

УДК 628.5/8 : 614.7

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.141060

Дослідження та обґрунтування методу нормалізації аероіонного режиму у виробничих приміщеннях за ультразвукової іонізації повітря

С. В. Сукач, Т. Ф. Козловська, І. С. Сергієнко, О. В. Ходаковський,
Я. О. Ляшок, О. Е. Кіпко

Наведено результати досліджень щодо нормалізації аероіонного режиму в приміщеннях за ультразвукової іонізації зволоженого повітря. Обґрунтовано підвищення концентрації негативних аероіонів у зазначених умовах шляхом комплексного впливу балоелектричного ефекту та ультразвукової кавітації. Встановлено, що при використанні дистильованої води як джерела аероіонів під дією ультразвукового генератора потужністю 10 Вт на відстані 0,5 м концентрація негативних аероіонів збільшується практично в шість разів. При цьому за рахунок спільного впливу ультразвукової кавітації у поверхневому шарі води та балоелектричного ефекту не спричиняється генерації озону і оксидів Нітрогену. Доведено, що зі зменшенням ступеня мінералізації води концентрації негативних і позитивних аероіонів збільшуються внаслідок зміни фізико-хімічних властивостей води та виникаючих механохімічних явищ. Запропоновано механізм утворення аероіонів у повітрі виробничих приміщень в умовах спільної дії балоелектричного ефекту та ультразвуку. Обґрунтовано, що поліпшення якості аероіонного складу повітря виробничих приміщень відбувається за температури демінералізованої води 20–25 °С і направленою повітряного потоку швидкістю 6 м/с у бік робочої зони зі сполучною дією ультразвуку та балоелектричного ефекту, що сприяє поліпшенню санітарно-гігієнічних умов праці. Запропоновано структуру автоматизованої системи керування аероіонним режимом робочої зони виробничих приміщень за штучної іонізації зволоженого повітря з використанням генератора аероіонів та вентиляційної системи. Це дозволить здійснювати моніторинг і обробку інформації стосовно технологічних, електричних і мікрокліматичних параметрів, налаштовувати, узгоджувати роботу та спільно керувати пристроями вентиляційної системи і ультразвуковим генератором аероіонів

Ключові слова: аероіонний режим, балоелектричний ефект, ультразвукова кавітація, робоча зона, виробниче приміщення

1. Вступ

Концентрація аероіонів обох полярностей у повітрі є важливим показником його якості. Особливо це стосується виробничого середовища, у якому в багатьох випадках присутні чинники іонізації та деіонізації повітря – електротехнічне обладнання, кондиціонери, персональні комп'ютери тощо. При цьому значного впливу на ці показники може мати присутність людей. У таких умовах концентрації аероіонів можуть змінюватись непередбачуваним чином.

Дослідження в області впливу аероіонів на організм людини [1] довели, що збільшені концентрації негативно заряджених аероіонів сприяють зниженню відчуття втоми під час виконання різного типу робіт. При цьому нормалізується обмін речовин, полегшується дихання, підвищуються розумова і фізична працездатність. За рахунок збільшення стресостійкості відбувається зміцнення нервової системи людського організму.

Слід зазначити, що достатньо вивченими є питання утворення аероіонів за присутності двооксиду Карбону (CO_2) і розробка на цій основі математичних моделей моніторингу концентрацій зазначеної речовини у промислових сільськогосподарських приміщеннях [2]. Але на теперішній час немає однозначного уявлення про механізми утворення аероіонів в умовах зволоженого повітря виробничих приміщень залежно від ступеня мінералізації мікрокраплин води, що формують вологість повітря, за наявності частинок пилу різної природи. Не міститься також даних про нормативи вмісту за зазначених виробничих умов. Тільки у ДБН № 2152-80 визначені нормативи вмісту негативних аероіонів у повітрі виробничих і громадських приміщень: необхідний мінімум – 600 аероіонів/см³, оптимальний рівень – 3000–5000 аероіонів/см³.

У зв'язку з вищезазначеним актуальність роботи полягає у визначенні механізмів впливу вологості залежно від ступеня мінералізації води, сумісної дії ультразвукової кавітації та балоелектричного ефекту на формування аероіонного складу повітря виробничих приміщень задля поліпшення санітарно-гігієнічних умов праці.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Дослідження концентрацій аероіонів у повітрі виробничих приміщень безпосередньо пов'язані з вивченням впливу технічних засобів і присутності людей задля фізіолого-гігієнічної оцінки мікроклімату сучасних офісних приміщень та адаптаційних реакцій організму працівників [3, 4]. У зв'язку з цим робота сучасних автоматизованих систем підтримки мікроклімату [5] базується на застосуванні комп'ютеризованих вимірювальних приборів задля збору параметрів мікроклімату промислових приміщень. Зазначені автоматизовані системи використовуються у сучасних системах витиснювальної вентиляції (*Displacement Ventilation, DV* й модифікацій – *Cooled Beam, UFAD* тощо) [6]. Такий інтерес визначається двома причинами: одна з них – певна «нетрадиційність» методів розрахунку; друга полягає в тому, що область застосування *DV*, методи проектування і регулювання до теперішнього часу чітко не визначені. Слід зазначити, що системи керування як вентиляційних комплексів, так і окремих систем підтримки аероіонного складу повітря, можуть бути побудовані за різними принципами. Задача забезпечення оптимального рівня аероіонів є багатофакторною, в якій усі параметри тісно взаємозалежні один від одного [7]. Широкий розвиток для розв'язання саме таких задач отримали інтелектуальні системи, що використовують засоби нечіткого керування або генетичні алгоритми [8–10]. Однак, незважаючи на всі переваги таких підходів, сьогодні не існує формальних процедур проектування інтелектуальних систем, а основні ідеї проектування, ґрунтуються на досвіді та знаннях розробника, отриманих методом

проб і помилок. Останніми роками для опису складних динамічних процесів, а також підвищення якості регулювання в тому числі і багатовимірних моделей, поширення отримали системи з дробновимірними регуляторами [11–13]. Але у багатьох випадках до приміщення подається зовнішнє повітря з незадовільними концентраціями аероіонів обох полярностей або однієї полярності, що доказує складний механізм динаміки концентрацій аероіонів у приміщеннях протягом робочого дня. У роботі [14] визначається аероіонний режим робочої зони за штучної іонізації повітря. Ці ж автори здійснили моделювання розповсюдження аероіонів у просторі за різних умов [15]. Перевагою цих досліджень є пропозиції щодо використання розсіювальних екранів для рівномірного розподілу іонізованого повітря у середовищі. Але це не знімає питання щодо контролю рівнів іонізації повітря і керування режимами роботи іонізатора. Це зумовлює необхідність регулювання цього параметра в автоматичному режимі з неперервним або періодичним визначенням концентрацій аероіонів обох полярностей.

Авторами [16] показано, що обладнання інформаційних технологій впливає на іонізацію повітря (системні блоки персональних комп'ютерів, друкуючі пристрої тощо). Окрім того, існує суттєвий взаємовплив іонізації повітря та рівнів умісту дрібнодисперсного пилу, аерозолі у повітрі виробничих приміщень і відносної вологості повітря. У [17] відпрацьовано систему аерозольного забруднення приміщення та обрано методи контролю аерозольного забруднення. Але в ній не розглянуто питання регулювання аероіонного складу повітря виробничих приміщень задля комплексної оцінки санітарно-гігієнічних умов праці. На теперішній час відомими є тільки роботи, присвячені дослідженням поліпшення аероіонного складу приміщень побутового призначення [18, 19]. за рахунок застосування нових марок ґрунтовок і фарб, що сприяють збільшенню концентрацій негативних аероіонів під час проведення ремонтів.

Окремим питанням є те, що застосування штучних іонізаторів повітря у приміщеннях призводить до утворення шкідливих речовин – озону та оксидів Нітрогену, які у значних кількостях мають несприятливий вплив на людський організм. Застосування у таких випадках каталітичних поглиначів є дуже проблематичним, і в іонізаторах повітря не практикується. Тому є доцільним пошук інших засобів іонізації повітря, які не дають побічних ефектів. Широко відомо, що чинником іонізації є балоелектричний ефект [20, 21] – іонізація повітря під час механічного подрібнення води. Тому найкращі природні показники якості повітря за аероіонним складом спостерігаються на березі моря у зонах прибою та на водоспадах.

Досвід роботи із замірів поблизу душових установок з генерації легких аероіонів свідчить, що диспергування води починається з утворення молекулярних комплексів. У дослідженнях з гігієнічної оцінки зволожувача повітря «Іон» було встановлено, що під час роботи приладу в умовах термостатування водопровідної води спостерігався інтенсивний розвиток мікроорганізмів, навіть за кімнатної температури [17].

Отже, для усунення зазначеної проблеми виникає необхідність в проведенні експериментальних досліджень зміни концентрації аероіонів від ступеня мінералізації води. Виходячи з фізичних міркувань, слід очікувати, що най-

більш ефективним буде подрібнювання води за спільної дії ультразвукової кавітації [22] і балоелектричного ефекту. Наведений спосіб іонізації повітря доцільно використовувати у приміщеннях із сильно деіонізованим повітрям, у яких необхідними є значні обсяги генерації аероіонів.

У [22] показано, що механізм утворення легких аероіонів при руйнуванні поверхні води досі залишається нез'ясованим. При цьому результати проведених досліджень є протилежними та суперечливими. Але в більшості експериментів показано, що саме балоелектричний ефект сприяє збільшенню концентрації тільки негативних аероіонів.

У зв'язку з викладеним, задля підтримання максимальної кількості аероіонів у робочій зоні необхідно провести низку експериментальних досліджень з використанням води різного ступеня мінералізації, температури, концентрації розчинів соленої води, зміни швидкості руху повітря і інтенсивності ультразвуку.

3. Ціль та задачі дослідження

Проведені дослідження ставили за мету підвищення рівня комфортності та працездатності робітників за рахунок збільшення концентрацій негативних аероіонів у робочій зоні виробничих приміщень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести експериментальні дослідження змін концентрацій аероіонів задля визначення фактичних рівнів іонізації повітря однотипних за призначенням приміщень і з'ясування необхідних меж керування концентраціями аероіонів;
- експериментально дослідити динаміку концентрацій аероіонів залежно від зміни фізичних факторів за ультразвукової іонізації повітря;
- розробити структуру автоматизованої системи керування аероіонним складом повітря в умовах складного виробничого середовища робочих приміщень задля поліпшення санітарно-гігієнічних умов праці.

4. Матеріали та методи дослідження гідроаероіонного складу повітря приміщень із застосуванням енергії ультразвуку

4.1. Досліджуваний водний розчин та обладнання, що використовувались в експерименті

Дослідження проводили з використанням води різної температури та різного ступеня мінералізації – 1,1; 2,2; 3,3 і 4,4 % відповідно (вміст солей у питній та природних водах).

Для генерації аероіонів використовувався малогабаритний ультразвуковий генератор аероіонів (UAG) потужністю 10 Вт, напругою 19–24 В DC, струмом 500 мА та резонансною частотою 1,7 МГц. Вода на мембрану UAG подавалася занурювальним насосом Mu 108 (Zamar, Індонезія), потужністю 2,5 Вт, максимальною швидкістю потоку води 180 дм³/год., h_{\max} – 0,48–0,55 м. Для розсіювання аероіонів застосовувався вентилятор ROTEX RAT01–E (Китай), максимальної потужності 20 Вт.

Вимірювання швидкості руху повітря здійснювалось за допомогою термоанемометра TM-4001 (TENMARS ELECTRONICS CO., LTD., Тайвань), потоку

повітря (обсягу) 0–9999 мм³, температури 20–50 °С, швидкості повітря 0,01–25,00 м/с.

Для автоматизації процесу контролю використовувався лічильник аероіонів «Сапфір 3К» (виробництва РФ), обладнаний портом RS 232 для підключення персонального комп'ютера.

Математична обробка отриманих масивів даних замірів концентрацій аероіонів обох полярностей здійснювалась відповідно до [16].

4. 2. Методика визначення концентрації аероіонів

Для виконання завдань досліджень використовувався UAG з напругою живлення 19 В, на п'єзоелемент якого з висоти 0,2 м насосом подавався тонкий струмінь води, що повністю подрібнювалась ультразвуковими хвилями. Вимірювання концентрації аероіонів виконувалась за розробленою методикою [16] на серійному приладі «Сапфір 3К» з похибкою вимірювань 20 %.

За результатом вимірювання, концентрація легких аероіонів ($n_{\text{изм}}$) визначається як середнє арифметичне 24-х показів приладу, зареєстрованих безперервно протягом двох хвилин вимірювань [16]. При цьому випадкова похибка $\Delta p < \delta/3$, що задовольняє умовам, за яких похибка вимірювань концентрацій аероіонів Δ дорівнює системній інструментальній похибці δ . Для всіх результатів вимірювань була проведена перевірка адекватності регресійних моделей за допомогою вбудованих статистичних функцій та процедур у програмі Excel.

5. Результати досліджень і формування якісного аероіонного складу повітря робочої зони виробничих приміщень

На кількість аероіонів у приміщеннях за штучно створених умов праці впливає комплекс чинників. Серед них до фізичних чинників належать температура, вологість повітря і швидкість його руху у приміщенні. Вплив хімічних чинників формується присутністю людей та концентраціями дрібнодисперсного пилу та газових домішок у повітрі.

Для загального уявлення зміни концентрації аероіонів протягом дня виконані натурні вимірювання у приміщеннях Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського (Україна) однакової площі з однаковим комп'ютерним навантаженням за різних внутрішніх і зовнішніх чинників (табл. 1, 2).

Аналіз досліджень показав, що в одному і тому приміщенні в різні місяці (січень 2018 року – табл. 1 і лютий 2018 року – табл. 2) концентрації аероіонів обох полярностей (як окремо, так і разом) змінюються непередбачуваним чином.

Таблиця 1

Динаміка аероіонного складу повітря у комп'ютерному класі за відсутності персоналу

Показники	Час проведення замірів					
	15 год. 15 хв.		17 год. 22 хв.		На вулиці	
Полярність аероіонів	n^-	n^+	n^-	n^+	n^-	n^+

Концентрація аероіонів, см ⁻³	$n_{сер.}$	840	790	750	785	250	220
	n_{min}	440	355	355	340	155	130
	n_{max}	1015	970	980	1005	490	485

Примітка: 16 увімкнених персональних комп'ютерів (температура повітря +20 °С, вологість повітря 60 %, радіаційний фон 8 мкР/год, температура повітря зовні -3 °С)

Таблиця 2

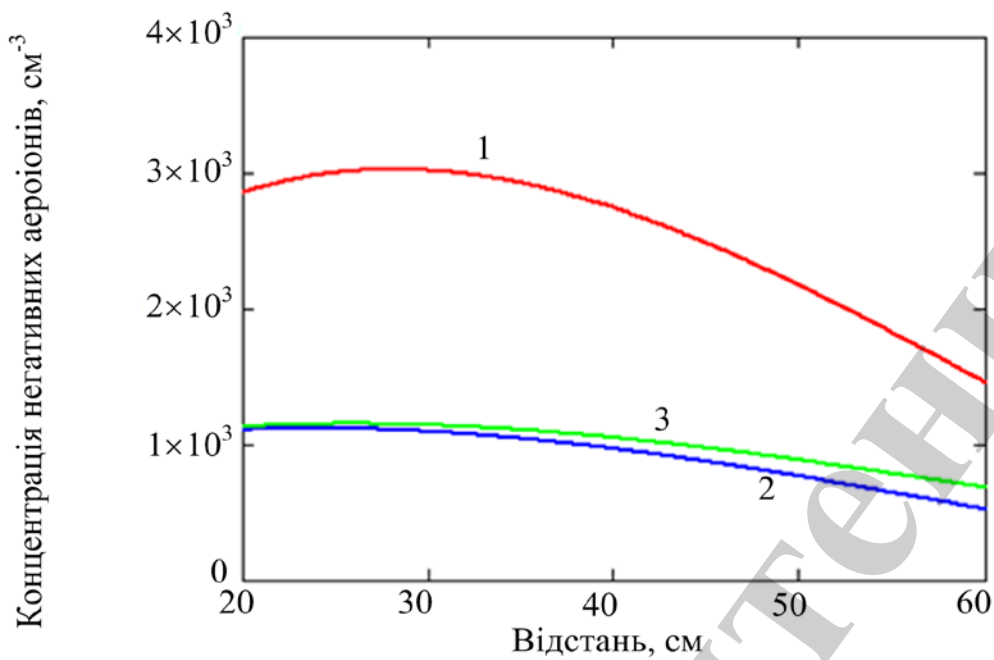
Динаміка аероїнного складу повітря у комп'ютерному класі за присутності персоналу

Показники		Час проведення замірів							
		7 год. 15 хв.		8 год. 52 хв.		10 год. 25 хв.		На вулиці	
Полярність аероіонів		n^-	n^+	n^-	n^+	n^-	n^+	n^-	n^+
Концентрація аероіонів, см ⁻³	$n_{сер.}$	340	450	245	260	445	590	60	85
	n_{min}	15	290	25	50	65	150	10	15
	n_{max}	470	550	380	380	640	695	110	135

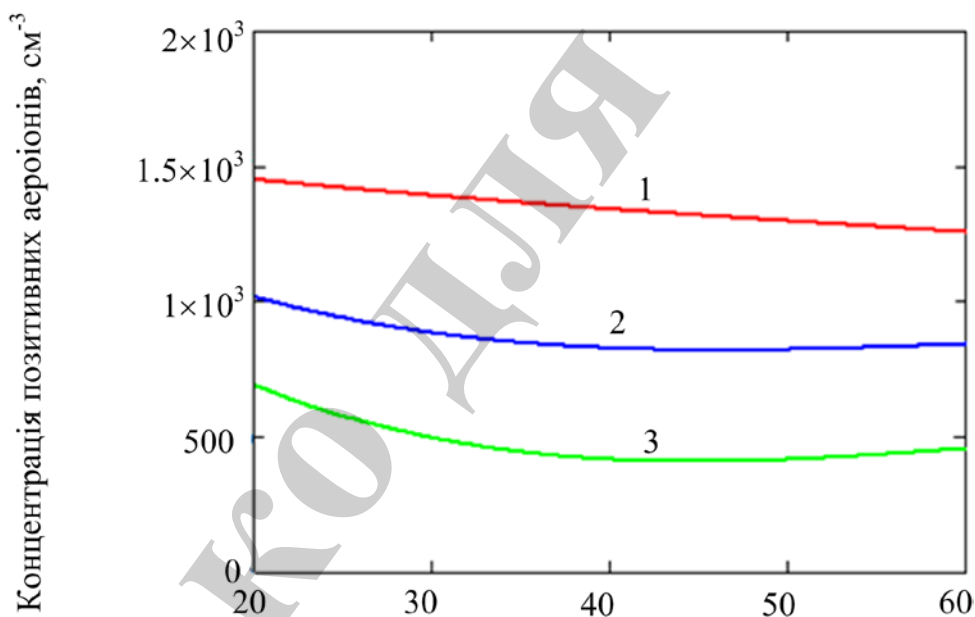
Примітка: 16 увімкнених персональних комп'ютерів (температура повітря +19 °С, вологість повітря 65 %, радіаційний фон 6 мкР/год, температура повітря зовні -5 °С)

Аналіз багатьох серій вимірювань (табл. 1, 2) не виявив прямого зв'язку концентрацій аероіонів з якимось переважним чинником іонізації (деіонізації) повітря. Очевидно це пов'язане з комбінованим впливом низки чинників, кожен з яких впливає на якість показників на межі похибки вимірювального приладу. У таких умовах доцільно здійснювати контроль концентрацій аероіонів безперервно або з потрібною періодичністю.

Перші дослідження з використанням УАГ виконувались с метою встановлення залежності зміни концентрації аероіонів від ступеня мінералізації води – дистильована, слабо мінералізована (водопровідна) і мінеральна (рис. 1, а, б).



a



б

Рис. 1. Динаміка концентрації аероіонів від відстані до джерела ультразвуку з урахуванням ступеня мінералізації води: 1 – дистильована; 2 – мінеральна; 3 – водопровідна води; *a* – негативні (фон – $n^- = 651 \text{ см}^{-3}$); *б* – позитивних (фон – $n^+ = 1611 \text{ см}^{-3}$)

Аналіз динаміки концентрації аероіонів показав, що результати експериментальних замірів вмісту негативних і позитивних підкоряються залежності, що описується поліномом другого ступеня з достовірністю апроксимації $R^2 = 0,98 - 0,99$ (табл. 3). При цьому характер залежностей має протилежний вза-

ємозв'язок: для негативних аероіонів $C_{n-} = -al^2 + bl - c$; а для позитивних – $C_{n+} = al^2 - bl + c$. Це пояснюється наявністю у воді компонентів неорганічної природи з різним вмістом – сульфатів (SO_4^{2-}), хлоридів (Cl^-), карбонатів (CO_3^{2-}), гідрокарбонатів (HCO_3^-), іонів кальцію (Ca^{2+}), магнію (Mg^{2+}), натрію (Na^+). Окрім того, під дією ультразвуку з'являються гідроксил-іони (OH^-) і іони гідратованих молекул води (іони гідроксонію – H_3O^+).

Таблиця 3

Функціональні залежності зміни аероіонів від ступеня мінералізації води

Аероіони	Апроксимуючі функції
дистильована вода	
n^-	$y = -1965x^2 + 8266x - 5650; R^2 = 0,99$
n^+	$y = 41,5x^2 - 341,5x + 1911; R^2 = 0,98$
мінеральна вода	
n^-	$y = -573x^2 + 2292x - 1194; R^2 = 0,97$
n^+	$y = 34x^2 - 210,5x + 1173; R^2 = 0,98$
водопровідна води	
n^-	$y = -540,2x^2 + 2241x - 1176; R^2 = 0,99$
n^+	$y = 230,5x^2 - 1192x + 1958; R^2 = 0,98$

Таке явище може бути пов'язано з механічною дією на молекули води, що розташовані на поверхні рідини як подвійний електричний шар при дії ультразвукової хвилі – кавітації – за рахунок прикладеного механічного напруження. При цьому, на нашу думку, унаслідок дії ультразвукової кавітації виникають механохімічні реакції з подальшою турбулізацією потоку води. За рахунок цього змінюються відстані між атомами, геометричні параметри окремих молекул води, що зменшує енергію активації утворення аероіонів за участі цих атомів. Окрім цього, слід ураховувати, молекули води є диполями, пов'язаними між собою електростатичною взаємодією та міжмолекулярними водневими зв'язками, в яких під дією ультразвукової кавітації відбувається розрив зв'язків і вивільнення окремих молекул води у вигляді пари. Під дією ультразвукової кавітації збільшується вплив енергії деформаційних коливань хімічних зв'язків у молекулах води, що відображається на швидкості утворення гідратованих протонів ($\text{H}^+ \cdot \text{H}_2\text{O}$) і іонів гідроксилу ($\text{OH}^- \cdot \text{H}_2\text{O}$). Виходячи із зазначеного, можна стверджувати, що під дією ультразвукової кавітації вода становить суміш кластерів $n\text{H}_3\text{O}^+$ і $m(\text{OH}^- \cdot \text{H}_2\text{O})$. При цьому Оксиген як донор електронів легко утворює значну кількість сполук з відносно слабкими зв'язками між молекулами. Неспарені електрони утворюють при цьому комплекси з переносом заряду, що сприяє утворенню гідроаероіон-радикалів.

Наступне дослідження виконувалося з метою встановлення динаміки зміни концентрації аероіонів залежно від рівня солоності води (з 1,1 до 4,4 %, рис. 2, а, б).

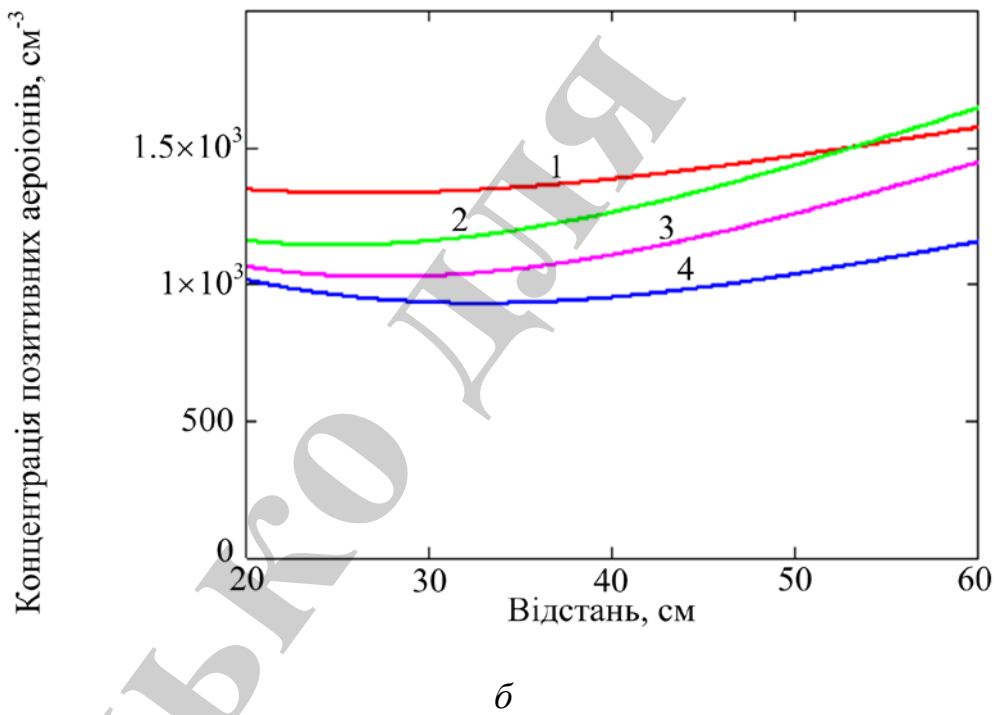
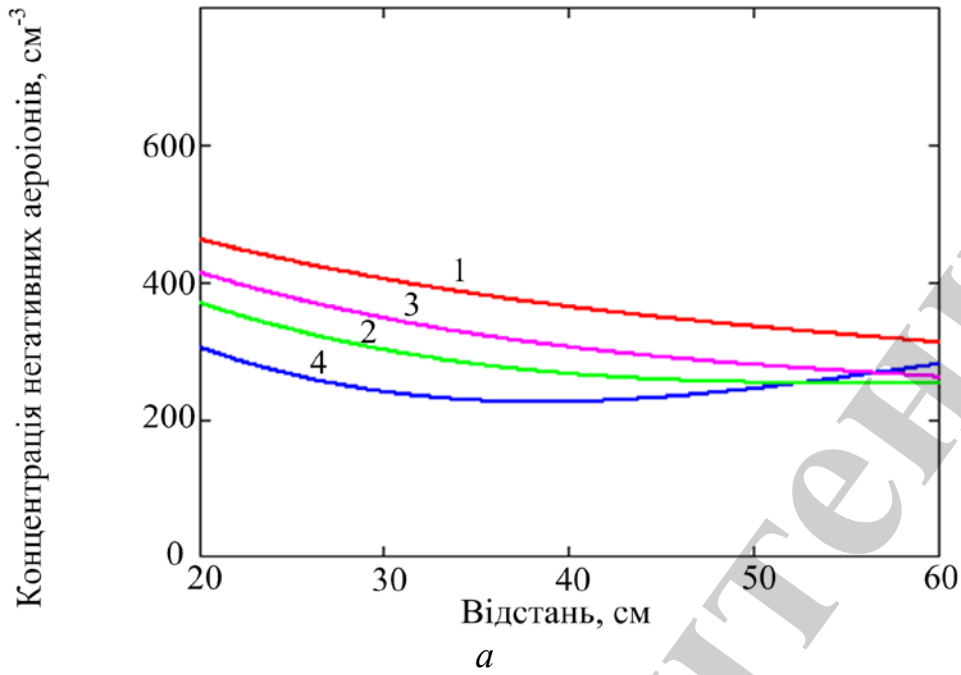


Рис. 2. Зміна концентрації аероіонів з відстанню за ультразвукової обробки води різного ступеня мінералізації: *a* – негативних (фон – $n^- = 651 \text{ см}^{-3}$); *б* – позитивних (фон – $n^+ = 1611 \text{ см}^{-3}$). Концентрація розчинів соленої води: 1 – 1,1 %; 2 – 2,2 %; 3 – 3,3 %; 4 – 4,4 %

Таблиця 4

Функціональні залежності зміни аероіонів від концентрація розчинів солоної води

Аероіони	Апроксимуючі функції
Концентрація розчинів солоної води 1,1 %	
n^-	$y=77x^2-477x+1050; R^2=0,99$
n^+	$y=253,5x^2-1032x+2389; R^2=0,98$
Концентрація розчинів солоної води 2,2 %	
n^-	$y=225x^2-1084x+1510; R^2=0,97$
n^+	$y=446,7x^2-2013x+3177; R^2=0,98$
Концентрація розчинів солоної води 3,3 %	
n^-	$y=150,2x^2-799,2x+1299; R^2=0,99$
n^+	$y=466,7x^2-1849x+2994; R^2=0,97$
Концентрація розчинів солоної води 4,4 %	
n^-	$y=109x^2-630x+1171; R^2=0,98$
n^+	$y=496x^2-2065x+3180; R^2=0,99$

Аналіз отриманих експериментальних даних (рис. 2, а, б) свідчить, що концентрація негативних і позитивних аероіонів зі збільшенням мінералізації води з 1,1 до 4,4 % на відстані 0,3 м від UAG зменшується майже в двічі порівняно з фоновою концентрацією (без обробки ультразвуком – точка «0»). На відміну від даних, зображених на рис. 1, зі зростанням відстані до 0,6 м концентрація позитивних аероіонів поступово збільшується практично до фонових значень. Картина зміни концентрацій для негативних аероіонів дещо інша: зі змінною мінералізації води від 1,1 до 3,3 % спостерігається стрімке зниження концентрацій – від 650 до 250–350 см^{-3} , але за концентрації водного розчину 4,4 % характер кривих практично однаковий як для негативних, так і для позитивних аероіонів. Статистична обробка отриманих даних показала достовірний зв'язок за коефіцієнтом кореляції Пірсона між змінами концентрацій аероіонів обох полярностей від відстані до UAG (n^- – 0,98 і n^+ – 0,95) і від ступеня мінералізації води (n^- – 0,99 і n^+ – 0,93).

Далі проводилося дослідження з метою встановлення залежності зміни концентрації аероіонів під впливом потоку повітря зі швидкістю від 1 до 8 м/с (рис. 3, а, б).

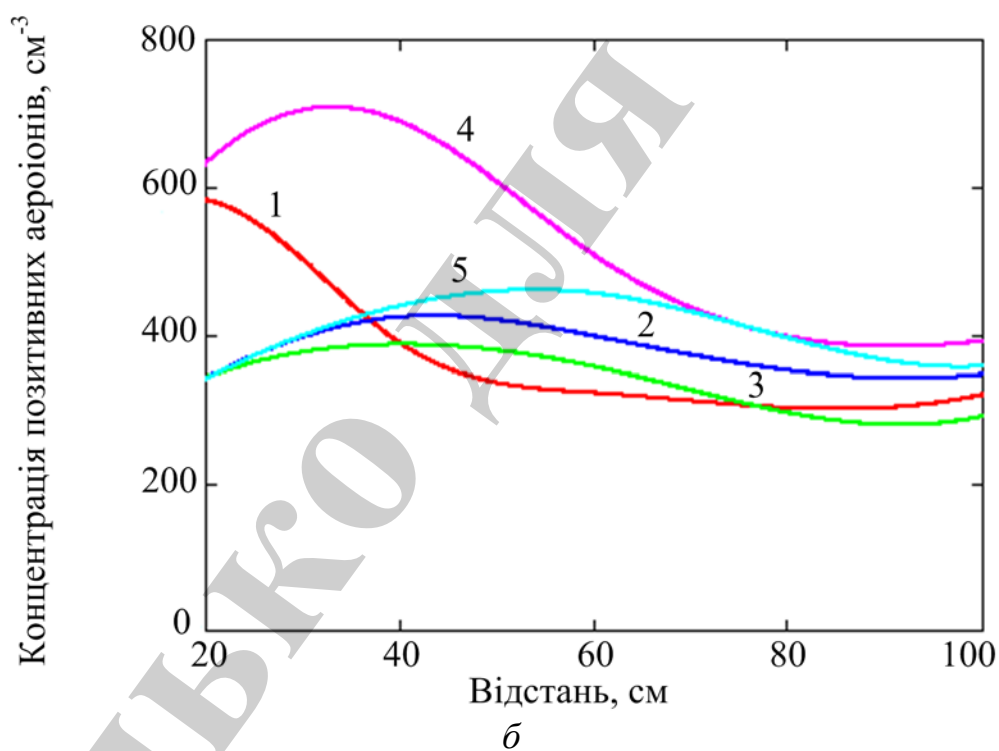
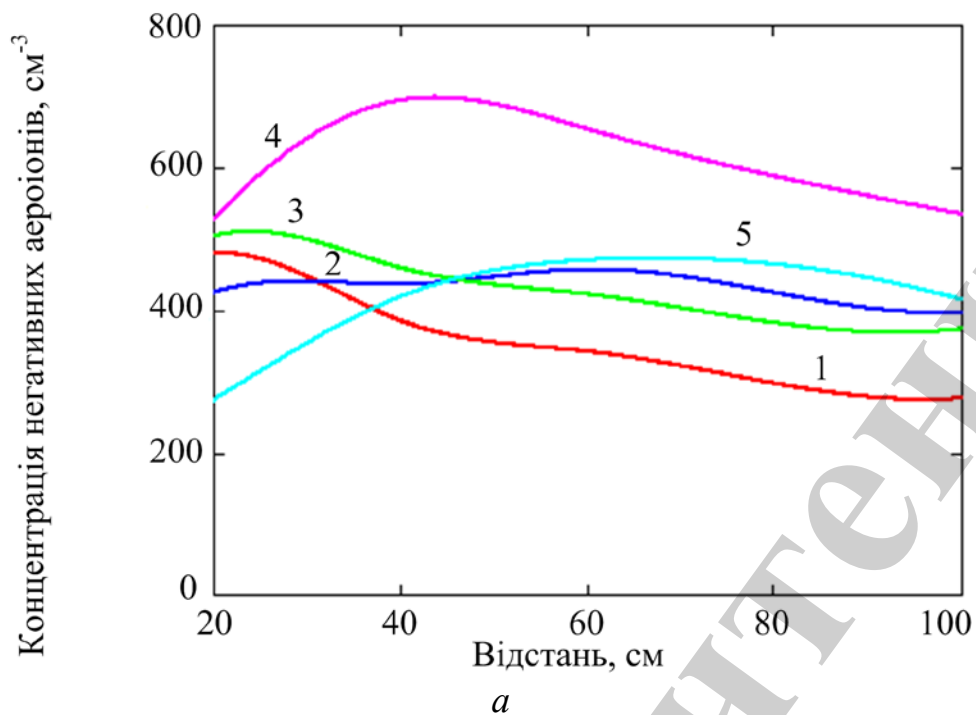


Рис. 3. Динаміка концентрації аероіонів за ультразвукової обробки дистильованої води з відстанню від швидкості потоку повітря: 1 – 1 м/с; 2 – 2 м/с; 3 – 4 м/с; 4 – 6 м/с; 5 – 8 м/с: *a* – негативних (фон – $n^- = 147 \text{ см}^{-3}$); *б* – позитивних (фон – $n^+ = 170 \text{ см}^{-3}$)

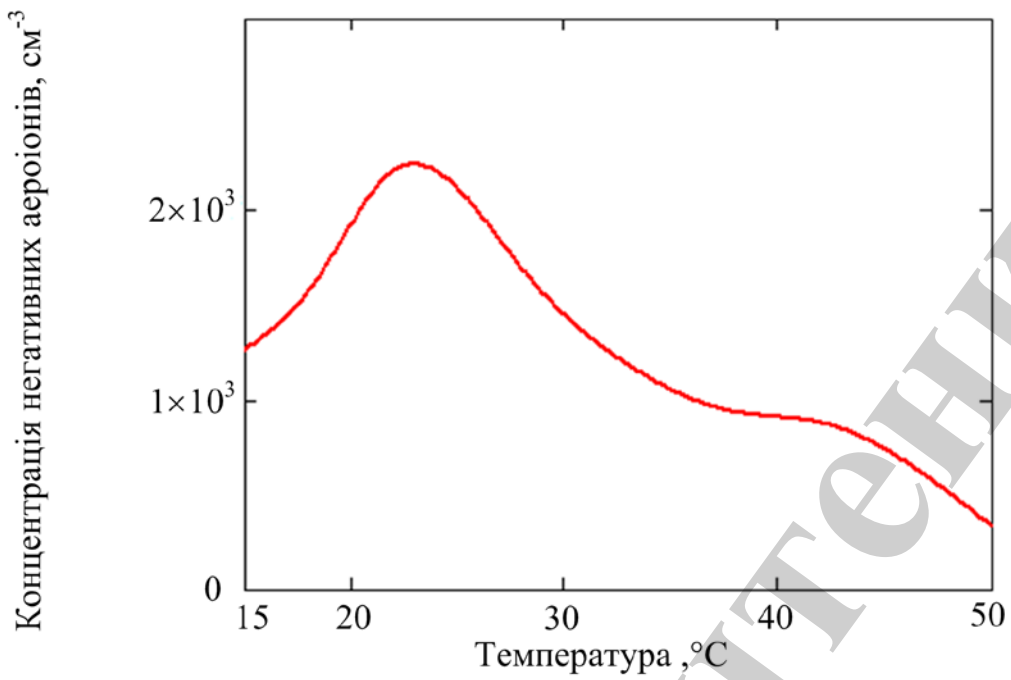
Таблиця 5

Функціональні залежності зміни аероіонів від швидкості повітря

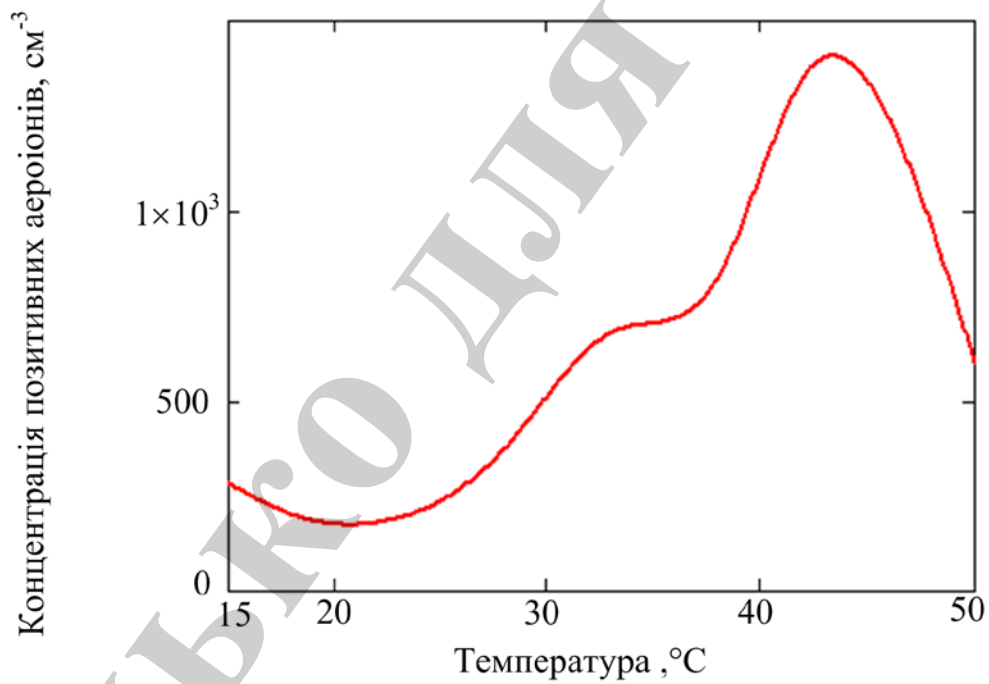
Аероіони	Апроксимуючі функції
$v, 1 \text{ м/с}$	
n^-	$y = -27,35x^2 + 244,5x - 151,5; R^2 = 0,88$
n^+	$y = -22,84x^2 + 201,2x - 27,86; R^2 = 0,85$
$v, 2 \text{ м/с}$	
n^-	$y = -32,42x^2 + 329,0x - 343,1; R^2 = 0,87$
n^+	$y = -24,89x^2 + 249,7x - 207,4; R^2 = 0,87$
$v, 4 \text{ м/с}$	
n^-	$y = -32,35x^2 + 312,3x - 273,5; R^2 = 0,79$
n^+	$y = -23,49x^2 + 223,9x - 155,1; R^2 = 0,78$
$v, 6 \text{ м/с}$	
n^-	$y = -55,38x^2 + 557,8x - 702,8; R^2 = 0,82$
n^+	$y = -53,57x^2 + 488,7x - 492,8; R^2 = 0,76$
$v, 8 \text{ м/с}$	
n^-	$y = -11,62x^2 + 166,7x - 150,9; R^2 = 0,758$
n^+	$y = -18,00x^2 + 198,9x - 145,5; R^2 = 0,718$

Аналіз отриманих графічних залежностей (рис. 3, а, б, табл. 5) свідчить про тотожність змін концентрацій негативних і позитивних аероіонів від змін швидкості потоку повітря, під який підпадає атмосферне повітря виробничих приміщень. Це можна пояснити тим, що під час подачі на ультразвукову мембрану струменя води товщиною ~ 5 мм відбувається зміна сили поверхневого натягу, що сприяє чисто механічному розриву міжмолекулярних водневих зв'язків за рахунок ультразвукової кавітації. Установлюється динамічна рівновага: скільки аероіонів утворилось, стільки ж рекомбінувало. Особливо це відчутно на відстані 40 см і вище від джерела потоку повітря.

З метою встановлення залежності зміни концентрації аероіонів від температури водного розчину, було проведено дослідження, коли на працюючу мембрану ультразвукового генератора, подавався тонкий струмінь дистильованої води з температурою від 15 до 50 °С. Відстань від УАГ до «Сапфір 3К» – 0,5 м. Графіки залежностей приведені на рис. 4, а, б.



a



б

Рис. 4. Динаміка концентрації аероіонів за ультразвукової обробки залежно від температури дистильованої води: *a* – негативних (фон – $n^- = 371 \text{ см}^{-3}$); *б* – позитивних (фон – $n^+ = 394 \text{ см}^{-3}$)

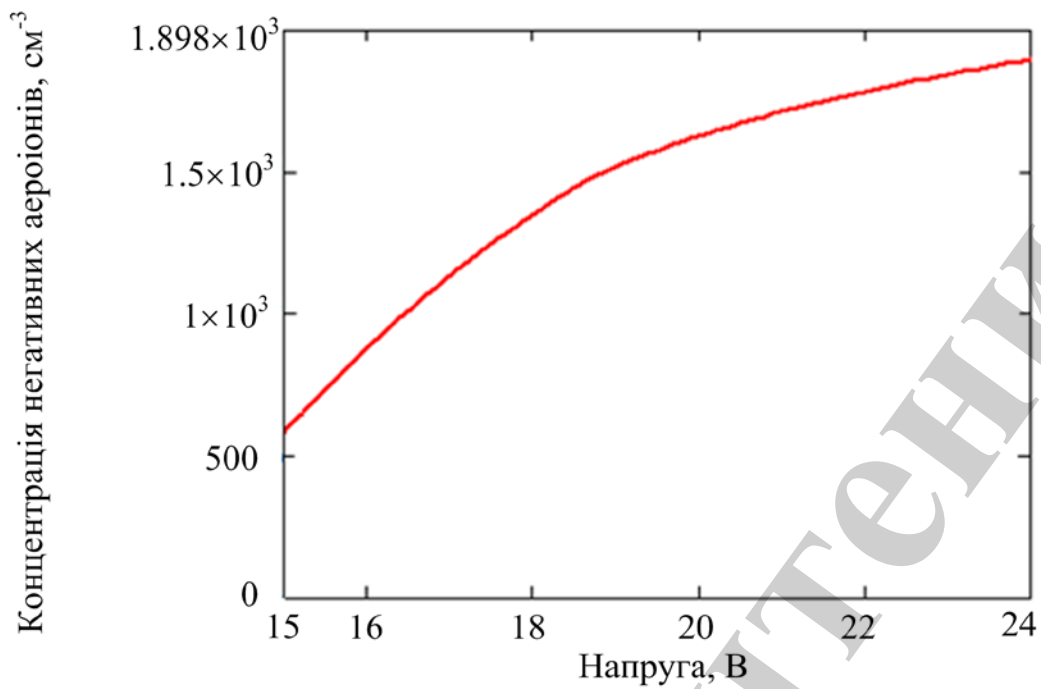
Таблиця 6

Функціональні залежності зміни аероіонів від температури дистильованої води

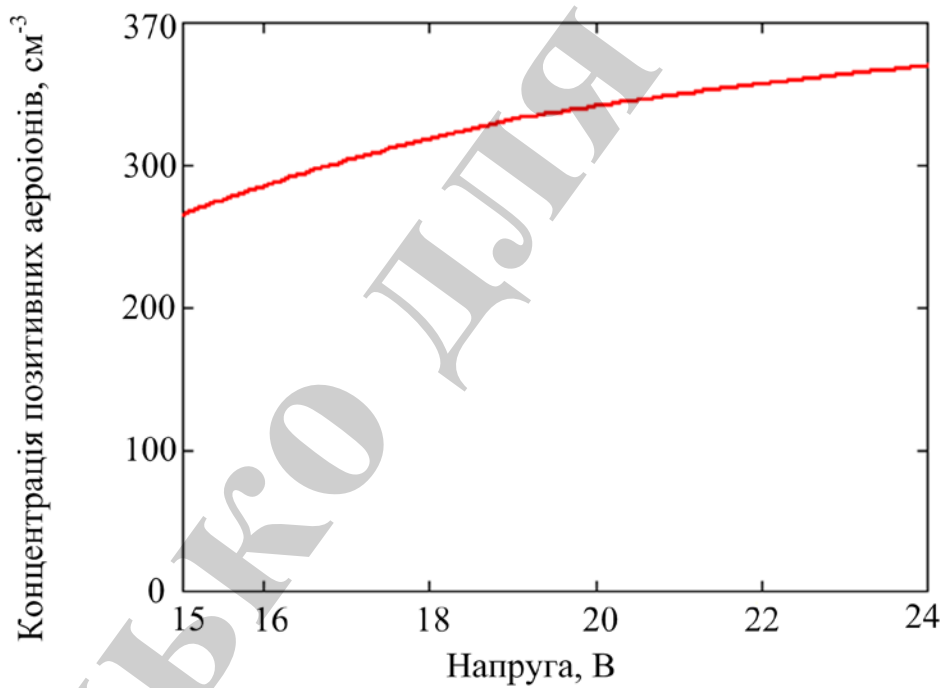
Аероіони	Апроксимуючі функції
n^-	$y=18,782x^3-362,8x^2+1931,1x-1258,1; R^2=0,89$
n^+	$y=-12,633x^3+197,92x^2-784,73x+1067,7; R^2=0,79$

Аналіз отриманих експериментальних даних (рис. 4, а, б, табл. 6) свідчить, що найбільшій концентрації негативних аероіонів можна досягти, підтримуючи температуру від 20 до 25 °С. Концентрація позитивних аероіонів найбільшого значення набуває при 42–45 °С, але після 45 °С знову йде на спад. Окрім того, в інтервалі температур 35–37 °С спостерігається встановлення механохімічної рівноваги: концентрації негативних і позитивних аероіонів є практично однаковими. У даному випадку швидкості утворення аероіонів обох знаків дорівнюють швидкостям рекомбінації.

Останнє дослідження проводилося з метою встановлення залежності зміни концентрації аероіонів, коли на працюючій п'єзоелемент ультразвукового генератора, напруга якої змінювалася в межах від 16 до 24 В, подавався тонкий струмінь дистильованої води. Відстань від UAG до «Сапфір 3К» – 0,5 м. Графік залежностей приведений на рис. 5, а, б.



a



б

Рис. 5. Динаміка концентрації аеріонів за ультразвукової обробки дистильованої води від напруги на UAG: *a* – негативних (фон – $n^- = 371 \text{ cm}^{-3}$); *б* – позитивних (фон – $n^+ = 394 \text{ cm}^{-3}$)

Таблиця 7

Функціональні залежності зміни аероіонів від напруги на UAG

Аеріони	Апроксимуючі функції
n^-	$y = -134,7x^2 + 1088x - 153,7; R^2 = 0,98$
n^+	$y = -3,958x^2 + 60,62x + 223,3; R^2 = 0,99$

Якщо в попередніх дослідженнях (рис. 1–4) при іонізації повітря відбувався спільний вплив балоелектричного ефекту і ультразвукової кавітації, то в даному випадку (рис. 5, табл. 7) спостерігається переважний вплив саме кавітаційних процесів за рахунок трансформації низької щільності енергії ультразвуку на високу щільність енергії поблизу і всередині газової бульбашки. При збільшення напруги на резонансній мембрані від 16 до 24 В відбувається збільшення інтенсивності ультразвуку і, як наслідок, кавітаційних процесів, що обумовлює збільшення вмісту гідроіонних часток у повітрі.

Проведені експериментальні дослідження дозволили розробити структуру автоматизованої системи керування аероіонним режимом робочої зони виробничих приміщень за штучної іонізації повітря з використанням генератора аероіонів та вентиляційної системи (рис. 6).

Режим роботи системи задається параметром $n^-_{\text{зад}}$ (необхідна концентрація аероіонів) і поточними значеннями швидкості обертання насоса і температури води. Основним елементом є система керування, яка керує певним набором підпорядкованих їй пристроїв залежно від заданого режиму роботи, сигналу розузгодження від блоку порівняння. До них належать вентиляційна установка, насосний агрегат (засіб приводу) та ультразвуковий генератор аероіонів (регулятор напруги).

Регулятор температури, отримуючи сигнал завдання від системи $U_{\text{крт}}$, керує роботою трубчатого електронагрівача, посиляючи на нього керування $t_{\text{в}}$. Крім цього система керує роботою насоса керуючим сигналом швидкості обертання $v_{\text{н}}$. Швидкість потоку повітря регулюється вентилятором під керуванням перетворювача частоти, який в свою чергу отримує уставку $v_{\text{в}}$ – керуючий сигнал швидкості обертання вентилятора.

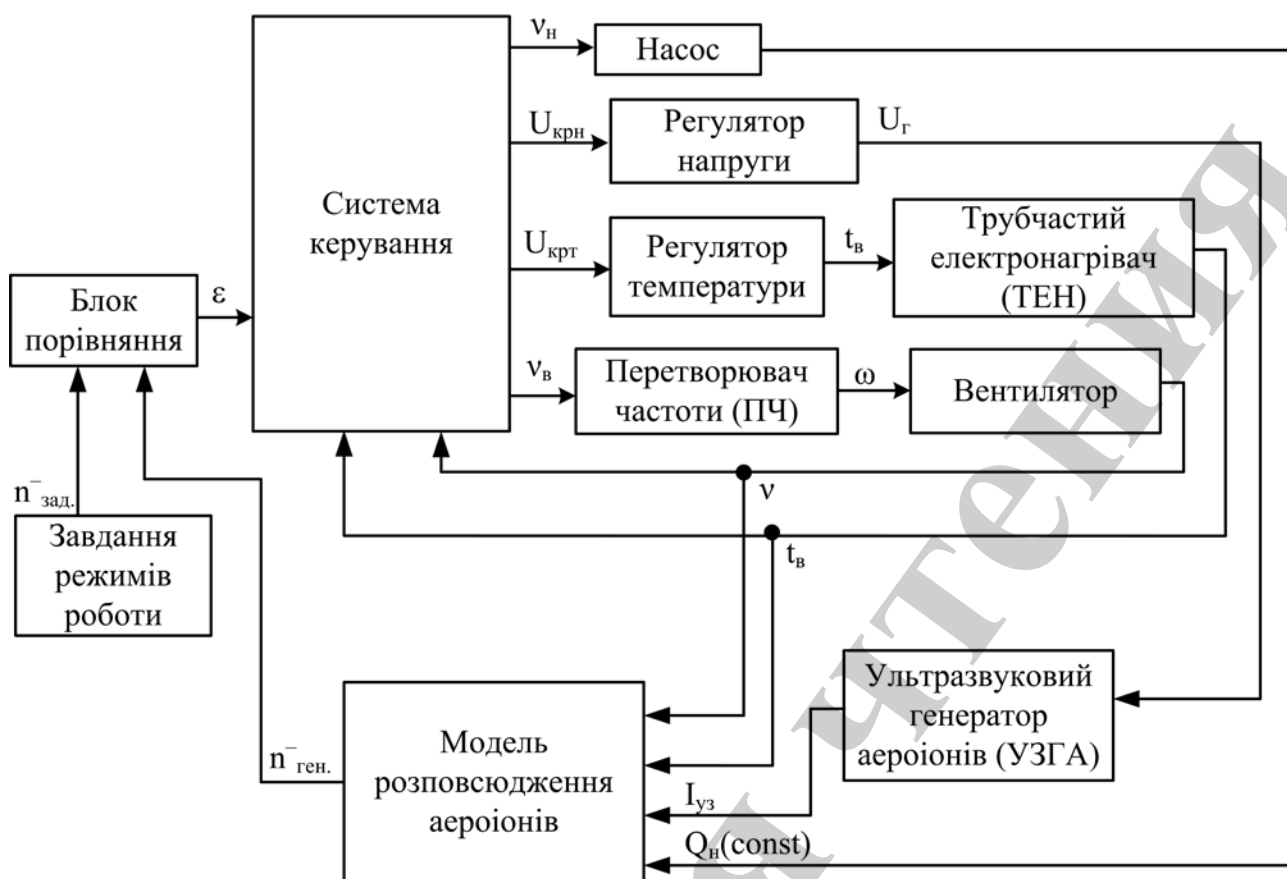


Рис. 6. Блок-схема системи забезпечення якісного аероіонного режиму у виробничих приміщеннях за ультразвукової іонізації повітря

У даній системі керування якістю внутрішнім повітрям потрібно виділити ультразвуковий генератор аероіонів (UAG), який отримує керуючі впливи U_r від регулятора напруги. Генератор напруги, в свою чергу, отримує уставку $U_{крн}$ від системи керування. Значення сигналу керування залежить від завдання необхідної кількості аероіонів у блоці завдання.

Слід зазначити, що точне вимірювання кількості аероіонів в режимі реального часу пов'язане зі значними технічними складнощами. У системі передбачено модель розповсюдження аероіонів з відповідними параметрами вимірювання. Це швидкість потоку повітря, температура води, напруга на UAG. Вихід моделі і є фактично сигналом зворотного зв'язку. Якщо, відповідно до проведених експериментів, виконати стабілізацію деяких параметрів (подача води, напруга на UAG тощо), систему керування можна значно спростити та використовувати приведені жорсткі та/або гнучкі зворотні зв'язки.

6. Обговорення результатів дослідження зміни концентрації аероіонів під дією балоелектричного ефекту та ультразвуку

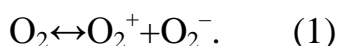
Зміна концентрації аероіонів від ступеня мінералізації води (рис. 1, а, б) пояснюється тим, що, по-перше, диполі молекул води створюють власне електричне поле, а це сприяє конвективному переносу зарядів. При цьому гідратований протон за рахунок дії кавітації полишає свою оболонку, переноситься до сусідніх молекул води з утворенням нової гідратної оболонки. По-друге, моле-

кули води іонізуються з поглинанням тепла внаслідок коливань електромагнітного поля, що породжується коливальними рухами диполів води під дією ультразвукової кавітації.

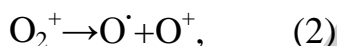
Слід зазначити, що водопровідна вода містить у своєму складі компоненти слабких і сильних електролітів, що відображається на окисно-відновному потенціалі такого розчину, особливо на поверхневих плівках, які утворюються під дією ультразвукової хвилі. У зв'язку з цим відбувається просторовий перенос позитивного заряду H_3O^+ в електричному полі за рахунок участі у цьому процесі асоційованих молекулярних комплексів. Одночасно з використанням ультразвуку суттєво посилюється балоелектричний ефект.

У цьому випадку підвищується електропровідність води за рахунок появи заряджених пухирів Оксигену, що створює умови для формування електрокінетичного потенціалу поблизу подвійного електричного шару, який складається з газоподібних Оксигену та Гідрогену з розташованими навколо них іонами H_3O^+ і OH^- .

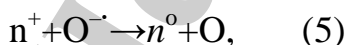
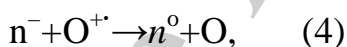
Аналіз динаміки зміни концентрації аероіонів залежно від солоності води (рис. 2, а, б) показав, що зі зростанням мінералізації води збільшується концентрація гідратних форм як позитивних, так і негативних іонів, що формують хімічний склад води, $-\text{Me}^{n+} \cdot n\text{H}_2\text{O}$, $\text{A}^{n-} \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Це не дозволяє вивільнитись молекулам води на поверхню і до атмосферного повітря за рахунок електростатичної взаємодії позитивних і негативних іонів розчинених солей і диполів молекул води. Зазначене, у свою чергу, відображається на механізмі дії ультразвуку на поверхневі шари водного розчину—спостерігається ультразвукова кавітація за рахунок розчинених у водному розчині газів, наприклад, Оксигену. За заданих умов експерименту, під дією енергії ультразвуку у процесі кавітації Оксиген може трансформуватись таким чином:



У свою чергу, кожна з компонент утворює Оксиген-радикал і позитивно та негативно заряджені іон-радикали з енергіями активації 5,76 і 4,32 еВ відповідно, що цілком реально для умов ультразвукової кавітації:



Очевидно, що на відстані до 0,3 м (рис. 3, а, б) стрімке зниження концентрацій негативних та позитивних аероіонів відбувається за схемою:



Зі збільшенням відстані від джерела ультразвуку утворенню негативних і позитивних аероіонів сприяє атмосферний Оксиген, а не той, що міститься у водному розчині. Збільшення мінералізації води знижує ступінь утворення іон-радикалів Оксигену внаслідок того, що наявність іонів солей за рахунок наявності гідратних комплексів блокує вивільнення іон-радикалів Оксигену.

Окрім того, за рахунок малого об'єму водного розчину відбувається концентрування енергії ультразвуку, але його потужності не вистачає для розриву хімічних зв'язків у гідратних комплексах і міжмолекулярних водневих зв'язків у молекулах води. По-друге, зі збільшенням відстані від джерела ультразвуку і мінералізації води у повітрі збільшується кількість незв'язаних аероіонів обох полярностей. При цьому зафіксовано зміну електропровідності розчинів від 2,5 мСм/см для концентрації 1,1 % до 7,5–8 мСм/см для концентрації 4,4 % [23].

Аналіз досліджень зміни концентрації аероіонів під впливом потоку повітря довів, що головний вплив здійснює динамічний тиск потоку повітря, тому за більшої швидкості повітря вода відчуває більший динамічний тиск, тобто значення динамічного тиску більше за силу натягу води, або зовнішні сили здійснюють роботу проти сил зчеплення молекул. При цьому молекулі поверхневого шару мають більшу потенційну енергію порівняно з внутрішніми шарами. Дія ультразвуку додає ще й звукового тиску, який сприяє створенню на поверхні води ділянок, що чергуються, з розрідженням і з підвищеним тиском у поверхневих шарах. Тоді умовою утворення аероіонів у повітряному потоці за сумісної дії ультразвукової кавітації є

$$P_{\text{тп}} + P_{\text{зт}} > P_{\text{нв}}, \quad (7)$$

де $P_{\text{тп}}$ – динамічний тиск повітря ($\rho v^2 / 2$); ρ – густина повітря, кг/м³; v – швидкість повітря, м/с; $P_{\text{зт}}$ – діючий звуковий тиск ($Z \cdot v_{\pm}$); Z – акустичний опір води, Па·с/м; v_{\pm} – рухливість молекул води, м/с; $P_{\text{нв}}$ – сила поверхневого натягу води ($\sigma \cdot l$); σ – коефіцієнт поверхневого натягу води –

$$\sigma = \frac{\rho \lambda^2}{4\pi^2} (2\pi v^2 - g);$$

λ – довжина хвилі ультразвуку; g – прискорення вільного падіння; v – частота джерела ультразвуку. Тоді математичний вираз (7) можна записати у загальному випадку як

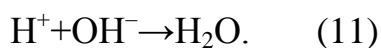
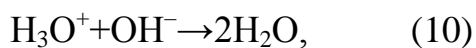
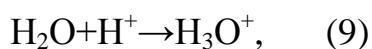
$$\frac{\rho v^2}{2} + Z \cdot v_{\pm} > \frac{\rho \lambda^2}{4\pi^2} (2\pi v^2 \lambda - g) \cdot l, \quad (8)$$

Отже, можна стверджувати, що для дистильованої води (не містить мінеральних домішок) утворення аероіонів обох знаків має фізико-механічну природу.

Характер кривих зміни концентрації аероіонів від температури водного розчину (рис. 4, а, б) є з одного боку однаковим, а з іншого – графік зміни концентрацій позитивних аероіонів є віддзеркаленням графіку змін негативних аероіонів. Відрізняється лише інтенсивність піків. Необхідно також підкреслити, що зі збільшенням температури середовища зменшується в'язкість води, збільшується рухливість молекул води. Унаслідок цього одночасно слабшають міжмолекулярні і внутрішньо молекулярні водневі зв'язки $\dots\text{H}-\text{OH}\dots\text{OH}-\text{H}\dots$. Це полегшує утворення гідроген-аероіонів (H^+), гідроксоній-аероіонів (H_3O^+ – гідратована форма гідроген-аероіона) і гідроксил-аероіонів (OH^-).

Оскільки молекулярна маса гідроген-аероіону складає всього лише 1 а.о., то він легше виходить на поверхню з внутрішніх прошарків води. У зв'язку з цим і спостерігається зростання концентрації при 20–25 °С. Молекулярна маса гідроксил-аероіона становить 17 а.о. На його вихід з водної товщі необхідно витратити більше енергії, що досягається лише за температури 42–45 °С.

Одночасно в інтервалі температур 20–42 °С спостерігається поступове зменшення концентрації гідроген-аероіонів і збільшення гідроксил-аероіонів. Це пов'язано з тим, що зі збільшенням температури води на її поверхню виходять власне молекули H_2O і починається процес «розклад–рекомбінація».



Отже, підвищення температури сприяє аероіонізації повітря виробничого середовища, а у сполученні з явищем ультразвукової кавітації досягається додатково зволоження повітря приміщень, що сприяє збільшенню рівня комфортності для працюючих.

Аналізуючи графіки динаміки концентрації аероіонів за ультразвукової обробки дистильованої води від напруги на UAG (рис. 5, а, б) спостерігаємо, що концентрація негативних аероіонів збільшує практично в три рази, у свою чергу концентрація позитивних практично не змінюється. Це обумовлено механохімічною природою явищ, що відбуваються.

У цьому випадку можна вважати, що відбувається переорієнтація диполів води у полі впливу напруги від UAG і одночасно механодеструкція – розрив хімічних зв'язків з утворенням відповідних негативних і позитивних аероіонів. Дію ультразвуку можна прирівняти до механічного впливу, оскільки здійснюється звуковий тиск на водне середовище і на хімічні зв'язки одночасно. У полі прикладення механічних сил – звукового тиску – значення набувають швидкість повітряного потоку (рис. 3, а, б) і рівень енергетичного виходу молекул на поверхню (вплив температури середовища – рис. 4, а, б) з наступним утворен-

ням негативних і позитивних аероіонів. Збільшення величини напруги UAG є протидією процесам рекомбінації утворених аерофонів, внаслідок цього концентрації негативних і позитивних аерофонів зростають. Після зняття напруги концентрації аероіонів будуть зменшуватись за рахунок рекомбінації і процесів хімічної взаємодії з домішками, що містяться у повітрі виробничих приміщень.

Окремо необхідно відзначити, що дослідження проводились за відсутності людей та при вимкненому технологічному обладнанні, які можуть впливати на кількість і направленість розповсюдження аероіонів у робочому просторі виробничих приміщень. Недоліком можна вважати те, що під час виконання натурних вимірювань не брались до уваги зміни температурно-вологісного режиму, які можуть вплинути на концентрацію аероіонів, що генеруються UAG у робочій зоні. Необхідним є створення більш потужного UAG для збільшення аероіонної зони комфортності. Виконані експериментальні дослідження аероіонного режиму в приміщеннях за ультразвукової іонізації повітря довели доцільність синтезу математичної моделі взаємозалежності розглянутих фізичних факторів і розробки цілісної системи керування за їх комбінованого впливу.

Розроблення програмно-технічного комплексу автоматизованої системи управління вентиляційним комплексом та ультразвуковим генератором аероіонів дозволить здійснювати моніторинг і обробку інформації стосовно технологічних, електричних і мікрокліматичних параметрів, налаштовувати, узгоджувати роботу та спільно керувати пристроями вентиляційної системи і ультразвуковим генератором аероіонів.

7. Висновки

1. Аналіз експериментальних даних довів, що зі збільшенням мінералізації води рівень утворення аероіонів зменшується, так само, як і зі зростанням відстані від джерела ультразвуку. Спостерігається одночасне виникнення балоелектричного ефекту та ультразвукової кавітації за рахунок розчинених у мінералізованій воді газів.

2. Доведено, що зі зменшенням концентрації солей у воді концентрації негативних і позитивних аероіонів збільшуються. Отже, для поліпшення якості аероіонного складу повітря виробничих приміщень пропонується застосування демінералізованої води температурою від 20 до 25 °C і направленою повітряного потоку швидкістю 6 м/с у бік робочої зони зі сполучною дією ультразвуку та балоелектричного ефекту, оскільки утворення негативних аероіонів у таких умовах відбувається більш інтенсивно, що сприяє поліпшенню санітарно-гігієнічних умов праці.

3. Використання малогабаритного ультразвукового генератора аероіонів потужністю 10 Вт на відстані 0,5 м із застосуванням дистильованої води збільшує концентрацію негативних аероіонів практично в шість разів. За рахунок спільного впливу ультразвукової кавітації поверхневого шару води та балоелектричного ефекту не відбувається генерації озону і оксидів азоту. Це створює комфортний аероіонний склад повітря в робочій зоні виробничих приміщень.

4. Запропоновано структуру системи забезпечення якісного аероіонного режиму в робочому просторі виробничих приміщень за ультразвукової іонізації

повітря. Вона реалізує комбіновану зміну швидкості обертання вентилятора і насосу, температурного режиму водного розчину та потужності ультразвукового генератора аероіонів.

Література

1. Глива В. А. Дослідження впливу мікрокліматичних параметрів повітрообміну на аероіонний склад повітря робочих приміщень // Проблеми охорони праці в Україні. 2011. № 20. С. 58–65.
2. Mathematical model for monitoring carbon dioxide concentration in industrial greenhouses / Laktionov I., Vovna O., Cherevko O., Kozlovskaya T. // Agronomy Research. 2018. Vol. 16, Issue 1. P. 134–146. doi: <https://doi.org/10.15159/ar.17.074>
3. Фізіолого-гігієнічна оцінка мікроклімату сучасних офісних приміщень та адаптаційні реакції організму офісних працівників / Назаренко В. І., Терещенко П. С., Палійчук С. П. та ін. // Український журнал з проблем медицини праці. 2014. № 2. С. 41–47.
4. Air Ion Behavior in Ventilated Rooms / Fletcher L. A., Noakes C. J., Sleigh P. A., Beggs C. B., Shepherd S. J. // Indoor and Built Environment. 2008. Vol. 17, Issue 2. P. 173–182. doi: <https://doi.org/10.1177/1420326x08089622>
5. Laktionov I., Vovna O., Zori A. Concept of low cost computerized measuring system for microclimate parameters of greenhouses // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2017. Vol. 23, Issue 4. P. 668–673.
6. Magnier-Bergeron L., Derome D., Zmeureanu R. Three-dimensional model of air speed in the secondary zone of displacement ventilation jet // Building and Environment. 2017. Vol. 114. P. 483–494. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.003>
7. Визначення параметрів оптимальної комфортності у робочій зоні приміщення за показниками повітряного середовища / Запорожець О. І., Сукач С. В., Галаган О. Г., Козловська Т. Ф. // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2017. Вип. 1 (102). С. 17–21.
8. Control of approach and landing phase for reentry vehicle using fuzzy logic / Min C., Lee D., Cho K., Jo S., Yang J., Lee W. // Aerospace Science and Technology. 2011. Vol. 15, Issue 4. P. 269–282. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2010.07.006>
9. Atencia Villagomez J. M., Diveev A., Sofronova E. The network operator method for synthesis of intelligent control system // 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). 2012. doi: <https://doi.org/10.1109/iciea.2012.6360718>
10. Рутковская Д., Пилипинський М., Рутовский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М., 2006. 452 с.
11. Кузев И. О., Сергиенко С. А., Волянский Р. С. Дробномерные регуляторы с «короткой памятью» в релейных системах оптимального управления // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2011. Вип. 3. С. 49–53.
12. Zagirnyak M., Serhiienko S., Serhiienko I. Improvement of the qualitative characteristics of an automatic control system with a fractional-order PID-

controller // 2017 18th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE). 2017. doi: <https://doi.org/10.1109/cpee.2017.8093062>

13. Prakash J., Jayasurian S. R. Design and Implementation of Fractional-Order Controller for Fractional Order System // *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2013. P. 319–326. doi: https://doi.org/10.1007/978-81-322-1035-1_28

14. Беляев Н. Н., Цыганкова С. Г. Оценка аэроионного режима в рабочей зоне при искусственной ионизации воздуха в помещении // *Науковий вісник будівництва*. 2015. № 3 (81). С. 158–161.

15. Беляев Н. Н., Цыганкова С. Г. Математическое моделирование аэроионного режима в помещении при искусственной ионизации воздуха // *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2015. № 83. С. 40–46.

16. Сукач С. В., Сидоров О. В. Методологічні засади підвищення якості контролю аероіонного складу повітря виробничого середовища // *Проблеми охорони праці в Україні*. 2016. № 32. С. 127–133.

17. Акіменко В. Я., Харченко С. О. Інженерно-технічне обладнання як потенційне джерело гідроаерозольного забруднення повітря // *Актуальні питання гігієни та екологічної безпеки України: збір. тез доповідей науково-практичної конференції*. Київ, 2008. С. 11–12.

18. Exposure to Air Ions in Indoor Environments: Experimental Study with Healthy Adults / Wallner P., Kundi M., Panny M., Tappler P., Hutter H.-P. // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2015. Vol. 12, Issue 11. P. 14301–14311. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph121114301>

19. Untersuchungen zum Einfluss von Wandbeschichtungen auf die Ionenzahl und das Verhalten von Partikeln in der Raumluft. URL: http://www.innenraumanalytik.at/pdfs/fraunhofer_ionen.pdf

20. Толкунов І. О., Попов І. І. Вплив природних джерел аероіонізації на процес формування полів концентрації аероіонів у повітряному середовищі приміщень // *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. 2011. Вип. 1 (27). С. 243–246.

21. Characterization of ions at Alpine waterfalls / Kolarž P., Gaisberger M., Madl P., Hofmann W., Ritter M., Hartl A. // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2012. Vol. 12, Issue 8. P. 3687–3697. doi: <https://doi.org/10.5194/acp-12-3687-2012>

22. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / Хмелев В. Н., Сливин А. Н., Барсуков Р. В. и др. Бийск, 2010. 203 с.

23. Краткий справочник физико-химических величин / под ред. А. А. Равделя, А. М. Пономаревой. Л.: Химия, 1983. 232 с.