальші напрямки теоретичних та експериментальних досліджень щодо розробки рециркуляційного електрофільтру на принципі електричного вітру. Отримано аналітичну залежність ступеня очистки повітря в замкнутих приміщеннях від продуктів вибуху та диму з використанням запропонованого засобу, від його режимних і конструктивних параметрів.

**Ключові слова:** надзвичайна ситуація, рециркуляційний електрофільтр, електричний вітер, аерозольне забруднення, монодисперсний аерозоль.

### Вступ

**Постановка проблеми.** При виникненні надзвичайних ситуацій (НС) в герметизованих приміщеннях (ГЗП), пов'язаних із горінням або вибухом, одним з найбільш небезпечних факторів, які суттєво впливають на якісний стан повітряного середовища означених приміщень, є наявність аерозольного забруднення, зокрема продуктів вибуху та диму у концентраціях, які перевищують гранично допустимі значення. Це ускладнює проведення підрозділами ДСНС України аварійно-рятувальних робіт (АРР) та робіт з локалізації і ліквідації наслідків НС, а також робить майже неможливим здійснення заходів із пошуку та евакуації із задимленої та загазованої споруди постраждалих, створює додаткову загрозу для особового складу аварійно-рятувальних підрозділів ДСНС. У зв'язку з цим виникає проблема щодо очищення забрудненого повітря в середині ГЗП для безперешкодного виконання АРР, зокрема, покращення видимості, зниження концентрації небезпечних хімічних речовин тощо. Це завдання вирішується наявними засобами – стаціонарними системами вентиляції, а при їх відсутності – переносними механічними димососами, які не в повній мірі відповідають сучасним вимогам. Зазначені засоби мають великі масо-габаритні показники та експлуатаційні витрати, не завжди зручні у використанні та можуть створювати додаткові джерела небезпеки. Тому необхідність створення переносних фільтрів нового покоління для ліквідації наслідків НС є актуальною задачею.

До перспективних засобів очистки осередків НС від небезпечного аерозольного забруднення в ГЗП відносяться засоби, які використовують метод електростатичного осадження, що реалізується шляхом використання малогабаритного переносного

рециркуляційного фільтру на принципі електричного вітру (РЕФ) [1]. Для удосконалення наявних та розробки нових електрофільтрів, а також для вивчення закономірностей і отримання інформації про процес очистки осередків НС від аерозольного забруднення в ГЗП при високій концентрації дисперсної фази, де працює електрофільтр в режимі рециркуляції, необхідно провести аналіз існуючих математичних моделей даного процесу.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Проведений аналіз останніх наукових досліджень в цій сфері, які відображені в цілому ряді публікацій, довів, що проблемами очищення повітряного середовища ГЗП від різних видів забруднень різними методами займаються достатньо багато дослідників. При проведенні обзору літературних джерел враховувалися роботи, що стосуються не лише осадження продуктів вибуху та диму, а й очищення повітряного середовища приміщень від аерозолів, пилу та інших забруднювачів, оскільки теоретична база цих задач однакова.

В роботі [2] наводиться рішення для загального випадку очистки повітря в приміщенні від шкідливих речовин (пилу, газів, туману, вологи і т.д.) за умови, що в приміщенні наявна загальнообмінна вентиляція для видалення шкідливих речовин, які формуються всередині приміщення та надходять з приточним повітрям. В статті [3] запропонована теорія осадження уніполярно зарядженого аерозолю в закритому приміщенні під дією гравітаційних сил та за рахунок електростатичного розсіювання.

В публікаціях [4, 5] розглянуто випадок, коли в ГЗП є фільтри приточного та витяжного повітря, рециркуляція повітря, а також його іонізація. В даних роботах враховано осадження заряджених часток пилу як за рахунок їх дрейфу в електричному полі аероіонізатора, так і за рахунок електростатич-

ного розсіювання. В роботах [6, 7] при складанні рівняння матеріального балансу шкідливих речовин в ГЗП, окрім їх виділення всередині приміщення та надходженням з приточним повітрям, враховано вплив інфільтрації, а рівняння для концентрації аерозолі, що встановилася в приміщенні, доповнено урахуванням очистки повітря за рахунок роботи рециркуляційного фільтру.

Проведений аналіз показує, що означені роботи охоплюють широку сферу суміжних питань, але в них не враховується вплив електричного вітру на ефективність очистки повітряного середовища ГЗП та вентиляційних приміщень.

### Постанова задачі та її розв'язання

З огляду на вищезазначене, метою роботи є визначення теоретичних передумов щодо математичного моделювання процесів очистки повітря від шкідливих речовин РЕФ, в першу чергу від газоподібних продуктів горіння та вибуху, які за своїми фізико-хімічними властивостями можна вважати дрібнодисперсними аерозолями.

Для побудови математичної моделі будь-якого процесу необхідно прийняти ряд припущень. У нашому випадку основними припущеннями є:

аерозоль монодисперсний, а його частки мають сферичну форму;

швидкість електричного вітру постійна в часі та однакова в усіх точках поперечного перерізу РЕФ;

ступінь очистки повітря в зоні зарядки дорівнює нулю, ступінь очистки повітря в РЕФ дорівнює ступеню очистки повітря в зоні осадження;

система коронуючих електродів в зоні зарядки має вигляд «дріт-сітка» («дріт-площина»).

Ступінь очистки повітря в РЕФ визначається по формулі [8]:

$$\eta_{\Phi} = 1 - e^{-\frac{wl}{vh_2}}, \quad (1)$$

де  $w$  – швидкість дрейфу частки в поперечному перерізі РЕФ під дією електричного поля, м/с;  $l$  – довжина осаджувальних електродів електрофільтру, м;  $v$  – швидкість повітряного потоку, м/с;  $h_2$  – міжелектродна відстань в зоні осадження, м.

Швидкість повітряного потоку визначається для РЕФ швидкістю електричного вітру та може бути розрахована за формулою [9]:

$$v = \sqrt{\frac{8I}{3\pi k \gamma_{\Pi}}}, \quad (2)$$

де  $I$  – сила струму коронного розряду (на 1 м. довжини коронуючого електроду), А/м;  $k$  – рухливість іонів,  $\text{m}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ;  $\gamma_{\Pi}$  – густина повітря,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Сила струму коронного розряду визначається (по Дейчу) виразом [9]:

$$I = kGU(U - U_0), \quad (3)$$

де  $G$  – геометричний коефіцієнт,  $\Phi/\text{м}^3$ ;  $U$  – напруга коронного розряду, В;  $U_0$  – початкова напруга коронного розряду, В.

Знайдемо початкову напругу коронного розряду для електродів циліндричної форми [9]:

$$U_0 = E_0 r_0 \ln(2h_1/r_0), \quad (4)$$

де  $E_0$  – початкова напруженість коронного розряду, В/м;  $h_1$  – міжелектродна відстань в зоні зарядки, м;  $r_0$  – радіус коронуючого електроду, ( $r \ll h_1$ ) м.

Значення початкової напруженості коронного розряду розраховуються по формулі Піка [9]:

$$E_0 = 30,3\delta(1 + 0,298/\sqrt{r_0\delta}), \quad (5)$$

де  $\delta$  – відносна густина повітря ( $\delta = 1$  при  $t = 20^\circ\text{C}$ ,  $P = 760$  мм.рт.ст.).

Для системи електродів «дріт-площина» [9]:

$$G = \varepsilon_0 \pi^2 / (h_1^2 \ln(2h_1/r_0)), \quad (6)$$

де  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – електрична стала.

Здійснивши перетворення, отримаємо формулу для визначення швидкості електричного вітру:

$$v = \sqrt{\frac{8\varepsilon_0 \pi U (U - 30,3\delta r_0 \ln(2h_1/r_0)) \left(1 + \frac{0,298}{\sqrt{r_0\delta}}\right)}{3h_1^2 \gamma_{\Pi} \ln(2h_1/r_0)}}. \quad (7)$$

Використовуючи вираз (7) для ступеня очистки повітря, маємо залежність:

$$\eta_{\Phi} = 1 - e^{-\frac{wl}{h_2 \sqrt{\frac{8\varepsilon_0 \pi U (U - 30,3\delta r_0 \ln(2h_1/r_0)) \left(1 + \frac{0,298}{\sqrt{r_0\delta}}\right)}{3h_1^2 \gamma_{\Pi} \ln(2h_1/r_0)}}}}. \quad (8)$$

За результатами проведених досліджень була розроблена конструкція та виготовлений лабораторний зразок рециркуляційного електрофільтру. РЕФ складається з декількох модулів, кількість яких визначає об'ємну витрату повітря крізь фільтр.

Кожен з них є однозонним електричним фільтром і по формі уявляє собою паралелепіпед розміром  $3 \cdot 10^{-1} \times 1,7 \cdot 10^{-1} \times 3 \cdot 10^{-2}$  м. Корпус модуля виконаний з вініласту. В середині корпусу знаходяться пази, в яких кріпляться коронуючий та очаджувальний електроди (рис. 1).

Коронуючий електрод модуля уявляє собою смужку міді шириною  $4 \cdot 10^{-3}$  м, до якої припаяні голки. Відстань між голками складає  $2 \cdot 10^{-2}$  м. За коронуючим електродом на відстані  $3 \cdot 10^{-2}$  м (від кінця голок) встановлена осаджувальна зона, яка складається з двох металевих пластин, довжиною  $1,7 \cdot 10^{-1}$  м, що розташовані паралельно одна одній на відстані  $3 \cdot 10^{-2}$  м.

Напруга до електродів підводиться через підпружинені контакти. Для захисту від торкання до електродів, що знаходяться під напругою, на вході та виході модуля встановлюються захисні сітки. Для можливості очистки електродів верхня кришка модуля виготовляється з'ємною.

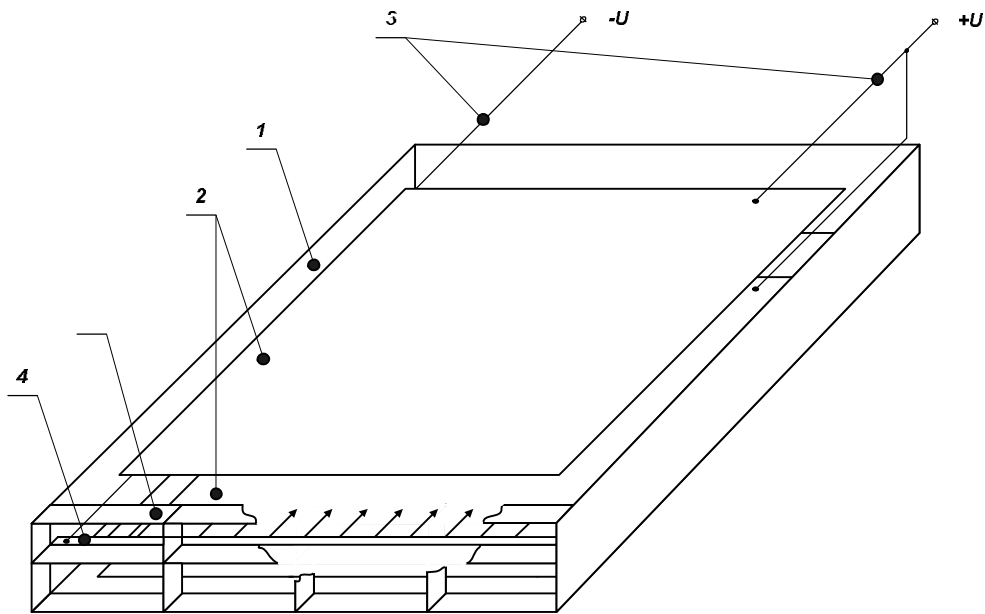


Рис. 1. Конструктивна схема модуля рециркуляційного електрофільтра на принципі електричного вітру:  
 1 – корпус (зі знятою кришкою); 2 – осаджувальні електроди; 3 – захисна решітка;  
 4 – мідна смужка з коронуючими електродами; 5 – дроти подачі високої позитивної та негативної напруги

Живлення лабораторного зразку модуля здійснюється від джерела високої напруги постійного струму, що регулюється. Це дозволяє отримати вихідну напругу від 0 до 25 кВ при струмі навантаження до 1 мА.

Результати дослідження, які визначають залежність ступеня очищення повітря в РЕФ від напруги на ньому при різних значеннях радіусу димової частки, представлені на рис. 2.

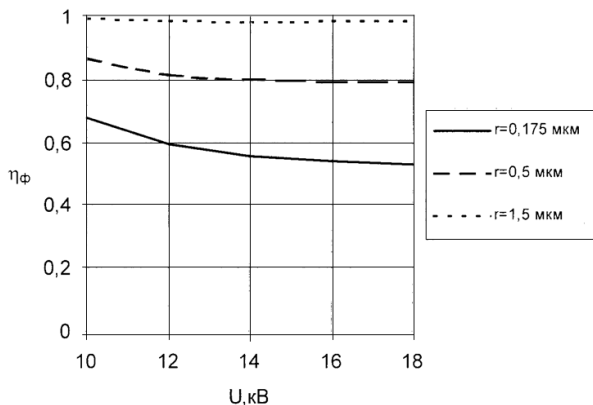


Рис. 2. Залежність ступеня очищення повітря в РЕФ від напруги на ньому при різних значеннях радіусу димової частки

Видно, що ступінь очищення повітря в РЕФ від диму при збільшенні напруги знижується.

Схема, представлена на рис. 3, пояснює складну залежність ступеня очищення від напруги. Існує декілька шляхів впливу напруги на ступінь очищення повітря в РЕФ.

**По-перше**, при збільшенні напруги  $U$  збільшується сила струму коронного розряду  $I$ , і відповідно

підвищується швидкість електричного вітру  $v$ . Збільшення швидкості приводить до скорочення часу зарядження димової частки  $t$ , а відповідно до зменшення електричного заряду частки  $q$ . Зниження  $q$  обумовлює зниження швидкості дрейфу  $w$ . В результаті цього ступінь очищення повітря  $\eta_{\phi}$  знижується.

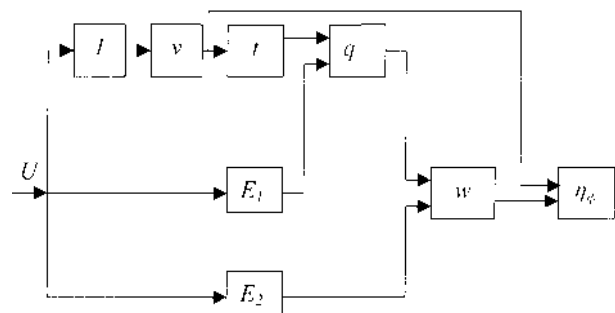


Рис. 3. Схема впливу напруги на ступінь очищення повітря в РЕ

**По-друге**, підвищення швидкості електричного вітру безпосередньо знижує ступінь очищення повітря.

**По-третє**, при збільшенні напруги підвищується напруженість електричного поля  $E_1$ , а відповідно збільшується електричний заряд частки  $q$ . Із зростанням  $q$  збільшується  $w$ , як наслідок, підвищується ступінь очищення  $\eta_{\phi}$ .

**По-четверте**, при збільшенні напруги підвищується напруженість електричного поля  $E_2$ , а значить збільшується  $w$ . Збільшення  $w$  призводить до підвищення  $\eta_{\phi}$ .

Ймовірно, дія чинників, які намагаються знизити ступінь очищення, впливає сильніше, тому у результаті залежність  $\eta_{\phi} = f(U)$  має убуючий характер.

Убуваюча залежність  $\eta f = f(U)$  не означає, проте, що РЕФ повинен працювати при низькій напрузі. Адже ефективність очищення повітря приміщення від диму визначається не стільки ступенем очищення повітря в РЕФ, скільки критерієм ефективності конструкції рециркуляційного фільтру.

Отже, для побудови достовірної математичної моделі, що відповідає реальним процесам очистки газоповітряного середовища важкодоступних осередків НС за допомогою РЕФ необхідно врахувати всі вище зазначені фактори [10]. Також слід зауважити, що на ступінь очищення повітря в РЕФ суттєвого впливу завдають й інші режимні та конструктивні параметри (вид та частота струму живлення, конструкція коронуючої системи, якісні характеристики повітря, що очищається тощо), які будуть досліджені в ході подальших досліджень.

### Висновки

Отримано аналітичну залежність ступеня очистки повітряного середовища осередків НС в гермозамкнених приміщеннях від аерозольного забруднення димом та газоподібними продуктами вибуху за допомогою РЕФ в залежності від величини напруги на коронуючих електродах та параметрів електричного вітру.

За результатами проведених досліджень була розроблена конструкція та виготовлений лабораторний зразок рециркуляційного електрофільтра.

Проведені експериментальні випробування розробленого РЕФ довели складну залежність ступеню очищення повітря в РЕФ від його режимних та конструктивних параметрів та характеристик повітряного середовища (виду та частоти струму живлення, конструкції коронуючої системи, якісних характеристик повітря, що очищається тощо), які потребують подальших досліджень.

### Список літератури

1. Кирпичников И.В. Разработка и исследование электростатического фильтра для очистки воздуха от пыли в сельскохозяйственных малообъемных помещениях: дис.... канд. техн. наук / И.В. Кирпичников. – Челябинск: ЧГАУ, 2000. – 137 с.
2. Селиверстов А.Н. Вентиляция фабрично-заводских помещений. Том 1 / А.Н. Селиверстов. – М.-Л.: Госстройиздат, 1932. – 207 с.
3. Дунский В.Ф. Осаждение унополярно заряженного аэрозоля в закрытом помещении / В.Ф. Дунский, А.В. Китаев // Коллоидный журнал. – М.: 1960. – №2. – С. 159-167.
4. Возмилов А.Г. Электроочистка и электрообеззараживание воздуха в промышленном животноводстве и птицеводстве: Дис. .... д-ра техн. наук: 05.20.02 / А.Г. Возмилов. – Челябинск: ЧГАУ, 1993. – 337 с.
5. Возмилов А.Г. Выбор системы очистки конвективных потоков воздуха в помещениях малого объема / А.Г. Возмилов, И.В. Кирпичников // Вестник ЧГАУ. – Челябинск: 1996. – Т.14. – С. 121-126.
6. Уаддн Р.А. Загрязнение воздуха в жилых и общественных зданиях / Р.А. Уаддн, П.А. Шефф. – М.: Стройиздат, 1990. – 126 с.
7. Кирпичникова И.М. Энергосберегающие системы электроочистки воздуха в сельскохозяйственных помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха: Дис.... д-ра техн. наук / И.М. Кирпичникова. – Челябинск: ЧГАУ, 2001. – 326 с.
8. Ужов В.Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами / В.Н. Ужов. – М.: Химия, 1967. – 344 с.
9. Основы электрогазодинамики дисперсных систем / И.П. Верецагин, В.И. Левитов, Г.З. Мирзабекян, М.М. Пашин. – М.: Энергия, 1974. – 480 с.
10. Чекалов Л.В. Научные основы создания электрогазоочистного оборудования нового поколения: Автореф. дис.... д-ра техн. наук / Л.В. Чекалов. – Москва: МЭИ (ТУ), 2007. – 41 с.

Надійшла до редколегії 19.04.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. М.І. Адаменко, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ПОМЕЩЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ОТ АЭРОЗОЛЬНЫХ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА И ДЫМА

И.И. Попов, И.А. Толкунов, В.В. Тютюник, А.Р. Шевчук

*На основе проведенного анализа опасных факторов, которые возникают в условиях чрезвычайных ситуаций, связанных со взрывами и пожарами, существующих математических моделей очистки воздуха, определены дальнейшие направления теоретических и экспериментальных исследований, касающихся разработки рециркуляционного электрофильтра на принципе электрического ветра. Получена аналитическая зависимость степени очистки воздуха гермозамкнутых помещений от продуктов взрыва и дыма и использованием предложенного средства от его режимных и конструктивных параметров.*

**Ключевые слова:** чрезвычайная ситуация, рециркуляционный электрофильтр, электрический ветер, аэрозольное загрязнение, монодисперсный аэрозоль.

### RESEARCH PURIFICATION PROCESSES OF THE AIR ENVIRONMENT OF PREMISES IN EMERGENCIES FROM THE AEROSOL PRODUCTS OF THE EXPLOSION AND SMOKE

I.I. Popov, I.A. Tolkunov, V.V. Tyutyunik, A.R. Shevchuk

*Based on the analysis of hazards that occur in emergency situations related to the explosions and fires, existing mathematical models of air purification, identified further areas of theoretical and experimental studies on the development of the electrostatic recirculation on the principle of the electric wind. An analytical dependence of the degree of purification of the indoor air explosion and smoke, and the proposed use of funds from its operating and design parameters.*

**Keywords:** emergency, circulation electrostatic, electric wind, aerosol pollution, monodisperse aerosols.