DOI 10.36074/grail-of-science.16.02.2024.016

# МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ПЕРЕМІЩЕННЯ ПООДИНОКОГО ФІЗИЧНОГО ОБ'ЄКТУ В ЛОКАЛЬНОМУ ПРИМІЩЕННІ ШЛЯХОМ ІМПУЛЬСНОГО АКУСТИЧНОГО ЗОНДУВАННЯ

НАУКОВО-ДОСЛІДНА ГРУПА:

Азаренко Олена Василівна
доктор фізико-математичних наук, професор, заступник керівника
*Науково-дослідний лабораторно-експериментальний центр «БРАНД ТРЕЙД», Україна*

Гончаренко Юлія Юріївна
доктор технічних наук, доцент, професор кафедри
*Європейський університет, Україна*

Дівізінюк Михайло Михайлович
доктор фізико-математичних наук, професор, головний науковий співробітник
*Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики Національної академії наук України, Україна*

Мирошник Олег Миколайович
доктор технічних наук, професор,заступник начальника інституту з навчальної та наукової роботи
*Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Україна*

Поляков Сергій Володимирович
заступник начальника
*Головного управління з реагування на надзвичайні ситуації ГУ ДСНС України у Луганській області, Україна*

Фаррахов Олександр Володимирович
кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник
*Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики Національної академії наук України, Україна*

***Анотація.*** *Описується математична модель акустичного контролю переміщення поодинокого фізичного об'єкту в локальному приміщенні шляхом імпульсного акустичного зондування, яка є системою з трьох залежностей. Перша залежність показує, що при знаходженні в зоні стійкого прийому відбитого ехосигналу від індивідуального маркера, встановленого на фізичному предметі, його деформації, що обумовлені ефектом Доплера, надійно враховуються поздовжніми та поперечними складовими його переміщення в локальному приміщенні. Друга та третя залежності дозволяють можливий ступінь частотних деформацій, викликаних поздовжнім та поперечним переміщенням фізичного предмета, як у зоні стійкого прийому ехосигналу, так і за його межами.*

*Впровадження розробленої моделі в проектних організаціях дозволить, з одного боку, створювати нове покоління приладів та пристроїв безпеки для об'єктів критичної інфраструктури. З іншого, модернізувати існуючі системи охорони та контролю доступу до внутрішніх приміщень об'єктів критичної інфраструктури, що експлуатуються в даний час.*

***Ключові слова:*** *критична інфраструктура, швидкість звуку, ефект Доплера, перетворення Фур'є, засоби безпеки.*

## Вступ

Забезпечення безпечного та надійного функціонування стратегічних об'єктів держави та об'єктів критичної інфраструктури в умовах терористичного впливу – актуальна проблема [1-3], вирішенням якої зайняті державні та науково-технічні структури, спеціальні служби та академічні установи [4-7]. Безпосереднє вирішення цієї проблеми покладено на служби фізичного захисту цих об'єктів [8,9], які оснащені багатьма системами безпеки [10]. Розробка нових підходів у вирішенні окремих завдань забезпечення безпеки об'єктів критичної інфраструктури [11-13], у тому числі розробка нових математичних моделей [14-16], дозволяє не лише створювати нове покоління приладів та пристроїв забезпечення безпеки, а й модернізувати існуючі системи охорони та сигналізації.

Мета даної роботи полягає в розробці математичної моделі акустичного контролю переміщення поодинокого фізичного об'єкту в локальному приміщенні шляхом імпульсного акустичного зондування.

Для досягнення поставленої мети необхідно послідовно вирішити такі завдання. По-перше, проаналізувати залежність величини зсуву від зондувальної акустичної частоти та швидкості переміщення фізичних предметів. По-друге, дати фізичне тлумачення поняття ідентифікації фізичного предмета у вигляді індивідуального маркера. По-третє, розробити потрібну математичну модель.

## Залежність величини зсуву від зондуючої акустичної частоти і швидкості переміщення фізичних предметів (початкові умови моделі, що розробляється)

Розглядаючи ефект Доплера, необхідно виділити дві ситуації. У першій здійснюється пасивний прийом акустичного сигналу від об'єкту, що рухається. У другій виконується активне випромінювання акустичного сигналу (зондування) і прийом відбиттів від фізичного об'єкту, що рухається [13].

У першому випадку сигнал, що випромінюється об'єктом на частоті $f_0$, який рухається зі швидкістю *V*, прийматиметься приймальним пристроєм на частоті $f_{np}$, визначається виразом *(1)*

$$f_{np} = \frac{f_0}{\left(1 \pm \frac{V}{C}\right)} \tag{1}$$

Доплерівський зсув визначатиметься як різниця прийнятої та випроміненої частот, тобто

$$\Delta f = f_{np} - f_0 = f_0\left(\frac{C}{C \pm V}\right) - f_0 = \pm f_0\left(\frac{V}{C \pm V}\right) \tag{2}$$

У другому випадку при зондуванні повітряного простору ситуація ускладнюється. Перший доплерівський зсув відбуватиметься при підході, опроміненої акустичною хвилею фізичного об'єкту, що рухається. Другий доплерівський зсув буде здійснюватися при відбитті (перевипромінюванні) акустичної хвилі від фізичного об'єкту, що рухається. У результаті, зондуючий акустичний сигнал, що приймається в точці випромінювання, буде мати частотний зсув, збільшений вдвічі, тобто

$$\Delta f = \pm 2 f_0\left(\frac{V}{C \pm V}\right) \tag{3}$$

Отже, величина доплерівського зсуву пропорційна величині частоти зондуючого акустичного сигналу і швидкості переміщення фізичних об'єктів. Іншими словами, чим вище частота зондування і швидкість переміщення фізичного об'єкту, що рухається, тим більше частотний зсув, і навпаки. Знак зсуву визначається напрямом руху фізичного об'єкту. При зближенні він позитивний, при видаленні негативний.

Таким чином, при акустичному зондуванні локальних приміщень об'єкту критичної інфраструктури можливе здійснення контролю за переміщенням фізичних предметів всередині приміщень за допомогою реєстрації зсуву допплерівської частоти зондуючого сигналу. Величина цього зсуву дозволяє визначати швидкість переміщення фізичного об'єкту, а його знак – напрямок переміщення.

### Фізичне тлумачення поняття ідентифікації фізичного предмета за допомогою індивідуального маркера (граничні умови моделі, що розробляється)

Відомі варіанти ідентифікації фізичних предметів шляхом встановлення (прикріплення до них) індивідуальних маркерів, які мають специфічні відбиваючи властивості і дозволяють однозначно ідентифікувати (впізнати) маркер за специфічними властивостями відбитого сигналу [16]. У свою чергу, це дозволяє однозначно визначати координати або розташування фізичного предмету, на якому прикріплений індивідуальний маркер. У разі встановлення великої кількості індивідуальних маркерів на відповідній кількості фізичних предметів, можна здійснювати контроль за місцем розташування та переміщенням цієї множини предметів у приміщенні, в якому проводиться імпульсне акустичне зондування.

Однак тут виникає протиріччя, яке полягає в тому, що ідентифікація індивідуального маркера визначається прив'язкою частоти випромінювання акустичного сигналу до відбиття, що приймається, або ехосигналом. Чим вище частота зондуючого сигналу, тим краще і точніше роздільна здатність та розпізнавання індивідуальних особливостей прийнятих відбиттів. У той самий час, чім вища частота зондуючого сигналу, то більше величина частотного зсуву, обумовленого ефектом Доплера, що значно ускладнює розпізнавання індивідуальних особливостей прийнятих відбиттів.

Відомо [16], що оператори $\mathbf{R}$ і $\mathbf{R}^{\#}$ утворюють подвійну пару в сенсі інтегральної геометрії, тобто оператор $\mathbf{R}$ задає інтегрування по всіх точках площини, а оператор $\mathbf{R}^{\#}$ задає інтегрування по всіх точках площині, що проходять через цю точку.

Якщо

$$\mathbf{R}_{\theta}^{\#} g(x) = g(x \cdot \theta) \tag{4}$$

то справедливо

$$\int_{R^1} \mathbf{R}_{\theta}^{\#} \mathbf{f}(s) g(s) ds = \int_{R^n} \mathbf{f}(x) \mathbf{R}_{\theta}^{\#} g(x) dx \tag{5}$$

Виконавши інтегрування по сфері $S^{n-1}$, отримаємо розв'язок зовнішньої задачі

$$\int_{S^{n-1}} \int_{R^1} \mathbf{R}\mathbf{f}(\theta, s) g(\theta, s) ds d\theta = \int_{R^n} \mathbf{f}(x) \mathbf{R}^{\#} g(x) dx \tag{6}$$

або

$$\mathbf{R}^{\#} g(x) = \int_{S^{n-1}} g(\theta, x \cdot \theta) d\theta \tag{7}$$

Це рішення визначає, що відновлення функції поза деякою кулею за її інтегралами по площинах або прямим, що не перетинає цю кулю, має єдине рішення за умови, що функція досить швидко зменшується на нескінченності.

Тоді ідентифікації або упізнання фізичного предмета за допомогою ідентифікації встановленого на цьому предметі індивідуального маркера буде зводитись до відновлення відбитого ехосигналу та визначення його відповідності одному з відомих образів, що є в базі даних.

## Розробка математичної моделі

Розробка математичної моделі акустичного контролю переміщення поодинокого фізичного об'єкту в локальному приміщенні шляхом імпульсного акустичного зондування – це вирішення задачі відновлення відбитого ехосигналу від одного або кількох відомих індивідуальних маркерів та визначення їх відповідності одному з відомих образів, що є у базі даних. Один із запропонованих варіантів вирішення цього завдання – це відновлення з використанням згортки та зворотної проекції, що у загальному вигляді описується формулою

$$W_{f_b} * \mathbf{f} = \mathbf{R}^{\#}\left(w_{f_b} * \mathbf{R}_{\mathbf{f}}\right) \tag{8}$$

або

$$W_{f_b} = \mathbf{R}^{\#} w_{f_b} \tag{9}$$

*де* $W_{f_b}$ *– Фур'є-образ функції одного з індивідуальних маркерів;*

$w_{f_b}$ *– ехосигнал, відбитий від одного з індивідуальних маркерів;*

 

$\mathbf{f}$ *– перетворення Фур'є;*
$\mathbf{R_f}$ *– перетворення Радона;*
$\mathbf{R}^{\#}$ *– дійсний до* $\mathbf{R}$ *оператор;*
$f_b$ *– найбільший зсув зондуючої частоти, обумовленої ефектом Доплера.*

Оскільки зондування виконується імпульсними сигналами, функції Фур'є-образів індивідуальних маркерів повинні апроксимувати дельта-функцію. Тоді вона описуватиметься формулою для фільтра низьких частот з граничною частотою $f_b$, тобто

$$\hat{W}_{f_b}(f) = (2\pi)^{-\frac{n}{2}} \hat{\Phi}\left(\frac{|f|}{f_b}\right) \tag{10}$$

*де* $0 \le \hat{\Phi} \le 1$ *і* $\hat{\Phi}(\sigma) = 0$ *при* $\sigma \ge 1$

Прикладом подібного фільтра низьких частот може бути ідеальний фільтр, для якого виконується умова $\hat{\Phi}(\sigma) = 1$ при $\sigma \le 1$, і справедливо *(11)*

$$W_{f_b}(x) = (2\pi)^{-\frac{n}{2}} f_b^n \frac{J_{\frac{n}{2}}\left(f_b|x|\right)}{\left(f_b|x|\right)^{\frac{n}{2}}} \tag{11}$$

*де J – функція Бесселя;*
*при* $f_b \to \infty$ $W_{f_b} \to 0$.

Вираз *(11)* визначає співвідношення між функціями Фур'є-образів та прийнятими ехосигналами, тобто

$$\hat{W}_{f_b}(f) = (2\pi)^{\frac{n-1}{2}} |f|^{t-n} \left( \hat{w}_{f_b}\left(\frac{f}{|f|}, |f|\right) + \left(-\frac{f}{|f|}, -|f|\right)\right) \tag{12}$$

Через те, що $\hat{W}_{f_b}$ – сферично-симетрична функція, першим аргументом функції можна знехтувати. Тоді для парної функції $\hat{w}_{f_b}$ отримуємо

$$\hat{w}_{f_b}(\sigma) = \frac{1}{2}(2\pi)^{\frac{1}{2}-n} |\sigma|^{n-1} \hat{\Phi}\left(\frac{|\sigma|}{f_b}\right) \tag{13}$$

З умов для ідеального фільтра випливає

$$0 \le \hat{w}_{f_b}(\sigma) \le \frac{1}{2}(2\pi)^{\frac{1}{2}-n} |\sigma|^{n-1} \tag{14}$$

Тепер для обчислення *(9)* необхідно виконати одновимірну операцію згортки, або фільтрації, $w_{f_b} * \mathbf{R_f}$ для кожного напрямку $S^{n-1}$, а потім застосувати оператор оберненого проектування $\mathbf{R}^{\#}$.

Алгоритм згортки та зворотної проекції реалізує дискретний аналог формули *(9)*.

 

Нехай

$$\mathbf{f} \in C_0^\infty\left(\Omega^n\right) \tag{15}$$

Розглянемо вибірку значень функції

$$g = \mathbf{Rf} \tag{16}$$

у точках $\left(\theta_j, s_l\right)$ $j = 1,2,\ldots,p;$ $l = -q,\ldots,q;$ де $\theta_j \in S^{n-1}$ і $s_l = hl;$ $h = \dfrac{1}{q}$.

Тепер замінимо згортку $w_{f_b} * g$ дискретною згорткою *(17)*

$$w_{f_b} \overset{h}{*} g\left(\theta_j, s\right) = h\sum_{l=-q}^{q} w_{f_b}\left(s - s_1\right) g\left(\theta_j, s_l\right) \tag{17}$$

Для обчислення зворотної проекції в *(9)* скористаємось квадратурною формулою інтегрування по $S^{n-1}$ з вузлами $\theta_1,\ldots,\theta_p$, та позитивними вагами $\alpha_{pj}$.

Нехай формула *(17)* була точною для функцій $v \in H_{2m}^{!}$ при деякому $m$, де $H_{2m}^{!}$ – безліч парних сферичних гармонік ступеня не вище $2m$, тобто справедливо

$$\int_{S^{n-1}} v(\theta) d\theta = \sum_{j=1}^{p} \alpha_{pj} v\left(\theta_j\right) \tag{18}$$

для $v \in H_{2m}^{!}$. Це дозволяє у формулі *(9)* зворотне проектування замінити дискретним, тобто

$$\mathbf{R}_p^{\#} v(x) = \sum_{j=1}^{p} \alpha_{pj} v\left(\theta_j, x \cdot \theta_j\right) \tag{19}$$

Але перш ніж записати остаточне рішення, оцінимо помилки дискретизації згортки та зворотної проекції. Відповідно до *(17)* маємо *(20)*

$$\left(w_{f_b} \overset{h}{*} g - w_{f_b} * g\right)^{\wedge}(\theta, \sigma) = (2\pi)^{\frac{1}{2}} \hat{w}_{f_b}(\sigma) \sum_{l \neq 0} \hat{g}\left(\theta, \sigma - \frac{2\pi}{h} l\right) \tag{20}$$

звідки після застосування зворотного перетворення Фур'є отримаємо *(21)*

$$\left| w_{f_b} \overset{h}{*} g - w_{f_b} * g \right| (\theta, s) \le \int_{-f_b}^{f_b} \left| \hat{w}_{f_b}(\sigma) \right| \sum_{l \neq 0} \left| \hat{g}\left(\theta, \sigma - \frac{2\pi}{h} l\right) \right| d\sigma \tag{21}$$

Застосовуючи нерівність *(14)* випливає *(22)*

$$\left| w_{f_b} \overset{h}{*} g - w_{f_b} * g \right| (\theta, s) \le \frac{1}{2} (2\pi)^{\frac{1}{2} - n} \int_{|\sigma| \ge f_b} |\sigma|^{n-1} \left| \hat{g}(\theta, \sigma) \right| d\sigma =$$

$$= \frac{1}{2} (2\pi)^{-\frac{n}{2}} \int_{|\sigma| \ge f_b} |\sigma|^{n-1} \left| \hat{\mathbf{f}}(\sigma\theta) \right| d\sigma \tag{22}$$

Тепер, застосовуючи оператор $\mathbf{R}_p^{\#}$ і враховуючи, що $\alpha_{pj} \succ 0$, і що *(18)* для $v = 1$ приймає вигляд *(23)*

$$\sum_{j=1}^{p} \alpha_{pj} = \left| S^{n-1} \right| \qquad (23)$$

отримуємо шукану оцінку помилки *(24)*

$$e_1 = \mathbf{R}_p^{\#} \left( w_{f_b} \overset{h}{*} g - w_{f_b} * g \right) \qquad (24)$$

Для розгляду помилки дискредитації оператора зворотного розсіювання розкладемо функцію $w_{f_b} * g$ в ряд по сферичним гармонікам, тобто

$$\left( w_{f_b} * g \right)(\theta, x \cdot \theta) = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{1}{c(n,l)} \sum_{k} Y_{2l,k}(\theta) v_{l,k}(x) \qquad (25)$$

*де* $v_{l,k}(x) = \int_{S^{n-1}} Y_{2l,k}(\theta) \left( w_{f_b} * g \right)(\theta, x \cdot \theta) d\theta$.

Тут індекс $k$ пробігає всі $N(n,l)$ нормованих сферичних гармонік $Y_{2l,k}$ для яких справедливо *(26)*

$$\int_{S^{n-1}} \left| Y_{2l,k}(\theta) \right|^2 d\theta = c(n,l) \qquad (26)$$

Зазначаючи, що у розкладанні відсутні сферичні гармоніки непарних ступенів (через те, що $\left( w_{f_b} * g \right)(\theta, x \cdot \theta)$ – парна функція від $\theta$), та застосовуючи формулу інтеграла Фур'є для згортки $w_{f_b} * g$, отримуємо другу шукану оцінку помилки *(27)*

$$e_2 = \left( \mathbf{R}_p^{\#} - \mathbf{R}^{\#} \right) \left( w_{f_b} * g \right) \qquad (27)$$

Тепер зробимо три ключові зауваження.

Перше. Величина $f_b$ найбільшого Доплерівського зсуву є критичним параметром згортки та зворотної проекції. Від неї залежить роздільна здатність. Якщо ефективна ширина спектра ехосигналу не перевищує $f_b$, то величина помилок дуже мала, і відновлення та ідентифікація прийнятого ехосигналу одного з Фур'є-образів, що є в базі даних, буде досить надійним.

Друге. Гранична частота $f_b$ має задовольняти двом умовам. По-перше, вона не повинна перевищувати $\frac{\pi}{h}$, щоб забезпечити коректність дискретизації згорток. По-друге, вона не повинна перевищувати $\theta \cdot m$, щоб гарантувати у функції $\left( w_{f_b} * g \right)$ високих частот, яких не можна точно проінтегрувати за допомогою квадратурної формули *(18)*.

Третє. Роздільна здатність очевидним чином зумовлена існуванням на $H_{2m}^{!}$ квадратурних формул, до яких входить $np$ вільних параметрів $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_p$, $\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_p$.

Тоді з урахуванням всього вищевикладеного, вирішення задачі відновлення ехосигналу, відбитого від індивідуального маркера, встановленого на фізичному предметі, буде визначатися видом функції $w_{f_b}$. Вигляд цієї функції у свою чергу визначається вибором фільтра у формулах *(9)* та *(13)*. Для реалізованого фільтра, що містить параметр $\varepsilon \in [0,1]$, та описаного виразом *(28)*

$$\hat{\Phi}(\sigma) = \begin{cases} 1-\varepsilon\sigma, & \sigma \le 1 \\ 0, & \sigma \succ 1 \end{cases} \tag{28}$$

Тепер застосуємо *(13)* до *(28)*. В результаті отримаємо

$$w_{f_b}(s) = \frac{1}{8\pi^2}\int_{-f_b}^{f_b} |\sigma| \left(1-\varepsilon\frac{|\sigma|}{f_b}\right) e^{is\sigma} d\sigma = \frac{1}{4\pi^2}\int_{0}^{f_b} \sigma\left(1-\varepsilon\frac{\sigma}{f_b}\right)\cos(s\sigma)d\sigma \tag{29}$$

Інтегруючи частинами отримуємо

$$w_{f_b}(s) = \frac{f_b^2}{4\pi^2}\{u(f_b s) - \varepsilon v(f_b s)\} \tag{30}$$

$$u(s) = \begin{cases} \dfrac{\cos s - 1}{s^2} + \dfrac{\sin s}{s}, & s \ne 0 \\ \dfrac{1}{2}, & s = 0 \end{cases} \tag{31}$$

$$v(s) = \begin{cases} \dfrac{2\cos s}{s^2} + \left(1 - \dfrac{2}{s^2}\right)\dfrac{\sin s}{s}, & s \ne 0 \\ \dfrac{1}{3}, & s = 0 \end{cases} \tag{32}$$

Тепер поєднуючи вирази *(30)*, *(31)* і *(32)* в одну систему *(33)*, отримаємо шукану математичну модель.

$$\left.\begin{array}{l} w_{f_b}(s) = \dfrac{f_b^2}{4\pi^2}\{u(f_b s) - \varepsilon v(f_b s)\} \\ u(s) = \begin{cases} \dfrac{\cos s - 1}{s^2} + \dfrac{\sin s}{s}, & s \ne 0 \\ \dfrac{1}{2}, & s = 0 \end{cases} \\ v(s) = \begin{cases} \dfrac{2\cos s}{s^2} + \left(1 - \dfrac{2}{s^2}\right)\dfrac{\sin s}{s}, & s \ne 0 \\ \dfrac{1}{3}, & s = 0 \end{cases} \end{array}\right\} \tag{33}$$

*е* $w_{f_b}$ *– функція відновлення ехосигналу, відбитого від індивідуального маркера, встановленого на фізичному предметі;*

$f_b$ *– найбільша частота за рахунок Доплерівського зсуву;*

$u$ *– поздовжня складова переміщення фізичного предмета;*

$v$ *– поперечна складова;*

$s = \theta_j \cdot x$ *– пряма інтегрування (або акустичний промінь, що вийшов під кутом* $\theta_j$ *і пройшов відстань* $x$.

## Висновки

Таким чином, математична модель акустичного контролю переміщення поодинокого фізичного об’єкту в локальному приміщенні шляхом імпульсного акустичного зондування є системою з трьох залежностей. Перша залежність показує, що при знаходженні в зоні стійкого прийому відбитого ехосигналу від індивідуально маркера, встановленого на фізичному предметі, його деформації, зумовлені ефектом Доплера, надійно враховуються поздовжніми та поперечними складовими його переміщення в локальному приміщенні. Друга та третя залежності дозволяють можливий ступінь частотних деформацій, викликаних поздовжнім та поперечним переміщенням фізичного предмета, як у зоні стійкого прийому ехосигналу, так і за його межами.

Впровадження розробленої моделі в проектних організаціях дозволить, з одного боку, створювати нове покоління приладів та пристроїв безпеки для об’єктів критичної інфраструктури. З іншого, модернізувати існуючі системи охорони та контролю доступу до внутрішніх приміщень об’єктів критичної інфраструктури, що експлуатуються в даний час.

**Список використаних джерел:**

[1] Ключове завдання нашої держави… *Офіційне інтернет-представництво Президента України. Промови та звернення.* (2024). https://www.president.gov.ua/news/speeches

[2] Закон України «Про критичну інфраструктуру» (Редакція від 05.12.2022р.). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text

[3] Дівізінюк М.М., Азаренко О.В., Гончаренко Ю.Ю., Дівізінюк М.М., Шевченко Р.І., Шевченко О.С. (2023). Характеристика об’єктів критичної інфраструктури держави (особливості ядерних та інших стратегічних об’єктів). *Комунальне господарство міст, том 1, випуск 175*. С.160 – 168

[4] Азаренко Е.В., Гончаренко Ю.Ю., Дивизинюк М.М., Ожиганова М.И. (2018). *Защита критической инфраструктуры государства от террористического воздействия.* Київ: ИГНС НАНУ.

[5] Дивизинюк, М.М., Азаренко, Е.В., Гончаренко, Ю.Ю., Лазаренко, С.В., Ожиганова, М.И. (2019). *Информационно-технические методы предотвращения чрезвычайных ситуаций террористического характера на объектах критической инфраструктуры. Часть 1. С использованием активных импульсных радиолокационных средств. Монографія.* Киев: ДУ ІГНС НАН України.

[6] Азаренко О.В., Гончаренко Ю.Ю, Дівізінюк М.М., Камишенцев Г.В., Лукашенко В.В. (2023). *Інформаційно-технічні методи забезпечення державної безпеки України. Частина 2. З використанням відеосистем зовнішнього спостереження. Монографія.* Київ. ДУ ІГНС НАН України

[7] Diviziniuk M., Azarenko O., Honcharenko Yu., Divizinyuk M., Shevchenko O., Shevchenko R. (2023). *Challenges and threats to critical infrastructure. Generalization of the characteristics of critical state infrastructure objects. Collective monograph*. NGO Institute for Cyberspace Research (Detroit, Michigan, USA).

[8] Закон України «Про фізичний захист ядерних установок, ядерних матеріалів, радіоактивних відходів, інших джерел іонізуючого випромінювання». (Редакція від 16.10.2022р.). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2064-14#Text

[9] Азаренко О.В., Гвоздь В.М., Гончаренко Ю.Ю., Дівізінюк М.М., Фаррахов О.В., Сівоха І.Г. (2023). Основні положення концепції максимальної безпеки ядерного об’єкту при мінімумі витрат. *Міжнародний науковий журнал «Грааль науки» № 32 (жовтень,*

 

*2023) : за матеріалами VI Міжнародної науково-практичної конференції «Globalization of scientific knowledge: international cooperation and integration of sciences», що проводилася 13 жовтня 2023 року ГО «Європейська наукова платформа» (Вінниця, Україна) та ТОВ «International Centre Corporative Management» (Відень, Австрія).* С.101–109. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.13.10.2023.018

[10] Дівізінюк, М.М., Єременко, С.А., Лєфтєров, О.А., Пруський, А.В., Стрілец, В.В., Стрілец, В.М., Шевченко, Р.І. (2022). *Теоретичні засади парадигми «цивільний захист». Монографія.* Київ: ТОВ «АЗИМУТ-ПРІНТ».

[11] Дівізінюк М.М., Азаренко О.В., Гончаренко Ю.Ю., Мирошник О.М., Поляков С.В., Фаррахов О.В. (2023). Закономірності поширення звуку в атмосфері як засоби контролю стану локальних приміщень об'єкту критичної інфраструктури. *Scientific Collection «InterConf+», 40(183): with the Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference «Modern Knowledge: Research and Discoveries» (December 19-20, 2023; Vancouver, Canada). comp. by LLC SPC «InterConf». Vancouver: A.T. International.* С.585–599. https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.12.2023.057

[12] Азаренко О.В., Гончаренко Ю.Ю., Дівізінюк М.М., Мирошник О.М., Поляков С.В., Фаррахов О.В. (2023). Швидкість звуку як параметр контролю стану повітряного середовища у локальному обсягу замкнутого приміщення об'єкту критичної інфраструктури. *Міжнародний науковий журнал «Грааль науки» № 34 (грудень, 2023): за матеріалами VI Міжнародної науково-практичної конференції «Science of post-industrial society: globalization and transformation processes», що проводилася 8 грудня 2023 року ГО «Європейська наукова платформа» (Вінниця, Україна) та ТОВ «International Centre Corporative Management» (Відень, Австрія).* С.123–129. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.08.12.2023.26

[13] Азаренко О.В., Гончаренко.Ю.Ю., Дівізінюк М.М., Мирошник О.М., Поляков С.В., Фаррахов О.В. (2023). Ефект Доплера як засіб контролю переміщення окремих фізичних предметів у локальних приміщеннях об'єкту критичної інфраструктури. *Scientific practice: modern and classical research methods: Collection of scientific papers «ΛΌГOΣ» with Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference, Boston, December 22, 2023. Boston-Vinnytsia: Primedia eLaunch & European Scientific Platform,* С.118–121. https://doi.org/10.36074/logos-22.12.2023.030

[14] Азаренко О.В., Гончаренко Ю.Ю., Дівізінюк М.М., Лобойченко В.М., Поляков С.В., Фаррахов О.В. (2024). Математична модель акустичного контролю температури в локальному приміщенні, виявлення всередині його загорань і пожеж шляхом імпульсного акустичного зондування. *Міжнародний науковий журнал «Грааль науки» № 35 (січень, 2024): за матеріалами ІІ Міжнародної науково-практичної конференції Наука в русі: класичні та сучасні засоби та методи наукових досліджень що проводилася 19.01.2024 ГО «Європейська наукова платформа» (Вінниця, Україна) та ТОВ «International Centre Corporative Management» (Відень, Австрія).* С.122–135. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.19.01.2024.020

[15] Азаренко О.В., Гончаренко Ю.Ю., Дівізінюк М.М., Мирошник О.М., Поляков С.В., Фаррахов О.В. (2024). Математична модель акустичного контролю герметичності і цілісності конструкцій локального приміщення шляхом імпульсного акустичного зондування. *Scientific Collection «InterConf+», 41(185): with the Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference «Concepts for the Development of Society's Scientific Potential» (January 19-20, 2024; Prague, Czech Republic) / comp. by LLC SPC «InterConf». Prague: Author-publishers miscellaneous.* pp.636–649. https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.01.2024.070

[16] Гельфанд И.М., Граев М.И., Виленкин Н.Я. (1962). *Интегральная геометрия и связанные с ней вопросы теории представлений.* М.: Физматгиз.