

**Дзяний Назарій Ростиславович**

доктор філософії, доцент кафедри захисту інформації

Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

ORCID: 0000-0001-9101-3701

nazarii.r.dziany@lpnu.ua

**ВПЛИВ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ВІКОННОГО СКЛА НА ЗАХИСТ ВІД ЛАЗЕРНИХ СИСТЕМ АКУСТИЧНОЇ РОЗВІДКИ**

**Анотація.** Запобігання витоку мовної інформації через оптоелектронний (лазерний) канал є одним із найбільш критичних і технічно складних завдань технічного захисту інформації в приміщеннях з обмеженим доступом. У роботі досліджено вплив захисної полімерної плівки SMC 12 та хімічного складу промислових зразків скла (Saint-Gobain Diamant 6 мм та Guardian float Guard 6 мм) на їх здатність протидіяти витоку мовної інформації через лазерні системи акустичної розвідки (ЛСАР). Проведено експериментальне дослідження хімічного складу скла методом рентгенофлуоресцентного спектрального аналізу на прецизійному аналізаторі «EXPERT 3L» та виміряно спектральні характеристики відбивання і пропускання чистих зразків скла та багатошарових плівкових структур у діапазоні довжин хвиль від 300 до 2600 нм. Встановлено, що наявність домішок магнію Mg (2,093 % мас.) у склі Guardian дещо підвищує коефіцієнт відбивання, проте суттєво збільшує коефіцієнт пропускання в інфрачервоному діапазоні (на 1 % при 660–2600 нм), роблячи його менш придатним для захисту порівняно зі склом Saint-Gobain. Виявлено контрпродуктивний ефект популярної комерційної бронеплівки SMC 12: її нанесення на скло Saint-Gobain призводить до різкого зростання коефіцієнта пропускання майже в 7 разів у робочому діапазоні ЛСАР (550–2200 нм), що кардинально полегшує дистанційне перехоплення акустичного сигналу замість його ослаблення. Запропоновано пошарову багатокомпонентну математичну модель оцінювання захищеності та обґрунтовано критерії вибору пасивних матеріалів, що дозволяє уникнути критичних помилок при проектуванні захищених приміщень.

**Ключові слова:** мовна інформація; оптоелектронний канал витоку інформації; лазерні системи акустичної розвідки; полімерні плівкові матеріали; SMC 12; хімічний склад скла; рентгенофлуоресцентний аналіз; пасивний захист інформації.

**ВСТУП**

Мовна інформація становить особливу цінність, оскільки часто містить відомості, що становлять державну чи комерційну таємницю, конфіденційні персональні дані або стратегічні управлінські рішення. Несанкціонований витік такої інформації призводить до істотних фінансових втрат, репутаційних ризиків або навіть безпосередньої загрози національній безпеці держави. У закритих приміщеннях акустична хвиля, що створюється голосом людини, поширюється в повітряному просторі та взаємодіє з огорожувальними будівельними конструкціями. Оскільки стіни, перекриття, двері і насамперед світлопрозорі віконні конструкції під дією змінного звукового тиску виконують роль акустичних мембран, вони збуджують пружні коливання в матеріалі перешкоди, формуючи комплекс технічних каналів витоку інформації: акустичних, вібраційних, електроакустичних, оптоелектронних та параметричних [1–3].

Особливо небезпечним серед них є оптоелектронний (лазерний) канал витоку інформації [2, 6, 14]. Його формування відбувається при опроміненні лазерним зондувальним променем тонких відбивних поверхонь, що коливаються в акустичному полі. Зовнішнє віконне скло під дією тиску акустичної хвилі зазнає мікрівібрацій з амплітудами нанометрового діапазону. Зондувальний лазерний промінь, спрямований на віконне скло з суміжної будівлі або спеціального транспортного засобу, при відбиванні зазнає фазової та амплітудної модуляції інформативним сигналом. Відбите модульоване оптичне випромінювання фіксується високочутливим фотоприймачем, підсилюється та демодулюється, що дає змогу зловмисникові дистанційно відновити зміст конфіденційних розмов у режимі реального часу на значних відстанях прямої видимості [2, 7, 10, 12].

**Постановка проблеми.** Існуючі архітектурні та інженерно-будівельні рішення, що застосовуються при зведенні або реконструкції адміністративних, комерційних і банківських будівель, не завжди



забезпечують регламентований рівень технічного захисту мовної інформації від лазерних систем акустичної розвідки (ЛСАР) [1, 2]. Захист від лазерного перехоплення є складною багатофакторною задачею, ефективність якої визначається фізико-хімічними характеристиками скла, його товщиною, якістю обробки поверхні та наявністю спеціальних покриттів [4, 5, 10]. На практиці для підвищення механічної міцності вікон масово застосовують ударостійкі поліестерні плівки, зокрема комерційну плівку SMC 12. Одночасно базовими матеріалами для світлопрозорих конструкцій слугують поширені марки флоат-скла, зокрема Saint-Gobain Diamant 6 мм та Guardian float Guard 6 мм. Складність проблеми полягає в тому, що ці марки скла мають різний хімічний склад і різний вміст домішок хімічних елементів (Mg, Na, S, Fe), які суттєво впливають на електронну структуру матеріалу [15]. Наразі відсутні точні емпіричні дані щодо того, як саме компонентний склад скла та нанесені захисні полімерні плівки впливають на коефіцієнти відбивання і пропускання в робочому інфрачервоному діапазоні сучасних розвідувальних лазерів (700–1800 нм). Довільне використання комерційних плівок без врахування їх оптичного впливу створює високий ризик зворотного ефекту — значного посилення витоку мовної інформації замість очікуваного захисту [8, 16].

#### **Наукова новизна та основні результати роботи:**

- вперше експериментально визначено спектральні закономірності відбивання та пропускання ударостійкої поліестерної плівки SMC 12 у діапазоні довжин хвиль від 300 до 2600 нм, які свідчать про її контрпродуктивний ефект (зростання пропускання майже у 7 разів) у робочому спектральному діапазоні лазерних систем акустичної розвідки (550–2200 нм);

- кількісно досліджено вплив хімічного складу скла та встановлено, що наявність магнію Mg (2,093 % мас.) у зразку Guardian обумовлює збільшення коефіцієнта пропускання в інфрачервоному діапазоні (660–2600 нм) на 1 %, що погіршує захисні властивості перешкоди порівняно зі склом Saint-Gobain;

- розроблено багатокомпонентну пошарову математичну модель оцінювання захищеності оптико-електронного каналу на основі системи параметричних коефіцієнтів  $K_1$ – $K_n$  та критерію мінімізації витоку  $K_{min\_лсар}$ ;

- сформовано науково обґрунтовані рекомендації щодо неприпустимості використання комерційної поліестерної плівки SMC 12 як засобу пасивного захисту світлопрозорих конструкцій від лазерних акустичних систем розвідки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблематиці захисту інформації від витоку технічними каналами присвячено значну кількість праць. У роботах [1–3] ґрунтовно викладено загальну парадигму технічного захисту, класифікацію каналів витоку та порядок створення комплексів інженерно-технічного захисту. Моделювання оптико-електронного каналу та оцінку характеристик лазерного зняття мови з урахуванням багатомодового випромінювання проведено в праці [2].

Дослідження вібраційних характеристик огорожувальних будівельних конструкцій, представлені в працях [10, 11], переконливо доводять, що понад 99 % акустичної енергії передається саме світлопрозорим склінням, а не рамами чи капітальними стінами, внаслідок чого саме скло є ключовим інформативним джерелом для лазерного перехоплення. Питання діагностики характеристик зворотного оптичного розсіювання при лазерному знятті мови та застосування квантово-каскадних лазерів проаналізовано в роботах [7, 12]. Для протидії лазерному перехопленню використовують як активні, так і пасивні методи. Активні засоби полягають у формуванні вібраційного маскувального шуму за допомогою механічних або п'єзовипромінювачів [6, 14], проте вони створюють додаткове акустичне навантаження всередині приміщення та мають високе енергоспоживання. Пасивні методи спрямовані на структурну модифікацію віконних перешкод [4, 5, 8, 9, 13, 16–18]. У дослідженні [8] проаналізовано захисну здатність сонцезахисних плівок, однак встановлено їх обмежену дію проти сучасних лазерів. Робота [9] розглядає прозорі плівки з наноцелюлозою та сполуками міді, які, проте, ефективно працюють лише у видимій та УФ-областях (до 500 нм), тоді як розвідувальні лазери охоплюють інфрачервоний діапазон 650–3000 нм. У роботах науковців Національного університету «Львівська політехніка» [4, 5, 16] досліджено нанесення діелектричних шарів на основі діоксиду гафнію  $\text{HfO}_2$ , що продемонстрували високі показники відбивання. Також досліджувалися електропровідні плівки [17], бар'єри на основі рідких кристалів [13] та вплив просторової орієнтації меблів і геометрії інтер'єру [18]. Водночас у роботі [15] доведено, що захисні властивості скла від лазерного зондування критично залежать від його внутрішнього елементного складу.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Попри значну кількість публікацій, низка важливих питань залишається нерозв'язаною: (1) відсутні системні експериментальні дані щодо поведінки комерційних ударостійких плівок (зокрема популярної SMC 12) у робочому спектрі випромінювання сучасних ЛСАР (700–1800 нм); (2) не досліджено вплив хімічних мікродомішок металів у промисловому склі різних виробників на його спектральні коефіцієнти пропускання і відбивання; (3) на практиці заходи пасивного захисту часто впроваджуються інтуїтивно, без пошарового математичного прогнозування їх оптико-електронного впливу, що призводить до критичного зниження захищеності.

**Мета статті.** Метою статті є експериментальне дослідження впливу захисної полімерної плівки SMC 12 та хімічного складу промислових зразків віконного скла (Saint-Gobain Diamant і Guardian float Guard) на їх здатність протидіяти витоку мовної інформації через оптоелектронний канал, а також формування практичних рекомендацій для фахівців з технічного захисту інформації. Для досягнення мети поставлено такі завдання: дослідити елементний хімічний склад зразків скла методом рентгенофлуоресцентного спектрального аналізу; експериментально виміряти спектральні характеристики відбивання та пропускання зразків у діапазоні довжин хвиль 300–2600 нм; розробити захисну пошарову модель багатокомпонентної структури віконної перешкоди та визначити її коефіцієнти; оцінити доцільність застосування плівки SMC 12 та сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо матеріалів для захищених об'єктів.

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У закритих приміщеннях акустична мовна інформація може бути перехоплена через огорожувальні конструкції, оскільки стіни, підлога, стеля, віконне скління та інженерні комунікації є акустичними мембранами, які трансформують коливання повітряного середовища у пружні механічні вібрації матеріалу. З будь-якого приміщення через ці перешкоди інформативний сигнал може бути знятий за допомогою віброперетворювачів, спрямованих мікрофонів або дистанційним лазерним зондуванням.

При поширенні звукової хвилі у приміщенні частинки повітря створюють змінний тиск на поверхню вікна, змушуючи його коливатися з амплітудою, пропорційною гучності мови та зворотно пропорційною масі й жорсткості скління. Скло є основним елементом перешкоди, оскільки саме воно передає до 99 % звукових коливань [10]. Оптоелектронний канал витоку є найвисокотехнологічнішим інструментом розвідки, оскільки формується при опроміненні лазерним променем відбивної поверхні скла. Відбите випромінювання зазнає амплітудно-фазової модуляції та реєструється приймальним блоком ЛСАР (рис. 1–3).



Рис. 1. Утворення акустичних каналів витоку інформації



Рис. 2. Структура акустичного каналу витоку інформації



Рис. 3. Акустооптоелектронний (лазерний акустичний) канал витоку інформації

Оптоелектронний канал витоку формується на основі трьох компонентів: джерела небезпечного сигналу (мовлення людей у приміщенні), середовища поширення та трансформації (віконне скло у ролі вібруючої мембрани) і приймача (оптико-електронні прилади ЛСАР). Запобігання витоку цим каналом традиційно спирається на методи пасивного захисту, серед яких ключове значення має вибір матеріалів скління та захисних плівкових покриттів [4, 5, 8, 9, 16]. Проте спектральні характеристики промислового скла та захисних плівок у діапазоні 650–3000 нм залишаються вирішальним фактором, оскільки відновлена амплітуда перехопленого сигналу прямо залежить від коефіцієнтів відбивання та пропускання поверхні.

Для формалізованого аналізу захищеності структуру оптико-електронного каналу запропоновано подати у вигляді багатокомпонентної пошарової моделі (рис. 4). У межах цієї моделі рівень захищеності описується системою параметричних коефіцієнтів:

**K1** – якісний коефіцієнт захисту, що визначається елементним хімічним складом скла;

**K2** – кількісний коефіцієнт захисту, зумовлений стехіометрією та масовою концентрацією елементів у склі;

**K3** – коефіцієнт захисних покриттів, обумовлений оптичними властивостями нанесених плівок;

**K4** – кутовий коефіцієнт орієнтації (кут нахилу склопакета відносно вертикальної площини);

**K5** – кутовий коефіцієнт зондування (кут падіння лазерного променя на поверхню скла);

**K6** – «сендвіч»-коефіцієнт просторового компонування захисних шарів та скляних полотен;

**K7** – коефіцієнт технічних характеристик приймально-передавального тракту ЛСАР;

**K<sub>n</sub>** – n-ий коефіцієнт впливу зовнішнього середовища та кліматичних факторів.

Математична модель описує мінімізацію ризику витоку інформації як інтегральну функцію пошарових компонентів:  $K_{\min\_лсар} = \sum K_i (i = 1...n)$ . Для практичної реалізації моделі та визначення базових коефіцієнтів K1, K2 та K3 необхідно дослідити реальні зразки промислового скла та захисних плівкових матеріалів (табл. 1).



Рис. 4. Захисна пошарова модель багатокомпонентної архітектурно-компонованої структури оптоелектронного каналу витоку інформації



Таблиця 1

## Характеристики досліджуваних зразків віконного скла та захисної полімерної плівки

| Матеріал / об'єкт дослідження | Тип і конструктивне виконання | Призначення та функціональні особливості                                            |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Saint-Gobain Diamant (6 мм)   | Екстрапрозоре флоат-скло      | Знижений вміст заліза (low-iron); застосовується в преміальній архітектурі          |
| Guardian float Guard (6 мм)   | Промислове флоат-скло         | Стандартне високоякісне поліроване скло для масового фасадного скління              |
| SMC 12 (Sun Control)          | Багат шарова захисна плівка   | Ударостійка поліестерна бронеплівка (двошаровий PET + акриловий клей з УФ-фільтром) |

## МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Методика дослідження базується на комплексному експериментальному підході до оцінювання параметрів захищеності оптоелектронного каналу витоку інформації. Вона дає змогу дослідити пошарову взаємозалежність між внутрішньою хімічною будовою скла, нанесеними полімерними покриттями та результативними оптичними властивостями віконної конструкції під впливом випромінювання ЛСАР. Експериментальна частина реалізована у три послідовні взаємопов'язані етапи.

На першому етапі сформовано набір досліджуваних зразків. Для випробувань відібрано дві найбільш поширені марки віконного скла на ринку України, що масово застосовуються в комерційному та цивільному будівництві: флоат-скло Saint-Gobain Diamant товщиною 6 мм та Guardian float Guard товщиною 6 мм. Для аналізу впливу полімерних покриттів обрано прозору захисну плівку SMC 12 (виробництва Sun Control). Конструктивно плівка SMC 12 є композитною структурою товщиною близько 300 мкм, що містить два шари високомолекулярного поліестеру (PET), зовнішній шар підвищеної твердості для захисту від абразивного зносу (anti-scratch coating) та термостійкий акриловий інсталяційний клей, модифікований хімічними УФ-поглиначами та стабілізаторами.

На другому етапі проведено прецизійний аналіз елементного хімічного складу скла. Кількісний аналіз дає змогу встановити зв'язок між електронною будовою домішок та оптичними спектральними характеристиками. Визначення елементного складу зразків виконано за допомогою рентгенофлуоресцентного спектрального аналізатора «EXPERT 3L». Зразки скла розміщувалися у вимірювальній вакуумній камері аналізатора, після чого реєструвався спектр вторинного характеристичного рентгеновського випромінювання. Масові частки елементів визначалися з похибкою не більше 0,01 % масової концентрації.

На третьому етапі виконано спектрофотометричні вимірювання коефіцієнтів дзеркального відбивання та прямого і дифузного пропускання чистого скла та скла з нанесеною плівкою SMC 12. Вимірювання здійснювалися в ультрафіолетовому, видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах довжин хвиль від 300 до 2600 нм з кроком 1 нм. Обраний спектральний інтервал повністю перекриває робочий діапазон сучасних твердотільних, волоконних і напівпровідникових лазерів ЛСАР (700–1800 нм). Дослідження проводилися за різної геометрії падіння випромінювання: з боку чистої поверхні скла та з боку нанесеної плівки SMC 12. Отримані емпіричні дані послужили основою для розрахунку параметричних коефіцієнтів K1, K2 та K3 багатокомпонентної моделі.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Аналіз структури оптоелектронного каналу показує, що віконне скло одночасно виконує роль середовища поширення та джерела інформативних вібраційних коливань. Амплітуда відбитого лазерного сигналу, що сприймається приймачем розвідки, визначається рівнем оптичного відбивання і поглинання на межах поділу середовищ. Нижче наведено результати експериментальної перевірки базових коефіцієнтів моделі.

**Аналіз коефіцієнтів K1 та K2 (вплив хімічного складу скла).** Рентгенофлуоресцентний аналіз показав, що в обох зразках скла масова частка домішок натрію, сірки та заліза перевищує 0,1 % (табл. 2, рис. 5). Скло Saint-Gobain містить Na – 2,251 %, S – 0,372 %, Fe – 0,476 %, а вміст магнію не перевищує межі виявлення (< 0,01 %). Зразок Guardian float Guard має подібну концентрацію натрію (2,378 %), сірки (0,321 %) та заліза (0,482 %), проте характеризується високим вмістом магнію Mg – 2,093 % мас.

**Вміст хімічних елементів у досліджуваних зразках віконного скла за даними аналізатора «EXPERT 3L»**

| Хімічний елемент         | Saint-Gobain Diamant (6 мм)    | Guardian float Guard (6 мм)    | Вплив на властивості скла                            |
|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------|
| Натрій (Na), % мас.      | 2,251                          | 2,378                          | Модифікатор сітки, знижує температуру плавлення      |
| Сірка (S), % мас.        | 0,372                          | 0,321                          | Освітлювач скломаси, регулює окисно-відновні процеси |
| Залізо (Fe), % мас.      | 0,476                          | 0,482                          | Визначає поглинання в ближній ІЧ-області             |
| Магній (Mg), % мас.      | < 0,01 (сліди)                 | 2,093                          | Підвищує термостійкість і коефіцієнт заломлення      |
| Базова силікатна матриця | Решта (SiO <sub>2</sub> , CaO) | Решта (SiO <sub>2</sub> , CaO) | Основний скелет силікатної сітки                     |



Рис. 5. Вміст домішок у зразках скла Saint-Gobain та Guardian

Вимірювання спектральних характеристик підтвердило суттєвий вплив магнію на оптичну поведінку скла. Скло Guardian має дещо вищий коефіцієнт відбивання (на 0,5 %) у діапазоні довжин хвиль від 900 до 2500 нм (рис. 6). Це пояснюється збільшенням показника заломлення до  $n = 1,52-1,53$  за рахунок поляризуючої здатності іонів  $Mg^{2+}$  у силікатній сітці.



Рис. 6. Коефіцієнти відбивання зразків скла в діапазоні довжин хвиль від 300 до 2600 нм

Проте дослідження коефіцієнтів пропускання виявило критичний факт: скло Guardian категорично не рекомендується для технічного захисту від ЛСАР. Його коефіцієнт пропускання на 1 % перевищує аналогічний показник скла Saint-Gobain у робочому спектрі лазерів 660–2600 нм (рис. 7). Це свідчить про вищу оптичну прозорість скла Guardian для розвідувальних лазерних променів, що спрощує формування вторинних відбиттів від предметів інтер'єру всередині приміщення та полегшує перехоплення інформації.

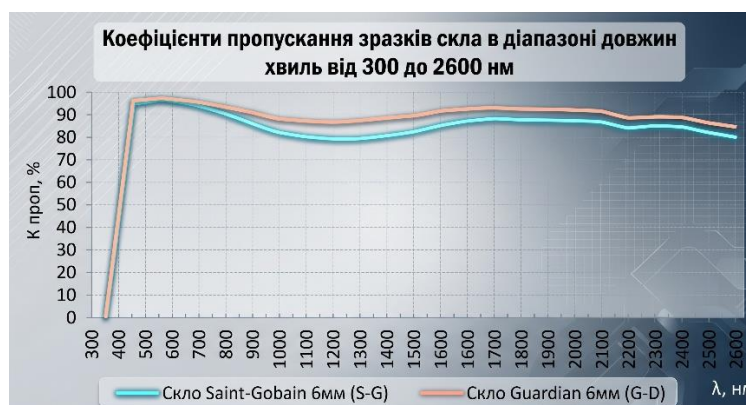


Рис. 7. Коефіцієнти пропускання зразків скла в діапазоні довжин хвиль від 300 до 2600 нм

**Аналіз коефіцієнта КЗ (вплив полімерного захисного покриття SMC 12).** Для оцінки впливу захисних покриттів проведено дослідження скла із нанесеною плівкою SMC 12 (рис. 8). Вимірювання коефіцієнта відбивання зразка Guardian з плівкою SMC 12 у діапазоні 300–1800 нм засвідчили, що полімерна плівка не покращує відбивні характеристики, а при її наклеюванні з внутрішньої сторони (з боку відбитого променя) навіть дещо знижує їх (рис. 9).



Рис. 8. Структура захисної полімерної плівки SMC 12



Рис. 9. Результати вимірювання коефіцієнта відбивання скла Guardian із плівкою SMC 12

Найбільш критичні результати зафіксовано при аналізі коефіцієнтів пропускання скла із захисною плівкою SMC 12 (рис. 10). Встановлено, що поліестерна плівка кардинально збільшує коефіцієнт пропускання в діапазоні довжин хвиль від 550 до 2200 нм. Зокрема, для скла Saint-Gobain із плівкою SMC 12 коефіцієнт пропускання зростає майже в 7 разів порівняно з чистим склом. Такий ефект зумовлений явищами оптичного узгодження показників заломлення скла та поліестеру (ефект просвітлення оптики). Оскільки більшість сучасних ЛСАР функціонує в діапазоні довжин хвиль 700–1800 нм, застосування плівки SMC 12 робить вікно практично прозорим для зондувального променя, максимізуючи витік мовної інформації (табл. 3).



Рис. 10. Коефіцієнти пропускання скла Guardian і Saint-Gobain із нанесеною захисною плівкою SMC 12

Таблиця 3

**Зведені оптичні характеристики зразків чистого скла та скління з плівкою SMC 12 у робочому діапазоні ЛСАР**

| Досліджуваний зразок         | Діапазон довжин хвиль, нм | Характер зміни оптичних параметрів                   | Оцінка захисної придатності              |
|------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Saint-Gobain Diamant (чисте) | 700–1800                  | Базове відбивання, низьке паразитне пропускання в ІЧ | Задовільна (базова основа)               |
| Guardian float Guard (чисте) | 660–2600                  | Пропускання вище на 1 %, відбивання вище на 0,5 %    | Низька (підвищене пропускання через Mg)  |
| Guardian + SMC 12            | 300–1800                  | Зниження відбивання при внутрішній поклейці          | Незадовільна (збільшення вразливості)    |
| Saint-Gobain + SMC 12        | 550–2200                  | Зростання коефіцієнта пропускання майже в 7 разів    | Критично непридатна (антизахисний ефект) |

Отримані результати підтверджують нелінійний характер захищеності за запропонованою моделлю. Формальне збільшення кількості захисних шарів шляхом наклеювання комерційної бронеплівки SMC 12 не призводить до мінімізації цільового критерію  $K_{min\_лсар}$ , а навпаки спричиняє його різке погіршення. Це доводить неприпустимість механічного переносу вимог щодо фізичного захисту скла від злому на завдання оптико-електронного захисту інформації.

## ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У результаті проведеного дослідження експериментально перевірено та теоретично обґрунтовано поширену модель багатокомпонентної структури оптико-електронного каналу витоку інформації. Встановлено, що захищеність приміщень від лазерних систем акустичної розвідки не є лінійною функцією, а визначається тонкою взаємодією між елементним хімічним складом скла та оптичними характеристиками нанесених плівкових покриттів. Основні висновки дослідження такі:

1. Хімічний склад скла безпосередньо впливає на його спектральні оптичні характеристики (коефіцієнти  $K_1$ ,  $K_2$ ). Встановлено, що наявність магнію Mg (2,093 % мас.) у склі Guardian хоч і підвищує



коефіцієнт відбивання на 0,5 % у діапазоні 900–2500 нм, проте спричиняє збільшення коефіцієнта пропускання на 1 % у діапазоні 660–2600 нм, роблячи його менш придатним для захисту порівняно зі склом Saint-Gobain.

2. Застосування комерційних поліестерних бронеплівки (SMC 12) дає різко негативний (зворотний) ефект при захисті від ЛСАР. Встановлено, що плівка SMC 12 діє як оптичне просвітлююче покриття, зменшуючи відбивання та збільшуючи коефіцієнт пропускання скла Saint-Gobain майже в 7 разів у діапазоні довжин хвиль від 550 до 2200 нм.

3. Враховуючи, що сучасні лазерні системи акустичної розвідки функціонують у робочому діапазоні 700–1800 нм, нанесення плівки SMC 12 нівелює природний захисний бар'єр скла та створює сприятливі умови для дистанційного перехоплення мовної інформації.

4. Концепція мінімізації витоку  $K_{min\_лсар}$  розробленої математичної моделі підтверджує, що довільне нашарування матеріалів без урахування їх спектральної дисперсії може підвищувати рівень інформаційної загрози. Плівка SMC 12 категорично не рекомендована для захисту приміщень від лазерних систем розвідки.

Перспективи подальших досліджень полягають у вивченні спектральних характеристик багатокамерних склопакетів із вакуумними прошарками, експериментальній перевірці діелектричних нанопокриттів на основі оксидів тугоплавких металів (зокрема  $HfO_2$ ), дослідженні кутових параметрів  $K_4$  та  $K_5$ , а також у створенні комбінованих адаптивних комплексів пасивно-активного захисту виділених приміщень.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Іванченко, С. О., Гавриленко, О. В., Липський, О. А., & Шевцов, А. С. (2016). *Технічні канали витоку інформації. Порядок створення комплексів технічного захисту інформації: Навчальний посібник*. ІСЗІ НТУУ «КПІ».
2. Горбенко, І., & Ковальчук, Ю. (2008). Оцінка характеристик лазерного каналу витоку мовної інформації з урахуванням багатомодового випромінювання лазера. *Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні*, (2), 83–88.
3. Громико, І. О. (2006). Загальна парадигма захисту інформації: Визначення термінів від носіїв до каналів витоку інформації. *Системи обробки інформації*, (9(58)), 3–9.
4. Дудикевич, В. Б., Собчук, І. С., Ракобовчук, В. О., & Лич, С. В. (2015). Дослідження властивостей плівок на основі діоксиду гафнію для захисту інформації від лазерного зондування. У *Захист інформації і безпека інформаційних систем: Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції* (с. 185–186).
5. Дудикевич, В. Б., Ракобовчук, В. О., Гаранюк, П. І., & Дей, В. А. (2014). Вплив діелектричного покриття на захисні властивості скла від витоку інформації через оптико-електронний канал. У *Проблеми створення, розвитку та застосування високотехнічних систем спеціального призначення: Тези доповідей 20 Всеукраїнської науково-практичної конференції* (с. 196–197).
6. Катаєв, В., & Яремчук, Ю. (2019). Метод активного захисту інформації від зняття лазерними системами акустичної розвідки. *Захист інформації*, 21(1), 34–39. <https://doi.org/10.18372/2410-7840.21.13545>
7. Abramov, P. I., Kuznetsov, E. V., & Skvortsov, L. A. (2017). Prospects of using quantum-cascade lasers in optoelectronic countermeasure systems: Review. *Journal of Optical Technology*, 84(5), 331–341.
8. Horev, A., & Savin, A. (2021). Efficiency research of sun protection window films for speech information protection from leakage by optoelectronic channel. In *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering* (pp. 2335–2339). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396253>
9. Klochko, N. P., Barbash, V. A., Klepikova, K. S., Kopach, V. R., Tyukhov, I. I., Yashchenko, O. V., Zhadan, D. O., Petrushenko, S. I., Dukarov, S. V., Sukhov, V. M., & Khrypunova, A. L. (2021). Biodegradable flexible transparent films with copper iodide and biomass-derived nanocellulose for ultraviolet and high-energy visible light protection. *Solar Energy*, 220, 852–863. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.04.014>
10. Zeng, U., Pan, B., Cao, Y., & Ai, H. (2021). Test and analysis of window vibration for anti-laser-eavesdropping. *Applied Acoustics*, 176, Article 107871. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107871>
11. Kradolfer, S., Heutschi, K., Koch, J., & Gunther, D. (2021). Listening with curiosity—Tracking the acoustic response of portable laser ablation. *Chimia*, 75(4), 300–304. <https://doi.org/10.2533/Chimia.2021.300>
12. Li, L., Zeng, H., Zhang, Y., Kong, Q., Zhou, Y., & Liu, Y. (2014). Analysis of backscattering characteristics of objects for remote laser voice acquisition. *Applied Optics*, 53(5), 971–978.



13. Zhang, W., Zhang, L., Liang, X., et al. (2017). Unconventional high-performance laser protection system based on dichroic dye-doped cholesteric liquid crystals. *Scientific Reports*, 7, Article 42955. <https://doi.org/10.1038/srep42955>
14. Катаєв, В., & Яремчук, Ю. (2019). Дослідження та оптимізація алгоритмів формування маскувальних акустичних завад. *Захист інформації*, 21(2), 98–104. <https://doi.org/10.18372/2410-7840.21.13545>
15. Działy, N., Dudykevych, V., Oprisky, I., Rakobovcuk, L., & Haraniuk, P. (2022). Investigation of the protective capabilities of glass from laser sounding depending on its elemental composition. *Eureka: Physics and Engineering*, (5), 162–174. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002527>
16. Ракобовчук, Л., Дзяний, Н., & Антоневич, М. (2023). Захисні характеристики плівок від лазерних систем акустичної розвідки на прикладі одношарового відбиваючого покриття діоксиду гафнію. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*, 29(1), 32–40. <https://doi.org/10.18372/2225-5036.29.17550>
17. Дзяний, Н. Р. (2019). Електропровідна плівка на вікна для захисту інформації від витоку оптоелектронним каналом. У *Актуальні питання забезпечення кібербезпеки та захисту інформації: Тези доповідей учасників IV Міжнародної науково-практичної конференції* (с. 54–59). Видавництво Європейського університету.
18. Пархуць, Л. Т., Совин, Я. Р., & Ракобовчук, Л. М. (2024). Вплив інтер'єру приміщення на протидію лазерним системам акустичної розвідки. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*, 3(23), 246–257.

**Dzianyi Nazarii**

Doctor of Philosophy, Associate Professor of the Department of Information Protection

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

ORCID: 0000-0001-9101-3701

nazarii.r.dzianyi@lpnu.ua

**INFLUENCE OF POLYMER FILM MATERIALS AND CHEMICAL COMPOSITION OF WINDOW GLASS ON PROTECTION AGAINST LASER ACOUSTIC RECONNAISSANCE SYSTEMS**

**Abstract.** Preventing speech information leakage through optoelectronic (laser) channels is a critical problem of technical information protection in high-security facilities. This study investigates the influence of SMC 12 protective polymer film and the chemical composition of window glass samples (Saint-Gobain Diamant 6 mm and Guardian float Guard 6 mm) on their ability to counteract speech information interception via laser acoustic reconnaissance systems (LARS). An experimental investigation of the elemental composition of the glass was conducted using the precision X-ray fluorescence analyzer EXPERT 3L, and the spectral transmission and reflection characteristics of both bare glass and polymer film structures were measured across the 300–2600 nm wavelength range. It is established that the presence of magnesium Mg (2.093% wt.) in Guardian glass slightly increases the reflection coefficient but substantially increases light transmission (by 1% at 660–2600 nm), making it less suitable for passive protection compared to Saint-Gobain glass. Crucially, the application of the widespread commercial protective polyester film SMC 12 increases the transmission coefficient of Saint-Gobain glass by almost seven times within the operational range of eavesdropping lasers (550–2200 nm), facilitating the remote interception of speech information instead of mitigating it. A multilayer multicomponent model is proposed to evaluate acoustic security, and practical guidelines are established to help security engineers avoid critical design vulnerabilities when selecting passive defense materials.

**Keywords:** speech information; optoelectronic information leakage channel; laser acoustic reconnaissance systems; polymer film materials; SMC 12; glass chemical composition; X-ray fluorescence analysis; passive information protection.

**REFERENCES**

1. Ivanchenko, S. O., Havrylenko, O. V., Lypskyi, O. A., & Shevtsov, A. S. (2016). *Tekhnichni kanaly vytoku informatsii. Poriadok stvorennia kompleksiv tekhnichnoho zakhystu informatsii: Navchalnyi posibnyk* [Technical channels of information leakage. The procedure for creating complexes of technical information protection: Tutorial]. ISZZI NTUU «KPI».
2. Horbenko, I., & Kovalchuk, Y. (2008). Otsinka kharakterystyk lazernoho kanalu vytoku movnoi informatsii z urakhuvanniam bahatomodovoho vyprominiuvannia lazera [Evaluation of the characteristics of the laser channel of speech information leakage taking into account multimode laser radiation]. *Pravove, normatyvne ta metrolohichne zabezpechennia systemy zakhystu informatsii v Ukraini*, (2), 83–88.
3. Hromyko, I. O. (2006). Zahalna paradyhma zakhystu informatsii: Vyznachennia terminiv vid nosiiv do kanaliv vytoku informatsii [General paradigm of information security: Definition of terms from media to information leakage channels]. *Systemy obrobky informatsii*, 9(58), 3–9.
4. Dudykevych, V. B., Sobchuk, I. S., Rakobovchuk, V. O., & Lych, S. V. (2015). Doslidzhennia vlastyvostei plivok na osnovi dioksydu hafniiu dlia zakhystu informatsii vid lazernoho zonduvannia [Investigation of the properties of hafnium dioxide-based films for information protection against laser sounding]. In *Zakhyst informatsii i bezpeka informatsiinykh system: Materialy IV mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii* (pp. 185–186).
5. Dudykevych, V. B., Rakobovchuk, V. O., Haraniuk, P. I., & Dei, V. A. (2014). Vplyv dielektrychnoho pokryttia na zakhysni vlastyvosti skla vid vytoku informatsii cherez optyko-elektronnyi kanal [The effect of dielectric coating on the protective properties of glass against information leakage through the optoelectronic channel]. In *Problemy stvorennia, rozvytku ta zastosuvannia vysokotekhnichnykh system spetsialnoho pryznachennia: Tezy dopovidei 20 Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii* (pp. 196–197).
6. Kataiev, V., & Yaremchuk, Y. (2019). Metod aktyvnoho zakhystu informatsii vid zniattia lazernymy systemamy akustychnoi rozvidky [Method of active information protection against interception by laser



- acoustic reconnaissance systems]. *Zakhyst informatsii*, 21(1), 34–39. <https://doi.org/10.18372/2410-7840.21.13545>
7. Abramov, P. I., Kuznetsov, E. V., & Skvortsov, L. A. (2017). Prospects of using quantum-cascade lasers in optoelectronic countermeasure systems: Review. *Journal of Optical Technology*, 84(5), 331–341.
  8. Horev, A., & Savin, A. (2021). Efficiency research of sun protection window films for speech information protection from leakage by optoelectronic channel. In *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering* (pp. 2335–2339). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396253>
  9. Klochko, N. P., Barbash, V. A., Klepikova, K. S., Kopach, V. R., Tyukhov, I. I., Yashchenko, O. V., Zhadan, D. O., Petrushenko, S. I., Dukarov, S. V., Sukhov, V. M., & Khrypunova, A. L. (2021). Biodegradable flexible transparent films with copper iodide and biomass-derived nanocellulose for ultraviolet and high-energy visible light protection. *Solar Energy*, 220, 852–863. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.04.014>
  10. Zeng, U., Pan, B., Cao, Y., & Ai, H. (2021). Test and analysis of window vibration for anti-laser-eavesdropping. *Applied Acoustics*, 176, Article 107871. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107871>
  11. Kradolfer, S., Heutschi, K., Koch, J., & Gunther, D. (2021). Listening with curiosity—Tracking the acoustic response of portable laser ablation. *Chimia*, 75(4), 300–304. <https://doi.org/10.2533/Chimia.2021.300>
  12. Li, L., Zeng, H., Zhang, Y., Kong, Q., Zhou, Y., & Liu, Y. (2014). Analysis of backscattering characteristics of objects for remote laser voice acquisition. *Applied Optics*, 53(5), 971–978.
  13. Zhang, W., Zhang, L., Liang, X., et al. (2017). Unconventional high-performance laser protection system based on dichroic dye-doped cholesteric liquid crystals. *Scientific Reports*, 7, Article 42955. <https://doi.org/10.1038/srep42955>
  14. Kataiev, V., & Yaremchuk, Y. (2019). Doslidzhennia ta optymizatsiia alhorytmiv formuvannia maskovalnykh akustychnykh zavod [Research and optimization of masking acoustic noise generation algorithms]. *Zakhyst informatsii*, 21(2), 98–104.
  15. Dzianyi, N., Dudykevych, V., Opirskyy, I., Rakobovchuk, L., & Haraniuk, P. (2022). Investigation of the protective capabilities of glass from laser sounding depending on its elemental composition. *Eureka: Physics and Engineering*, (5), 162–174. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002527>
  16. Rakobovchuk, L., Dzianyi, N., & Antonevych, M. (2023). Zakhysni kharakterystyky plivok vid lazernykh system akustychnoi rozvidky na prykladi odnosharovoho vidbyvaiuchoho pokryttia dioksydu hafniiu [Protective characteristics of films against laser acoustic reconnaissance systems using a single-layer reflective hafnium dioxide coating as an example]. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*, 29(1), 32–40. <https://doi.org/10.18372/2225-5036.29.17550>
  17. Dzianyi, N. R. (2019). Elektroprovodna plivka na vikna dlia zakhystu informatsii vid vytoku optoelektronnym kanalom [Electrically conductive window film for protecting information against leakage through an optoelectronic channel]. In *Aktualni pytannia zabezpechennia kiberbezpeky ta zakhystu informatsii: Tezy dopovidei uchasnykiv IV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* (pp. 54–59). Vydavnytstvo Yevropeiskoho universytetu.
  18. Parkhuts, L. T., Sovyn, Y. R., & Rakobovchuk, L. M. (2024). Vplyv interieru prymishchennia na protydiu lazernym systemam akustychnoi rozvidky [The influence of room interior on countering laser acoustic reconnaissance systems]. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika*, 3(23), 246–257.

Отримано редакцією журналу / Received: 21.08.26

Прорецензовано / Revised: 30.08.26

Схвалено до друку / Accepted: 26.10.26



This work is licensed under Creative Commons Attribution-noncommercial-sharealike 4.0 International License.