



Збірник матеріалів
науково-навчального онлайн-семінару для студентів

***Сила матеріалу. Фізика на
службі оборони***

(03 квітня 2025)

Київ 2025

Збірник матеріалів науково-навчального онлайн-семінару для студентів «Сила матеріалу. Фізика на службі оборони», 3 квітня 2025 р., Київ: – ТЦ НАН України, 2025. – 40 с.

Збірник містить науково-навчальні праці матеріалів доповідей науково-навчального онлайн-семінару для студентів «Сила матеріалу. Фізика на службі оборони» працівників академічних установ (Технічний центр, Інститут Газу), Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України та викладачів Полтавського національного педагогічного університету імені В.Г. Короленка. Зміст матеріалів спрямовано на значимість досягнень наукових досліджень у галузі фізичного матеріалознавства на підвищення обороноздатності України в умовах воєнного стану.

Всю повноту відповідальності за зміст наданих матеріалів і сам факт їх публікації несуть автори.

The Power of Material. Physics in the Service of Defense. Proceedings of the Scientific and Educational Online Seminar for Students. (2025) Ukraine, Kyiv: TC NASU, 40 p.

The collection contains scientific and educational works of materials of reports of the scientific and educational online seminar for students "The Power of Materials. Physics in the Service of Defense" by employees of academic institutions (Technical Center, Gas Institute), the Central Research Institute of Armaments and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine and teachers of the Poltava National Pedagogical University named after V.G. Korolenko. The content of the materials is aimed at the significance of scientific research achievements in the field of physical materials science for increasing the defense capability of Ukraine under martial law.

The authors bear full responsibility for the content of the materials provided and the fact of their publication.

Організатори семінару:

Технічний центр НАН України,
Полтавський національний педагогічний університет імені В.Г. Короленка

Співголови оргкомітету:

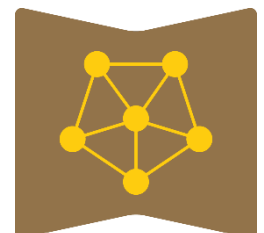
Світлана Сперкач, к.ф.-м.н., директор ТЦ НАН України (м. Київ)
Марина Гриньова, професор, ректорка ПНПУ імені В. Г. Короленка (м. Полтава)

Вчений секретар:

Максим Барабаш, д.т.н., завідувач Відділу діагностики мезоскопічних систем ТЦ НАН України (м. Київ)

Члени оргкомітету:

Валерій Кременицький, к.ф.-м.н., завідувач Відділу електронно-зондових досліджень багатофункціональних матеріалів ТЦ НАН України (м. Київ)
Володимир Трачевський, к.х.н. завідувач Лабораторії синтезу наносистем та наноматеріалів ТЦ НАН України (м. Київ)
Тетяна Барболіна, д.ф.-м.н., декан факультету комп'ютерних наук, математики, фізики та економіки. доктор фізико-математичних наук ПНПУ імені В. Г. Короленка (м. Полтава)
Олег Сасенко, к.ф.-м.н., завідувач кафедри загальної фізики і математики (м. Полтава)



ЗМІСТ

ДО УЧАСНИКІВ НАУКОВО-НАВЧАЛЬНОГО ОНЛАЙН-СЕМІНАРУ ДЛЯ СТУДЕНТІВ «СИЛА МАТЕРІАЛУ. ФІЗИКА НА СЛУЖБІ ОБОРОНИ»	5
ЗБРОЯ НА ОСНОВІ НОВИХ ФІЗИЧНИХ ПРИНЦИПІВ	6
ФІЗИКА ДЛЯ ЗАХИСТУ: З МІКРОСВІТУ — ДО ОБОРОНИ	21
ОДЕРЖАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОМАТЕРІАЛІВ ПІД ЧАС КОНВЕРСІЇ ВУГЛЕВОДНІВ У ГАЗИ-РЕАГЕНТИ	28
ВИКОРИСТАННЯ ЕПР-ДІАГНОСТИКИ В УМОВАХ ВІЙНИ	33
УЯВНИЙ МОЛЯРНИЙ КОЕФІЦІЄНТ СТИСКАННЯ ТА НАДЛИШКОВА АДІАБАТИЧНА СТИСЛИВІСТЬ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ АДОНІТУ	35

**ДО УЧАСНИКІВ НАУКОВО-НАВЧАЛЬНОГО ОНЛАЙН-СЕМІНАРУ ДЛЯ
СТУДЕНТІВ «СИЛА МАТЕРІАЛУ. ФІЗИКА НА СЛУЖБІ ОБОРОНИ»****Шановні колеги та студенти!**

Від імені Організаційного комітету науково-навчального онлайн-семінару для студентів «Сила матеріалу. Фізика на службі оборони» дякуємо доповідачам Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Технічного центру та Інституту газу НАН України, Полтавського національного педагогічного університету імені В.Г. Короленка, а також студентам та викладачам за участь у спільному заході.

Результати представлених на семінарі досліджень можуть бути основою для генерації нових наукових ідей, які здатні сприяти розвитку науково-технічного прогресу і безпеки України. Сподіваємо, що даний семінар став майданчиком для обміну ідеями, пошуку нових рішень, укріплення співпраці між науковими та освітніми установами.

Окремо хотілось би звернутись до студентів Полтавського національного педагогічного університету імені В. Г. Короленка. Ви, майбутні педагоги науковці, інженери, аналітики зможете продовжити справу становлення нашої країни зробити її сильнішою та масштабнішою, втілити архітектурні шедеври на місцях руїн, створити нові технології що працюють поруч зі штучним інтелектом не заради війни, а заради розвитку освіти, медицини і безпеки. Саме ви перетворите Україну на сильну сучасну і мирну Державу, прекрасну у всіх сенсах цього слова. Ми віримо в це і віримо у вас.

Усім бажаємо натхнення, плідної співпраці в освітньому процесі, нових наукових звершень і ефективного відновлення країни!

Організаційний комітет семінару

Ігор Одноралов

*Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки
Збройних Сил України, Київ, Україна, Технічний центр НАН України Київ, Україна
ivo1959@ukr.net*

ЗБРОЯ НА ОСНОВІ НОВИХ ФІЗИЧНИХ ПРИНЦИПІВ

Останнім часом у багатьох на слуху вираз «зброя на нових фізичних принципах». Цей термін вже використовують у своїх промовах навіть перші особи держав. Втім, якщо бути точним, то мова йде про нове озброєння на основі відомих фізичних процесів та явищ, що раніше не застосовувалися у звичайній зброї — конвенційній або у зброї масового ураження.

Таким чином, поняття зброя НФП є досить умовним. Набагато точнішим тут буде термін «нетрадиційна зброя». Отже, які ж виділяються види цієї хвилюючої розум «зброї майбутнього»? У різних джерелах даються досить різні визначення окремих видів цієї нетрадиційної зброї, які в решті решт не сильно впливають на розуміння суті питання. У військово-політичному словнику «Війна і мир» сказано: «...На початку ХХІ століття до такого виду зброї належать лазерна, прискорювальна, надвисокочастотна, інфразвукова, геофізична, кіберзброя та інше. За своїми вражаючими властивостями ця зброя (принаймні деякі з її типів) повинна бути віднесена до зброї масового ураження. Його застосування може призвести до нового революційного та небезпечного стрибка у військовій справі». На мій погляд більш структуровано нетрадиційну зброю доцільно представити наступними групами:

1. Радіочастотна зброя (надвисокочастотна та інфразвукова);
2. Геофізична зброя (атмосферна, літосферна, гідросферна, біосферна, озонна, кліматична);
3. Зброя спрямованої енергії (лазерна, прискорювальна);
4. Зброя нескорятельної дії (акустична, світлова, малопотужна спрямованої дії та ін.);
5. Кінетична зброя;
6. Генетична зброя;
7. Кіберзброя.

Зазначу, що сьогодні, через ліміт часу, ми більш-менш предметно поговоримо лише про деякі з них, а повний перелік може бути деталізований і розширений вже за Вашої

участі у якості розробників.

1. Радіочастотна зброя

Базою для її створення стали дослідження щодо вивчення біологічної дії електромагнітних випромінювань. Головне місце у дослідженнях відводиться впливу на людей **електромагнітного випромінювання** в діапазоні радіочастот від вкрай низьких ($f = 3\text{-}30\text{ Гц}$) до надвисоких ($f = 3\text{-}30\text{ ГГц}$).

1.1. Радіочастотна зброя в діапазоні надвисоких частот($f = 3\text{-}30\text{ ГГц}$).

Цю зброю іноді називають мікрохвильовою або НВЧ – зброєю.

В даний час встановлено, що при дії на центральну нервову систему, найбільший біологічний ефект викликають випромінювання, які за своїми параметрами відповідають електромагнітним полям мозку. Відповідно досліджується можливість розробки засобів пригнічення та стимулювання їх активності.

У результаті проведених експериментів визначено, що при одноразовому впливі на людину випромінювань в діапазоні радіочастот:

30 до 30000 МГц (метрові та дециметрові хвилі) при інтенсивності понад **10 МВт/см²** відзначаються: головний біль, слабкість, пригнічений стан, підвищена дратівливість, почуття страху, порушення здатності приймати рішення, погіршення пам'яті.

0,3-3 ГГц (дециметрові хвилі) при інтенсивності до **2 МВт/см²** викликає відчуття свисту, дзижчання, гудіння, клацання, що зникають при відповідному екрануванні.

Встановлено також, що потужні електромагнітні випромінювання можуть викликати сильні опіки, засліплення.

Перспективні магнетрони та клістри потужністю до 1 ГВт з використанням антен з фазованими решітками дозволять порушувати функціонування аеродромів, стартових позицій ракет, центрів та пунктів управління.

Поряд із цим ведеться пошук вибухових генераторів одноразової дії та створення на їх основі бомб (головних частин ракет), що вражають військову електроніку на відстанях у десятки кілометрів, що може зробити цю зброю дуже ефективною.

Принцип дії НВЧ-боєприпасів ґрунтується на створенні потужного, у тому числі вузькоспрямованого, електромагнітного імпульсу за механізмом впливу подібного імпульсу ядерного вибуху. Цей вид зброї передбачається використовувати для таких цілей:

- постановки надпотужних активних перешкод системам управління військами та зброєю;
- виведення з ладу електроенергетичних та електротехнічних систем ОБТ;

- дистанційної нейтралізації саморобних вибухових пристроїв та підриву боєприпасів;
- нелетального впливу на особовий склад (больовий шок, втрата свідомості тощо).

Довідково:

ВПС США нині мають на озброєнні дві НВЧ-системи бойового призначення. Перша система- ADS (Active Denial System) фірми "Рейтеон" призначена для тимчасового виведення з ладу живої сили противника на **відстані близько 500 м** при частоті 95 ГГц і сформованій апертурі променя 2,0 м. Випробування показали, що больовий поріг досягається протягом 3с. опромінення, а після 5с. біль стає нестерпним.

У 2010 році установку на деякий час було перекинуто до Афганістану.

Крім ADS фірма "Рейтеон" розробила та створила щонайменше ще один зразок системи "Сайлент Гардіан", яка має менші, ніж ADS, потужність та габарити.

Для захисту літаків від ракет, що запускаються терористами з ПЗРК, в районі розташування цивільних аеродромів фірмою "Рейтеон" розроблено НВЧ-систему "Віджилант Ігл", оснащену розподіленою мережею інфрачервоних датчиків. Крім того, до її складу входять потужні імпульсні генератори, побудовані за модульною схемою, та активна антена з двох фазованих решіток з електронним керуванням вузьконаправленим променем.

Коли датчики фіксують зенітну ракету, що стартує, приводиться в дію НВЧ-установка, яка генерує в напрямку ракети НВЧ-імпульс, що виводить з ладу систему управління ракетою. Радіус дії систем виявлення цілі та її ураження невеликий проте згідно із заявами представників "Рейтеон", проведені польові випробування підтвердили ефективність системи "Віджилант Ігл" як засобу протидії ПЗРК.

Фахівці цієї компанії цікавляться також оснащенням ракет типів "земля-повітря", "повітря - земля" і "повітря - повітря" бойовими частинами з потужними НВЧ-випромінювачами. Якщо спочатку це будуть випромінювачі одноразового впливу, то згодом вони, можливо, зможуть формувати серію імпульсів.

У 2009 році ВПС США уклали з фірмою "Боїнг" контракт, який передбачав розробку протягом трьох років у рамках проекту CHAMP (Counter-Electronic High Power Microwave Advanced Missile Project) демонстраційного зразка нелетальної НВЧ-зброї, що розміщується на борту крилатої ракети або іншій повітряній платформі. Воно призначене для придушення електронних пристроїв противника без пошкодження корпусу або іншим силовим структурам технічних або бойових засобів противника.

Під час випробувань експериментальна КР здійснила підліт до комплексної цілі з семи будівель (політ тривав близько 1 год) і потужним електромагнітним імпульсом

вивела з ладу комп'ютери, що знаходилися в них, при мінімальному їх фізичному пошкодженні, а потім повернулася в заздалегідь вказане місце і приземлилася.

Особливе місце серед НВЧ-систем займає НВЧ-боєприпас, вплив якого на радіоелектронну апаратуру противника здійснюється потужним електромагнітним випромінюванням, яке генерується в результаті вибуху. Його пікова потужність становила 35 МВт при тривалості імпульсів 100-150 нс. над діапазоні 2-6 ГГц. В основу НВЧ-боєприпасу покладено способи перетворення кінетичної енергії вибуху, та електричної енергії постійного струму в енергію електромагнітного поля високої потужності.

ВМС США мають на озброєнні експериментальні ракети, неядерні головні частини яких оснащені вибухомагнітними генераторами НВЧ-випромінювання. Частину таких ракет флот використав на початковому етапі війни у 1991 році в Перській затоці для придушення/ураження електронних систем та засобів ЗС Іраку.

1.2. Інфразвукова зброя ($f = 3\text{-}30$ Гц)

Інфразвукова зброя - один із видів ОНФП, заснованого на використанні спрямованого випромінювання потужних інфразвукових коливань.

Практичний інтерес становлять коливання із частотою від десятих і навіть сотих часток до одиниць герц. Для інфразвуку характерне мале поглинання різних середовищах, внаслідок чого інфразвукові хвилі в повітрі, у воді та в земній корі можуть поширюватися на великі відстані, проникати крізь бетонні та металеві перепони.

За даними досліджень, інфразвукові коливання можуть впливати на центральну нервову систему та травні органи, викликаючи параліч, блювоту і спазми, призводити до загального нездужання та больових відчуттів, а при вищих рівнях на частотах в одиниці герц - до запаморочення, нудоти, втрати свідомості, інколи ж до сліпоті і навіть смерті.

Інфразвукова зброя може також викликати у людей панічний стан, втрату контролю над собою та непереборне бажання сховатися від джерела поразки.

Певні частоти можуть впливати на середнє вухо, викликаючи вібрації, які в свою чергу, стають причиною відчуттів схожі на ті, які бувають при захитуванні, морській хворобі.

Перетворення електричної енергії на звукову низької частоти відбувається за допомогою п'єзоелектричних кристалів, форма яких змінюється під впливом електричного струму.

2. Геофізична зброя

Під геофізичною зброєю розуміється зброя, вражаюча дія якої ґрунтується на

використанні у військових цілях природних явищ та процесів, що викликаються штучним шляхом. Залежно від середовища, в якому відбуваються ці процеси, воно поділяється на атмосферне, літосферне, гідросферне, біосферне та озонне. Засоби, за допомогою яких стимулюються геофізичні фактори, можуть бути різними, але енергія, що витрачається цими засобами, завжди значно менша за енергію, що виділяється в результаті викликаного геофізичного процесу.

2.1. Атмосферна (погодна) зброя

Найбільш досліджений на сьогодні вид геофізичної зброї. Її вражаючими чинниками є різноманітні атмосферні процеси та пов'язані з ними погодні та кліматичні прояви, від яких може залежати життя, як в окремих регіонах, так і на всій планеті.

На сьогодні встановлено, що багато активних реагентів, наприклад, йодисте срібло, тверда вуглекислота та інші речовини, розсіяні в хмарах, здатні викликати зливи на великих площах.

З іншого боку, такі реагенти, як пропан, вуглекислота, йодистий свинець забезпечують розсіювання туманів.

Розпилення цих речовин може здійснюватися за допомогою наземних генераторів та бортових пристроїв, що встановлюються на літаках та ракетах.

У районах, де вологовміст повітря велике, зазначеним вище методом можна викликати зливи і тим самим змінювати водний режим річок, озер, боліт, значно погіршити прохідність доріг і місцевості, а в низовинах викликати повені.

З іншого боку, якщо забезпечити штучне випадання опадів на підступах до районів з великим дефіцитом вологи, можна добитися видалення значної кількості останньої з атмосфери та викликати у цих районах посуху.

2.2. Літосферна зброя

Принцип дії заснований на використанні енергії літосфери, тобто зовнішньої сфери "твердої" Землі, що включає земну кору і верхній шар мантії. При цьому вражаюча дія проявляється у таких катастрофічних явищ, як землетрус, виверження вулканів, переміщення геологічних утворень. Джерелом енергії, що при цьому виділяється, є напруженість у тектонічно небезпечних зонах.

Проведення дослідів показало, що в сейсмонебезпечних районах Землі за допомогою наземних або підземних ядерних вибухів малої потужності, або електричної генерації низкочастотних коливань у напружених шарах поверхні землі можна ініціювати землетруси.

2.3. Гідросферна зброя

Принцип дії заснований на використанні у військових цілях енергії гідросфери.

Гідросфера - це водна оболонка Землі, що розташовується між атмосферою і твердою землею корою (літосферою). Вона є сукупністю океанів, морів і поверхневих вод.

Використання енергії гідросфери у військових цілях можливе при впливі на гідроресурси (океани, моря, річки, озера) та гідроспороди як ядерних вибухів, а й великих зарядів звичайної вибухової речовини. Вражаючими факторами гідросферної зброї будуть сильні хвилі та затоплення.

2.4. Біосферна зброя (екологічна)

Принцип дії заснований на катастрофічній зміні біосфери. Біосфера охоплює частину атмосфери, гідросферу та верхню частину літосфери, які взаємопов'язані складними біохімічними циклами міграції речовин та енергії. В даний час є хімічні та біологічні засоби, застосування яких на великих територіях може знищити рослинний покрив, поверхневий родючий шар ґрунту, запаси продовольства та ін.

2.5. Озонна зброя

Принцип дії заснований на використанні енергії сонячного ультрафіолетового випромінювання.

Екрануючий озонний шар простягається на висоті від 10 до 50 км з максимумом концентрації на висоті **20-25 км** і різким зменшенням вгору і вниз. У нормальних умовах поверхні Землі досягає незначна частина УФІ з $\lambda = 0,01-0,2$ мкм. Основна її частина, проходячи через атмосферу, поглинається озоном, розсіюється молекулами повітря та частинками пилу.

Часткове руйнування озонного шару над територією противника, штучне створення тимчасових «вікон» у захисному озонному шарі може призвести до поразки населення, тваринного та рослинного світу у запланованому районі Земної кулі за рахунок впливу великих доз жорсткого УФД та інших випромінювань космічного походження.

Руйнацію озонного шару можливо спричинити появленню у ньому низки газоподібних домішок, особливо броду, хлору, фтору та його сполук, які можна доставляти в озонний шар з допомогою ракет, літаків та інших засобів.

2.6. Кліматична зброя.

Для впливу на клімат у певних районах можуть використовуватися наземні установки, розгорнуті у кількох точках земної кулі, здатні генерувати та фокусувати над необхідним районом потужне електромагнітне випромінювання.

Основними проблемами при створенні КЗ є необхідність потужних джерел енергії, засобів фокусування ефекту та розрахункових моделей, що дозволяють визначати можливий ефект на природне середовище, а також побічні ефекти та наслідки. Виявити факти проведення робіт у цій галузі досить складно, оскільки вони можуть легко

маскуватися під дослідження щодо безпеки навколишнього середовища.

Можливим прикладом існуючої КЗ є програма HAARP (High Frequency Active Auroral Research Program), реалізована США на однойменній установці.

Офіційно у межах цієї програми вивчалися проблеми як цивільної, і військової спрямованості. Так, проводився комплекс іоносферних досліджень з вивчення властивостей та поведінки іоносфери на користь можливого використання отриманих результатів для покращення роботи як цивільних, так і військових засобів зв'язку та виявлення, розвитку систем ППО/ПРО, а також для виявлення підводних човнів та підземної томографії надр планети.

Довідково:

Установка HAARP розташована поблизу н. п. Гакон (штат Аляска). До її складу входять: антенне поле (180 хрестоподібних дипольних антен), фактично плоска фазована решітка, РЛС з антеною діаметром 20 м, лазерні локатори, магнітometri, а також центр обробки сигналів та керування антенним полем. Енергозабезпечення комплексу здійснюється від електростанції (паливо - газ) та шести (резервних) дизель-генераторів.

Фахівці науково-дослідної лабораторії ВМС США повідомили, що провели успішний експеримент із використанням установки HAARP. В іоносферу був направлений потік потужного НВЧ-випромінювання, яке **на висоті 170 км створило відносно стабільну хмару плазми. Тліючий розряд тримався приблизно 1 год.** Вперше вдалося досягти рекордної щільності 9×10^5 електронів на 1 см.куб. Фахівці цієї лабораторії оголосили, що експерименти зі створення хмар плазми у верхніх шарах атмосфери за допомогою установки HAARP будуть в подальшому продовжені із завданням зробити хмару плазми, що формується, більш щільною і стабільною.

У США є ще дві станції - одна в Пуерто-Ріко (недалеко від обсерваторії Аресібо) та інша, відома як HIPAS (High Power Auroral Stimulation), на Алясці недалеко від Фербанкс. Обидві вони мають подібні до HAARP активні та пасивні елементи.

У Європі (зокрема, в Норвегії) також встановлені два комплекси з дослідження іоносфери: потужніший радар EISCAT (European Incoherent Scatter radar site) розташований неподалік р. Тромсе, менш потужний SPEAR (Space Plasma Exploration by Active Radar) - на архіпелазі Шпіцберген .

3. Зброя спрямованої енергії

Цей вид зброї вже існує та використовується у багатьох системах. Вона діє на основі випромінювання концентрованої енергії в заданому напрямку без використання проводів, дротиків та інших провідників, для досягнення летального або не летального

ефекту.

3.1.Лазерна зброя

Це зброя, яка використовує високоенергетичне (потужністю від десятків кіловат до кількох мегават) спрямоване когерентне електромагнітне випромінювання, що генерується лазером. Її вражаюча дія по цілі визначається термомеханічним впливом лазерного випромінювання, яке (з урахуванням щільності потоку випромінювання) може призвести до тимчасового засліплення людини або механічного руйнування (розплавлення або випаровування) корпусу об'єкта, що уражається (ракети, літака та ін.).

Американські фахівці розглядають лазерну зброю як один з потенційно ефективних засобів для вирішення завдань протиракетної, протиповітряної та протисупутникової оборони, самооборони літаків від зенітних ракет типу "земля - повітря" та авіаційних ракет "повітря - повітря", а також захисту кораблів від повітряних, балістичних та надводних безпілотних систем.

Довідково:

До 2012 року міністерство оборони США спиралося на створення комплексів лазерної зброї на основі хімічних лазерів. Були розроблені установки із середньою потужністю до декількох мегават, а також створені та випробувані демонстраційні зразки. Після проведення тестування всі програми розробки такої зброї, що реалізуються у США, були закриті. За основу нових комплексів лазерної зброї було взято твердотільні лазери.

Дослідну роботу зі створення комплексу ППО малої дальності з урахуванням високоенергетичного твердотільного лазера проводила фірма "Боїнг". Вона розробила мобільний комплекс лазерної зброї ППО HELMD (High Energy Laser Mobile Demonstrator) на базі вантажного чотиривісного автомобіля підвищеної прохідності фірми "Ошкеш дефенс".

В якості основи для створення лазерної установки був обраний представлений у 2010 році фірмою "Нортроп-Грумман" модульний твердотільний лазер потужністю 105,5 кВт (складається з семи твердотільних лазерних підсилювачів потужністю близько 15 кВт кожен), здатний працювати в безперервному режимі. Він був розроблений у рамках міжвидової програми JHPSSL (Joint High Power Solid-State Laser).

На початку 2013 року фірма "Боїнг" змонтувала на HELMD лазер потужністю 10 кВт. У ході проведених випробувань цей комплекс вразив кілька десятків ракет, мінометних мін та артилерійських снарядів, а також довів здатність протидіяти оптоелектронним приладам, встановленим на БЛА. Загальна кількість уражених цілей становила близько 90 одиниць. Наступну перевірку HELMD пройшов у другій половині 2014 року.

Випробування комплексу проводилися авіабазі Еглін (штат Флорида). Результати показали, що навіть в умовах туману або сильного вітру промінь можна навести на ціль та збити БЛА чи гранату калібру 60 мм. Установка HELMD успішно знищила чи пошкодила 150 цілей. Під час випробувань у складних погодних умовах для компенсації атмосферних спотворень використовувалася адаптивна оптика.

Після 2015 року метою робіт у цій галузі стало встановлення на HELMD лазера потужністю 50 кВт. Згодом вона була збільшена до 100 кВт, що дозволило створити на її основі комплекс зброї з дальністю ураження/придушення цілей до кількох кілометрів. При цьому передбачена можливість використано не твердотільного, а модульного волоконного лазера фірми "Локхід", який вона розробляє для американських сухопутних військ.

В інтересах ВПС американські фахівці ведуть НДДКР зі створення комплексу тактичної лазерної зброї повітряного базування на основі твердотільного лазера, розробленого фахівцями управління перспективних досліджень МО США ДАРПА (DARPA – Defense Advanced Research Projects Agency) у рамках проекту HELLADS (High Energy Liquid Laser Area) . Наприкінці 2012 року було створено лазерну установку потужністю 150 кВт (два модулі по 75 кВт).

У 2013 році було розроблено та випробувано при малому рівні потужності наземний дослідний комплекс зброї.

На перспективу при створенні комплексу лазерного озброєння корабельного базування американські ВМС орієнтуються на лазер на вільних електронах мегаватного класу.

Інші дослідні роботи, що проводяться ВМС США в області лазерної зброї, є спробою використання вже створених лазерів малої потужності.

Так фірма "БАе системі" розробила комплекс лазерної зброї TLS (Tactical Laser System), в якій об'єднані корабельний зенітний артилерійський комплекс (ЗАК) Мк 38 (калібр 25 мм) та комерційно доступний твердотільний лазер потужністю 10 кВт. Ця система, на думку американських фахівців, покликана боротися з малорозмірними судами на дистанції до 2 км.

На додаток до цього комплексу компанія створена НВЧ-випромінювач, який також буде розміщений на Мк 38 для протидії засобам РЕБ супротивника.

Фірма "Нортроп-Грумман" розробила комплекс ЛВ MLD (Maritime Laser Demonstration), який у ході випробувань, будучи поєднаним з корабельною РЛС та навігаційною системою, успішно вражав цілі, включаючи моторні човни, розташовані на дистанції до 1000м. Твердотільний лазер потужністю 15кВт, що використовується в

комплексі MLD, є одним модулем з установки, створеної фірмою для сухопутних військ США. Його потужність може бути легко збільшена до рівня 100 кВт, на відміну від комерційно доступних лазерів, використаних у комплексах лазерної зброї інших фірм-розробниць.

У свою чергу, фірма "Рейтеон" створила демонстраційний зразок комплексу лазерної зброї - LaWS (Laser Weapon System) корабельного базування - гібрид ЗАК "Фаланкс" (без 20 мм гармати) і волоконного лазера потужністю 32 кВт (має модульну конструкцію - складається з шести комерційно доступних лазерів).

Технологія волоконних лазерів вважається надійною та відпрацьованою. У травні 2010 року фірма на полігоні ВМС на о. Сан-Ніколас біля узбережжя Каліфорнії провела випробування LAWS, в ході яких було збито чотири БЛА, що летіли над водною поверхнею.

Слід зазначити, що елементи лазерної зброї дуже активно розвивалися ще за часів СРСР.

Наприклад, маршал Устинов ще у 1984 році запропонував застосувати лазерний комплекс для супроводу американського шатлу. Так, 10 жовтня того року під час польоту «Челленджера», коли його витки на орбіті проходили над районом Балхаша, експеримент відбувся. Лазерний локатор провів вимірювання параметрів цілі під час роботи у режимі виявлення. На той момент висота орбіти корабля становила 365 кілометрів, похила дальність виявлення та супроводу – 400–800 кілометрів.

У результаті на шатлі раптово відключився зв'язок, виникли збої в роботі апаратури, і астронавти відчули нездужання. Під час з'ясування деталей інциденту було з'ясовано, що техніка та екіпаж зазнали якогось штучного впливу з боку СРСР. Було заявлено офіційний протест. Надалі лазерна установка та радіотехнічні комплекси, що мають високий енергетичний потенціал, для супроводу шатлів не застосовувалися.

У 90-х роках усі роботи на полігонах було згорнуто, обладнання вивезено на територію Росії, частина об'єктів підірвана. З початку 2000-х в Російській федерації почалося введення в дію нових комплексів: «Вікно» – гора Санглок (м. Нурек на території Таджикистану) та «Вікно-С» – гора Лиса на Далекому Сході. А також вводяться комплекси "Крона" на Північному Кавказі та "Крона-Н" - також на Далекому Сході.

З недавнього часу роботи з аналогічним об'єктом можна спостерігати і в окупованому Криму неподалік Феодосії. Функції їх, звісно, позначені як суто мирні – «контрольно-вимірювальні оптико-електронні комплекси супроводу космічних об'єктів».

Ще приклад. У СРСР в 1985 році на базі Іл-76 був створений літак А-60, який був експериментальною лабораторією - носієм лазерної зброї, призначеної для дослідження

поширення лазерних променів у верхніх шарах атмосфери, а в подальшому - для придушення розвідки противника. А-60 був авіаційний варіант носія мегаватного лазера. Цей лазер планували вивести в космос як зброю бойової орбітальної платформи «Скіф-Д». Однак у 90-х роках більшість робіт у цій галузі було згорнуто.

3.2.Прискорювальна (пучкова) зброя

Принцип дії цієї зброї ґрунтується на використанні вузьконаправлених пучків заряджених (електронів) або нейтральних частинок (нейтральних атомів водню), що генеруються за допомогою різних типів прискорювачів. Особливістю такого виду зброї може вважатися те, що її можна використовувати як в атмосфері, так і поза нею, тобто в космічному просторі. Поразка різних об'єктів та людини визначається радіаційним (іонізуючим) та термомеханічним впливом.

Роботи з розробки цієї зброї з початку 80-х по середину 90-х років були зосереджені на вивченні можливості створення бойових систем для вирішення задач протиракетної, протикосмічної та протиповітряної оборони.

Дослідження були зосереджені на трьох напрямках, пов'язаних із розробкою технології створення пучків:

- заряджених частинок, що контролюються променем лазера для застосування у верхніх шарах атмосфери;
- нейтральних частинок для залучення в умовах космічного простору;
- заряджених частинок для використання у нижніх шарах атмосфери поблизу поверхні Землі.

Всі великомасштабні пошукові програми в цій галузі були завершені в середині 90-х років та здійснено перехід до практичних конструкторських робіт.

4. Зброя не смертної дії

Нові види зброї далеко не завжди мають на меті перемогу над противником шляхом його знищення. Саме тому таку зброю часто називають не смертною (нелетальною). Окремі зразки такої зброї вже застосовувалися у збройних конфліктах у Сомалі, Гаїті, Іраку. Так, під час операції «Буря в пустелі» використовувалась електромагнітна зброя, засобами доставки якої до об'єктів ураження були крилаті ракети «Томагавк». Внаслідок цього виникали короткі замикання в електромережах електростанцій та ЛЕП, що зрештою призвело до порушення енергопостачання систем управління та ППО Іраку у вирішальний період операції.

Також у США було розроблено лазерний сліпучий «Сейбр-203», який міг встановлюватися у 40-міліметровому гранатометі. Його зразок вперше використовувався

у 1995 році в Сомалі. Пізніше, лазерні сліпителі мали американські війська у Боснії та Герцеговині.

Під час бойових дій НАТО в Югославії випробувано низку зразків не смертальної зброї, таких як «графітова», світлова, акустична та електромагнітна бомби, бомба, що створює нестерпний запах, лазерні пристрої, липуча піна. При першому застосуванні «графітової» бомби літаки НАТО вивели з ладу на кілька годин дві третини енергосистеми Сербії.

За ініціативою США в рамках НАТО створено спеціальну робочу групу з координації військово-прикладних досліджень у галузі не смертальної зброї. До пріоритетних напрямів відносяться дослідження таких його видів, які викликають у противника занепад сил (різке зниження активності), втрату просторової орієнтації, відключення свідомості, больові відчуття.

4.1. Акустична зброя

Один із видів зброї, заснований на використанні спрямованого випромінювання потужних акустичних коливань. Зразки такої зброї вже існують і пройшли випробування у реальних умовах.

Так, установка LRAD (Long Range Acoustic Device) була розроблена у 2000 році для захисту надводних кораблів та суден від атак терористів та піратів. Завдяки тому, що в морі практично немає перешкод, вона повністю безпечна для команди корабля. LRAD використовує низькочастотний звук високої потужності на низьких частотах до **150 дБ** (для порівняння – рівень гучності звуку реактивного літака становить 120 дБ, больовий поріг – **125 дБ**, смертельний – **175 дБ**), тому вона дуже жорстко діє на органи слухового апарату людини.

Вперше ця установка була успішно застосована наприкінці 2005 року, коли піратські катери Сомалі здійснили напад на круїзний лайнер "Сіберн Спїріт". Однак при спробі потрапити на борт судна терористи почали кидати зброю і руками закривати вуха, намагаючись врятуватися від жахливого болю, що незрозуміло звідки узявся.

Довідково:

Розробка системи LRAD спочатку велася для забезпечення режиму таємності на об'єктах особливого значення, проте після вдалого застосування акустичної установки надійшла пропозиція використовувати її на всіх великих надводних човнах.

При створенні корабельної установки LRAD були використані напрацювання фірми "Амерікен текнолоджі", яка виробляє:

- мобільні блоки LRAD з рівнем гучності до 130 дБ для встановлення на БТР та джипи;

- ручні блоки LRAD, що за конструкцією нагадують мегафон, з потужністю звучання до 120 дБ, які безпечно застосовувати навіть у міських умовах завдяки швидкому розсіюванню - вже через 20-30 м відбитий звук втрачає більшу частину своєї потужності.

Розроблено також мобільну версію акустичної зброї для поліцейських підрозділів США. З урахуванням їх масогабаритних характеристик ці засоби можуть бути розміщені на будь-якій автотранспортній техніці і не лише. Ця нелетальна зброя була використана близько десятка разів американською поліцією для розгону демонстрацій. Хоча акустична зброя і є "гуманною", але її застосування при тривалому впливі може призвести до смерті.

Ізраїль використав подібне напрацювання при створенні системи "Цаака", яка успішно пройшла перевірку під час демонстрацій в Єрусалимі. Надходили також повідомлення про застосування цієї зброї у Секторі Газа.

Акустичні засоби використовувалися також під час розгону антиурядових демонстрацій у Грузії у 2007 році. Внаслідок дій поліції 508 осіб були змушені звернутися за медичною допомогою.

Основні характеристики акустичної установки LRAD "Саунд Кеннон": маса 20 кг; діаметр 83 см; сектор поширення звукової хвилі до 30 °; потужність може досягати (LRAD 2000X) до 162 дБ; чутність – 9 км; зона дії приблизно 100 м (у форсованому режимі до 300 м); зона критичних уражень органів до 15 м.

Існують також проекти звукових пістолетів, проте через недоліки в конструкції та великі габарити, а також через можливість випадкового впливу на власника у серійне виробництво вони поки ще не запущені.

5. Кінетична зброя.

Ця зброя впливає на ціль за допомогою розігнаного до швидкості кількох кілометрів на секунду снаряда. Свою назву кінетична зброя отримала через вплив на ціль кінетичною енергією елементів, що вражають.

Одним із найперспективніших напрямків кінетичної зброї є створення електромагнітних рейкових гармат. □

Довідково:

У рамках дослідної роботи фірма "БАе системз" ще у січні 2012 року поставила до Центру наземних військових досліджень ВМС США повнорозмірний демонстраційний зразок рейкової електромагнітної гармати з кінетичною енергією розігнаного снаряда наприкінці каналу ствола близько 32 МДж. За допомогою цієї гармати снаряди масою **18 кг** летять зі швидкістю до **2,5 км/с** на дальність від **89 до 161 км**. У тому ж році з цього зразка було здійснено низку пострілів у тестовому режимі. Випробування проходили до

2017 року. А у 2013 році командування ВМС США вже уклало контракт із цією компанією на розробку нового зразка рейкової гармати, який буде здатний вести вогонь чергами без перегріву ствола. У 2016 році було проведено випробування нової рейкової гармати з борту корабля.

З аналізу сукупності робіт, проведених у цій галузі, можна дійти висновку, що у теперішній час вони перебувають на етапі натурних випробувань промислово вироблених зразків. Крім того, на сьогодні конструктори перебувають у стадії остаточного вирішення проблеми скорострільності та стрільби чергами, а також живучості ствола при збереженні ним необхідних параметрів. У зв'язку з цим технічна готовність рейкових електромагнітних гармат, які створюються на замовлення ВМС США, очікується до кінця 2025 року.

6. Генна зброя

Засоби ураження генетичного апарату людини або "генна зброя" - це речовини хімічного або біологічного походження, які можуть викликати в організмі людей мутації (зміни структури) генів, що супроводжуються порушенням здоров'я або запрограмованою поведінкою людей. Особливим видом генної зброї є так звана етнічна зброя – зброя із виборчим генетичним фактором. Вона розрахована на поразку передусім певних етнічних та расових груп населення. Можливість розробки та подальшого застосування такої зброї виходить із генетичних відмінностей різних рас та етнічних груп людей.

Так наприклад, в Ізраїлі вже багато років ведуться активні роботи над створенням генетичної зброї (так званої етнічної бомби), яка могла б вражати лише арабів, але не євреїв. При цьому вчені використовують успіхи медицини в області ідентифікації відмінних генів, які мають деякі араби, щоб потім створити генетично змінені бактерії або віруси. Робляться спроби використовувати здатність вірусів та низки бактерій змінювати ДНК усередині клітин свого проживання, також конструюють нові смертельні мікроорганізми, які атакують лише носіїв специфічних генів. Програми здійснюються у біологічному інституті Нес Ціона (Nes Tziyona) – основному дослідному центрі Ізраїлю. З точки зору експертів завдання надзвичайно складне, оскільки і араби і євреї мають семитське походження. Однак, за словами співробітників інституту, вони досягли успіху у питанні виявлення специфічних особливостей генетичного профілю деяких арабських громад, особливо у людей з Іраку. Хвороба може бути поширена шляхом розпилення мікроорганізмів у повітрі або зараження водопровідних систем.

Заключення

Підводячи підсумок у розмові про зброю на нових фізичних принципах доцільно сказати про найбільш відомий та всебічно обговорений у засобах масової інформації приклад - ПРО США. І це не нова військова система, а технологічний прорив. І її основу складають системи з новими бойовими якостями, засновані на нових принципах. Наприклад, наземний перехоплювач – система, яка забезпечує ураження боєголовки балістичної ракети на відстані кількох тисяч кілометрів без вибуху шляхом прямого влучення вражаючим елементом. Тобто на відстані дві-три чи п'ять тисяч кілометрів цей перехоплювач повинен забезпечити влучання в ціль розміром із холодильник. Це, звичайно ж, лазерні системи, пучкові системи, тобто та сама зброя на нових фізичних принципах ураження цілі шляхом прямої передачі не кінетичної, а інших видів енергії. Якщо проводити аналогії, то з погляду історичних паралелей створення системи ПРО можна порівняти з переходом від лука та стріл до вогнепальної зброї.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Nesbit, T. J., & East, R. (2019). Directed Energy Weapons: Technologies, Applications and Implications. RAND Corporation.
2. Kopp, C. (2013). High Energy Laser and Directed Energy Weapons. Air Power Australia Analysis.
3. Goodman, M. (2010). Contemporary Non-Lethal Weapons: Acoustic, Optical and Electromagnetic Technologies. Journal of Military Ethics, 9(2), 120–140.
4. Joint Program Office for HAARP. (2013). HAARP Research and Applications. University of Alaska Fairbanks.
5. O'Rourke, R. (2018). Navy Lasers, Railgun, and Gun-Launched Guided Projectile: Background and Issues for Congress. Congressional Research Service.
6. Wheelis, M., & Dando, M. (2005). Neurobiology: A Case Study in the Biological and Chemical Weapons Debate. CBW Conventions Bulletin, 68, 3–8.
7. National Research Council. (2003). An Assessment of Non-Lethal Weapons Science and Technology. National Academies Press.
8. Royal Society. (2009). Geoengineering the Climate: Science, Governance and Uncertainty.

Світлана Сперкач, Валерій Кременицький, Ростислав Поліщук,

Юрій Душек, Руслан Золотарьов

Технічний центр НАН України, Київ, Україна

e-mail: Svetlana@nasu.kiev.ua

ФІЗИКА ДЛЯ ЗАХИСТУ: З МІКРОСВІТУ — ДО ОБОРОНИ

Сьогодні ми з вами живемо в непростий час. Повномасштабна війна, розв’язана російською федерацією, — це не лише спроба захопити території. Це — спроба відібрати в нас свободу, ідентичність, можливість жити у власній країні. Але українці дають відсіч на всіх фронтах: хтось на полі бою зі зброєю в руках, хтось у дипломатичних кабінетах, хтось — за кермом техніки чи в тилу, займаючись волонтерством або допомагаючи точково тим, хто цього потребує.

І наука — також фронт. Науковці України працюють щодня, досліджуючи склад, структуру, фізико-хімічні й механічні властивості матеріалів подвійного призначення. Ми створюємо нові технології та матеріали з унікальними властивостями — радіопоглинаючі, теплоізоляційні покриття, надміцні й жаростійкі сплави, речовини для електронних і оптичних компонентів сучасної військової техніки.

Це наш внесок у перемогу. Скромний, але фундаментально важливий. І сьогодні я хочу поділитися з вами частинкою цієї роботи — показати, як фізика стає частиною обороноздатності країни.



Рис. 1. Приклади уламків засобів ураження: а — металічний фрагмент ракети «Циркон», б, в — композитні фрагменти ракети Hwasong-11 та БПЛА Шахед 136, відповідно.

Але спочатку хочу показати вам дещо більше, ніж просто схеми чи графіки. Перед вами — уламки ракет і ударних безпілотників, якими атакують наші міста. Це — не ілюстрації з підручника. Це реальні фрагменти бойових засобів ураження, що несли смерть і руйнування.

Металічний уламок ракети, композитний фрагмент ракети (композит — матеріал, що складається з декількох шарів, що в сукупності проявляють унікальні властивості), фрагмент шахеда (рис.1), де під верхнім шаром можна бачити стільникову структуру, проте замість меду в стільниках наші браття з боліт надсилають смертоносну вибухівку.

Я зупинюсь на дослідженнях мікросвіту всередині матеріалу, тобто його хімічного складу та структури.



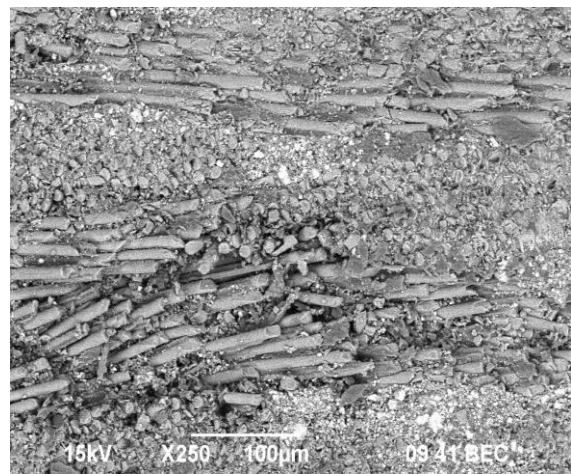
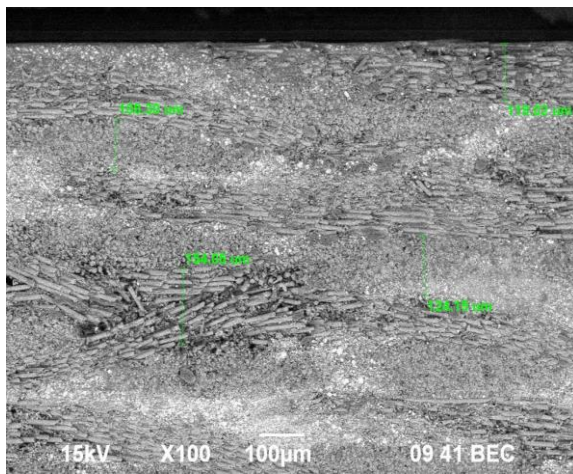
Рис. 2. Скануючий електронний мікроскоп JSM-6490LV, JEOL Ltd, Японія

Дослідження хімічного складу, структури та топографії поверхні матеріалів зразків у Технічному центрі НАН України проводять у тісній співпраці з Центральним науково-дослідним інститутом озброєння та військової техніки Збройних Сил України методом сканівної електронної мікроскопії та рентгенівського мікроаналізу на двох наукових високоточних приладах виробництва фірми JEOL Ltd (Японія): сканівному електронному мікроскопі JSM-6490LV, до складу якого входить енергодисперсійний спектрометр та рентгенівському мікроаналізаторі JXA-8200 з кристал-дифракційним спектрометром. У режимі сканівної мікроскопії ці прилади мають наступні характеристики: збільшення — до $\times 300000$, роздільна здатність — 6 нм.

Дослідні зразки – це частини уламків порядку квадратного сантиметру, очищені та за потреби відполіровані. Для досліджень структури зразка виготовляється його зріз.

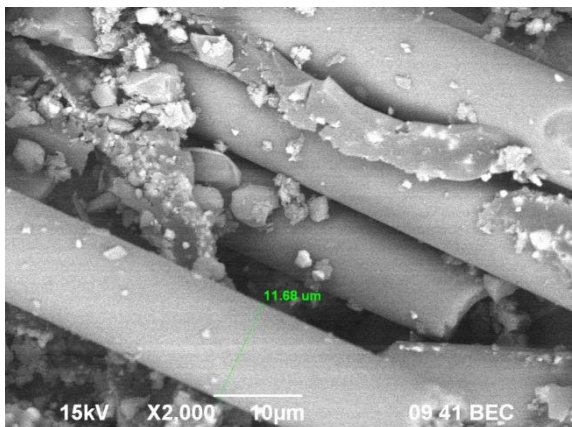
Метод сканівної електронної мікроскопії

Зображення, які отримують у скануючому електронному мікроскопі, виглядають тривимірними і зручними для вивчення структури поверхні.



Прискорювальна напруга – 15kV.
Збільшення - 100, масштабна мітка – 100 мкм

Прискорювальна напруга – 15kV.
Збільшення - 250, масштабна мітка – 100 мкм



Прискорювальна напруга – 15kV.
Збільшення - 2000, масштабна мітка - 10 мкм

Рис. 3. Приклад зображення зрізу фрагмента досліджуваного зразка композитного матеріалу із включенням штучних волокон.

Як працює мікроскоп?

- Створює високодеталізоване зображення поверхні зразка
- Електронний промінь «сканує» зразок — формуються сигнали
- Сигнали перетворюються на зображення, подібне до 3D
- Дозволяє побачити мікро- й наноструктуру матеріалу.

Що ще вміє мікроскоп?

- Працює в кількох режимах: вторинні електрони, відбиті, катодолюмінесценція
- Просторова роздільна здатність — до кількох нанометрів
- Можна «зазирнути» в глибину матеріалу та побачити найменші деталі

Для дослідження структури та концентрацій хімічних елементів в об'ємі дослідного зразка, виготовляється зріз фрагменту. Зображення зрізу, отримані на електронному мікроскопі JSM-6490LV наведено на рис. 3.

Аналіз елементного складу

- СЕМ працює разом із енергодисперсійним та кристал- дифракційним спектрометрами
- При взаємодії електронів із зразком виникає рентгенівське випромінювання
- Кожен хімічний елемент має унікальну «сигнатуру» — ми її фіксуємо
- Так визначається, з чого саме зроблений зразок



Рис. 4. Рентгенівський мікроаналізатор JXA-8200 виробництва JEOL Ltd (Японія).

Слід зазначити, що рентгенівський мікроаналізатор для точного вимірювання концентрацій хімічних елементів вимагає ретельної підготовки поверхні (полірування)

зразків. Тому його зручно використовувати для дослідження металевих фрагментів конструкцій спеціального призначення. У той час як скануючий електронний мікроскоп використовується для одночасного дослідження структури поверхні та хімічного складу матеріалів фрагментів, які являли собою композити з полімерною матрицею та різними наповнювачами.

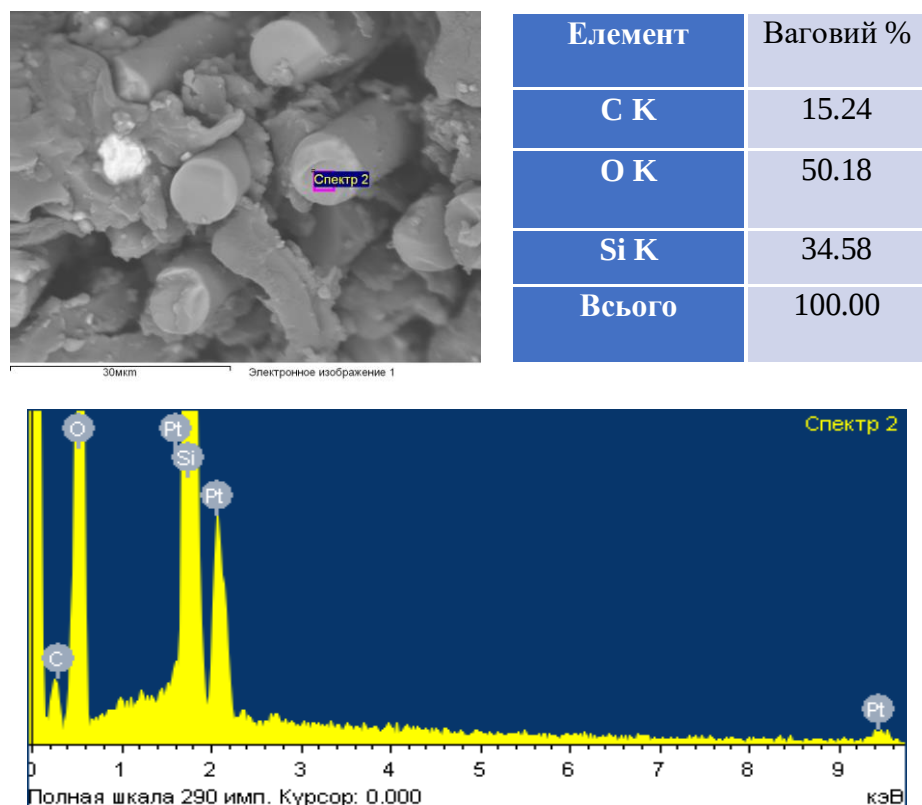


Рис.5. Приклад результатів проведення рентгенівського мікроаналізу волокон штучного полотна зрізу фрагменту.

Мікроаналіз здійснюється у точці, яка показана на зображенні у вторинних електронах (рис. 5, а). Концентрації хімічних елементів представлено у масових відсотках (рис. 5, б). На рисунку 5 також представлено спектр характеристичного рентгенівського випромінювання цієї ділянки вимірювання (рис. 5, в).

За хімічним складом основних елементів матеріалу, з якого виготовлений дослідний зразок визначається тип матеріалу, його маркування, відповідність певному Стандарту тощо.

науки». Ми працюємо з тим, що має прямий стосунок до оборони країни. У співпраці з Центральним НДІ озброєння та військової техніки ми досліджуємо уламки металів, сплавів, та композитів численних фрагментів елементів конструкцій спеціального призначення, що використовує росія у ході війни проти України.

- крилатих ракет: 3М-14 «Калібр» (РФ), Х-101 (РФ), 9М727 «Іскандер» (РФ), 9М723 «Іскандер» (РФ);
- балістичних ракет: Нwasong-11 (KN-23), Північна Корея, 9К720 «Іскандер-М» (РФ);
- гіперзвукових аеробалістичних ракет: Х-47М2 «Кинжал» (РФ), 3М22 «Циркон» (РФ);
- надзвукових протикорабельних ракет: П-800 «Онікс» (РФ);
- авіаційних ракет повітря-повітря: Р-37 (РФ), Р-31 (РФ);
- керованих реактивних снарядів: 9М544 Торнадо-С» (РФ);
- баражуючих боєприпасів (ББП) та безпілотних авіаційних комплексів (БАК): ББП «Shahed-136» (Іран), модернізованого ББП «Shahed-136» (Іран), ББП «Ланцет» (РФ), БАК «Орлан» (РФ).

Наука — для захисту

Ми ідентифікуємо засоби ураження за їхніми фрагментами. Вивчаємо, чи змінено технологію виробництва, чи з'явилися нові матеріали. Це допомагає створювати власні інноваційні матеріали подвійного призначення і — виявляти слабкі місця засобів ураження ворога для систем протидії.

- Ми змогли точно визначити хімічний склад і структуру матеріалів понад 60 типів фрагментів ракет, боєприпасів, безпілотників.
- Саме наші дані стали частиною ідентифікації іранського «Shahed-136».
- Частину результатів вже використано під час розробки нових українських зразків зброї.
- Актуальність наших досліджень підтверджена впровадженнями на підприємствах «Укроборонпрому», ДККБ «ЛУЧ», заводі «Маяк».

— Наша робота була схвалена міжнародними партнерами, зокрема представниками оборонних структур Франції.

— Центр відзначено листами подяк, грамотами, двома відзнаками Міністра оборони України «За сприяння обороні».

Отже, наука не стоїть осторонь. Вона — в центрі змін. І саме ви, студенти, майбутні педагоги, науковці, інженери, аналітики — зможете продовжити цю справу, зробити її ще сильнішою і масштабнішою.

Технічний центр НАН України завжди готовий сприяти зміцненню обороноздатності України та співпрацювати заради нашої спільної Перемоги!

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Богданов В.Л., Григоренко О.Я., Чепков І.Б., Одноралов І.В., Кучинський А.В., Креницький В.В., Сперкач С.О. Особливості хімічного складу, структури та топографії композиційних матеріалів корпусу планера модернізованого баражуючого боєприпасу «Shahed -136» (чорного). Науково-технічний журнал «Озброєння та військова техніка» №1 (41). 2024, с.75-81.
2. V. Bogdanov, A. Grigorenko, I. Chepkov, I. Odnoralov, V. Kremenetskyi, and S. Sperkach Physicochemical Analysis of Composite Fragments from Russian Sub- and Supersonic Cruise Missiles: Insights from Scanning Electron Microscopy/ In book Advanced Structural Materials, Editors A. Öchsner, L. F. M. da Silva, H. Altenbach. Springer, 2024.
3. Viacheslav L. Bogdanov; Alexander Ya. Grigorenko; Ihor B. Chepkov; Ihor V. Odnoralov; Andrii V. Kuchynskyi; Valerii V. Kremenetskyi; Svitlana O. Sperkach Identification of Special-Purpose Structures by Their Fragments Based on Scanning Electron Microscopy.- 2025, Springer Nature Switzerland Advanced Structured Materials (STRUCTMAT, volume 233), 406 p. DOI: 10.1007/978-3-031-88827-4/



Максим Барабаш¹, Юрій Ховавко²¹Технічний центр НАН України, м. Київ, Україна,²Інститут газу НАН України, м. Київ, Україна

ОДЕРЖАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОМАТЕРІАЛІВ ПІД ЧАС КОНВЕРСІЇ ВУГЛЕВОДНІВ У ГАЗИ-РЕАГЕНТИ

В рамках спільної з Інститутом газу НАН України наукової роботи «Одержання вуглецевих наноматеріалів під час конверсії вуглеводнів у газ-реагенти» між Інститутом газу НАН України та Технічним центром НАН України були створені технологічні можливості для синтезу вуглецевих наноматеріалів (ВН) методом газозфазного хімічного осадження з продуктів каталітичної конверсії природного газу.



Рис. 1. Діаграма, що демонструє застосування вуглецевих нанотрубок у різних галузях

Не дивлячись на різноманітну природу утворення вуглецевих нанотрубок (ВНТ) та вибору метода синтезу ВН, вони можуть знаходити широке застосування в механіці різних середовищ, фотоніці та оптиці, енергозберіганні, енергетичного машинобудування військового призначення тощо (рис. 1). Стає зрозумілим, що такий міждисциплінарний характер опису процесів, які відбуваються в природі, не є випадковим, він відображає фундаментальний принцип матеріальної єдності світу, в основі якого знаходиться

загальність та абсолютність матерії, що нас оточує.

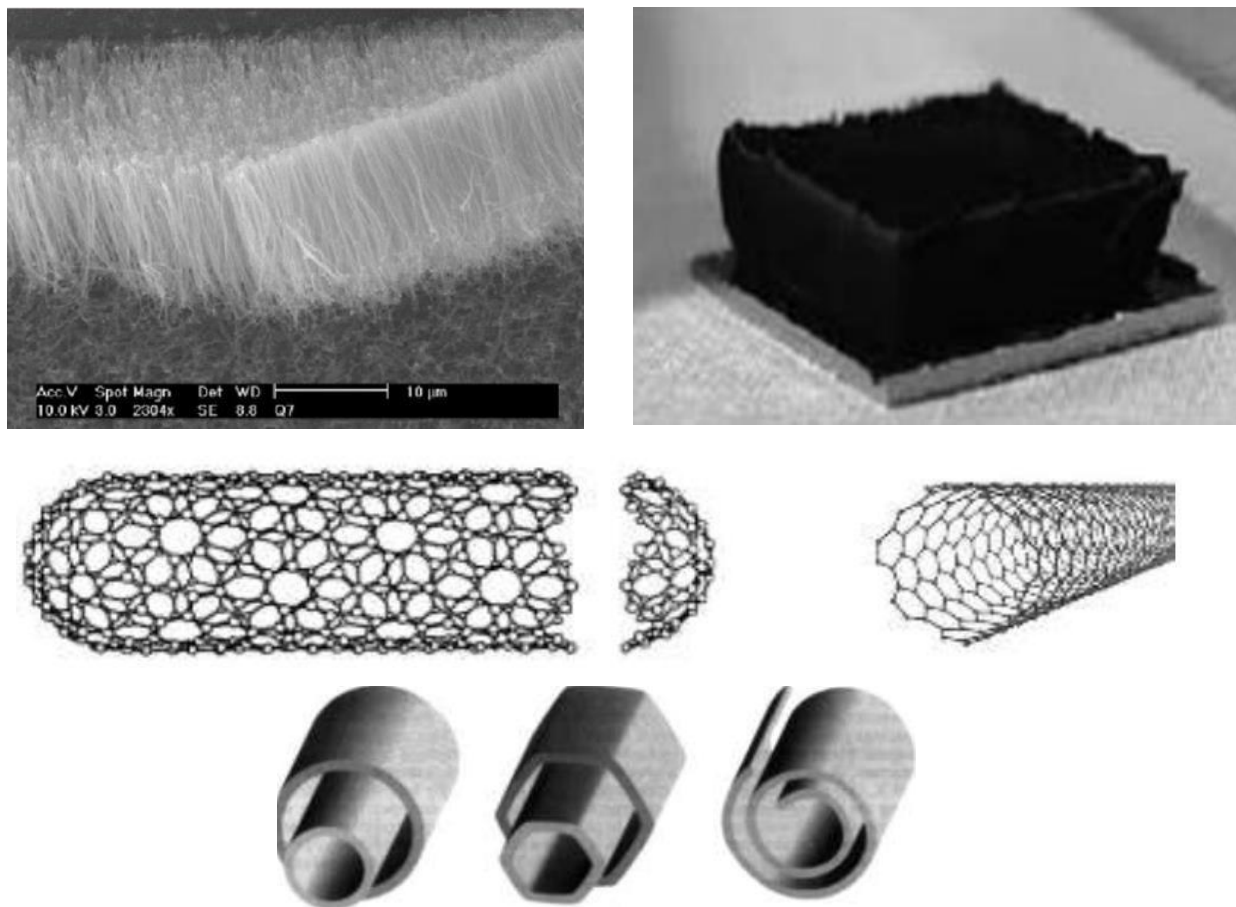


Рис. 2. Утворення вуглецевих нанотрубок з продуктів повітряної конверсії метану на Ni/Cr й Fe каталізаторах

Синтезовані нанотрубки спільно з Інститутом газу НАН України мають досить високу електропровідність та здатність поглинати різні випромінювання. Трубки з вуглецевого волокна мають здатність поглинати великий спектр світлових хвиль – від радіохвиль до ультрафіолетового випромінювання 380 нм-10 нм. Така здатність поглинання робить поверхню нанотрубок майже невидимими не лише для радіолокаційного обладнання, але і для людського ока. Спектр поглинання випромінювання матеріалу, виготовленого з ВНТ, дуже широкий. Можливість поглинати світлові хвилі дає можливість використовувати їх як камуфляж для військової техніки. Нанотрубки дозволяють рельєфну поверхню військової техніки перетворити на чорну більш рівну поверхню. Вуглецеві вертикальні трубки не розсіюють і не відображають світлові хвилі. Якщо покрити військову техніку мережею нанотрубок то вони будуть невидимими для простого ока. На радарх вони будуть сприйматися як "чорні дірки", що поглинають випромінювання.

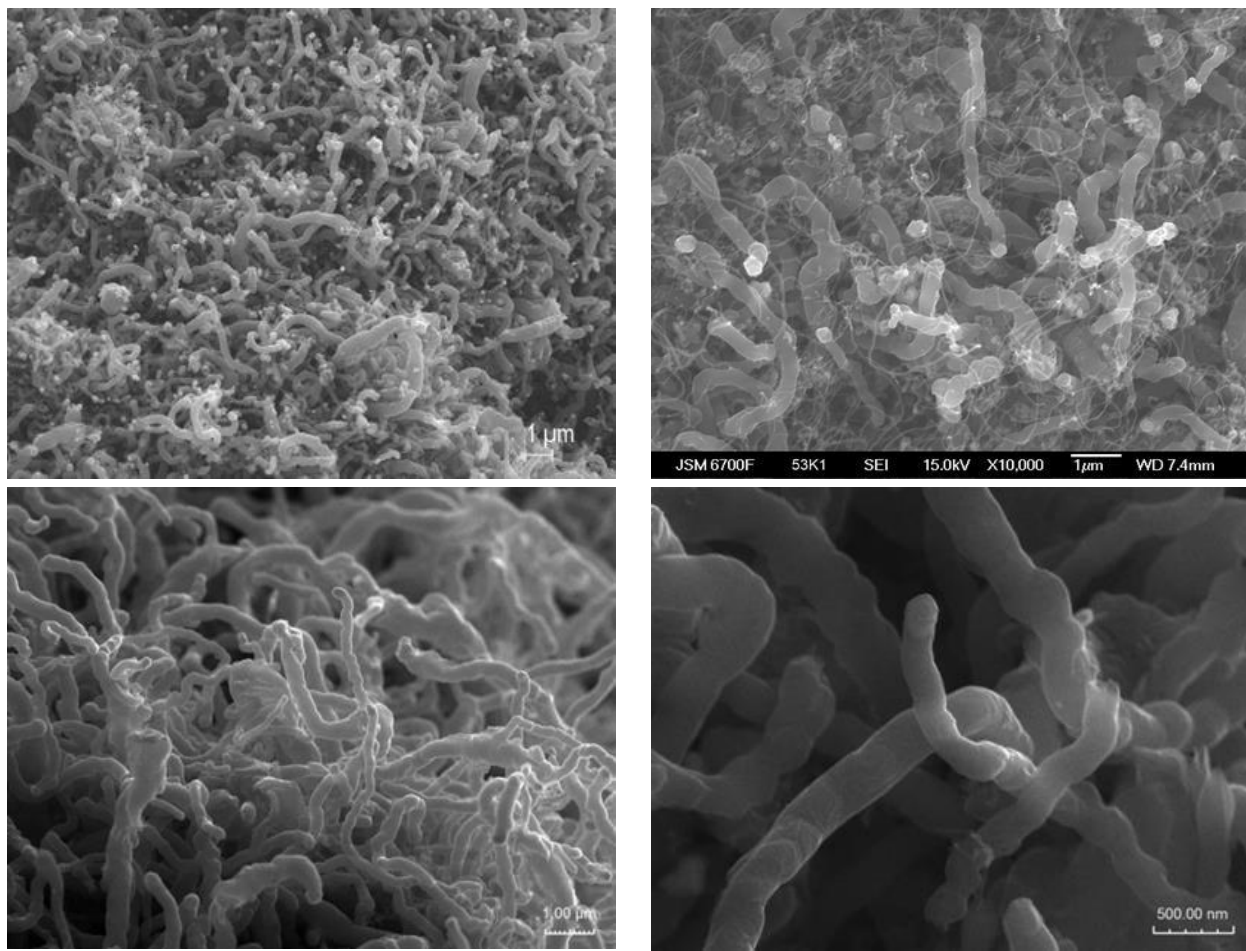


Рис. 3. Морфологія та структура вуглецевих наноматеріалів отримана методом СЕМ.



Рис. 4. Композитний “суперчорний” матеріал (у центрі) виготовлений з вуглецевих нанотрубок

Композитні матеріали на основі ВНТ також можуть використовуватися для камуфляжу підводних човнів. При нагріванні нанотрубок під водою тепло розсіюється, змінюючи оптичні параметри води. Тепло, що виходить з вуглецевих нанотрубок, передається у воду та розсіюється, і створюється ілюзія невидимки.

Висновки

1. Синтезовано вуглецеві нанотрубок методом CVD (chemical vapor deposition) на різних каталізаторах при різних гідродинамічних та температурних режимах. Розроблено та успішно протестований новий каталізатор пластинчатого типу. Ефективність його використання підтверджується якістю та об'ємом отриманого вуглецевого матеріалу.

2. Методом хімічного газового осадження у проточному реакторі синтезовано ВНТ з продуктів повітряної конверсії метану. Показано, що синтез ВНТ при температурі 923 К викликає збільшення рухливості частинок каталізатора, що призводить до їх агломерації, і як наслідок впливає на зростання ВНТ. Розроблено основи технології синтезу вуглецевих матеріалів, яка дозволяє отримувати ВНТ з різною морфологією та товщиною. За допомогою методів сканувальної електронної мікроскопії вивчено та ідентифіковано їх структуру в залежності від різних режимів синтезу.

3. Спектри КР підтвердили наявність вуглецевих нанотрубок з двома характерними піками на 1310 і 1590 см⁻¹, що відповідають D і G модам відповідно. За співвідношенням двох мод розраховані співвідношення площ під смугами G і D та визначено значну кількість дефектів вуглецевих нанотрубок.

4. Показано, що вуглецеві нанотрубки утворюються за рахунок карбідизації-декарбідизації металевих каталізаторів, розроблено теоретичні засади методів конверсії вуглеводнів, котрі забезпечують максимально можливе утворення карбідів заліза (Fe₃C) при мінімізації сажоутворення.

5. Композитні матеріали з вуглецевими нанотрубками можуть використовуватися не тільки в антирадарних системах, але і в активних камуфляжних системах для піхотинців. Це може суттєво допомогти їм у прихованих, розвідувальних операціях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Khovavko, D.Filonenko, M.Barabash, A.Nebesnyi, A.Sviatenko, I.Trosnikova, G. Nie "Multi-walled carbon nanotubes synthesis on iron ore pellets by CVD method"// Applied Nanoscience. Q2. 2023. <https://doi.org/10.1007/s13204-023-02954-8>.
2. A. Khovavko, E. Strativnov, D. Filonenko, A. Nebesnyi, O. Sviatenko, A. Piatova, M. Barabash, Carbon Nanosructured Materials: Synthesis and Application Springer, 151 -p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-64121-3>,
3. A.Khovavko, D.Filonenko, M.Barabash, A.Nebesnyi, A.Sviatenko, I.Trosnikova, G. Nie "Multi-walled carbon nanotubes synthesis on iron ore pellets by CVD method"// Applied Nanoscience.

Q2. 2023. <https://doi.org/10.1007/s13204-023-02954-8>.

Володимир Трачевський, Анна Носихіна, Тетяна Данилова

Технічний центр НАН України, м. Київ, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ЕПР-ДІАГНОСТИКИ В УМОВАХ ВІЙНИ

Глобальна хвиля нанотехнологічного переформатування суспільного буття знаменує еру тотальної зміни усвідомлення глибини та масштабу потенційних можливостей, які необхідно настійно виявляти, адекватно модельно представляти та формулювати алгоритми їх практичного втілення у режимі із загостренням, бо часу обмаль.

Носіями нетрадиційних яскраво виражених властивостей (електричних, магнітних, оптичних, механічних, біологічних) є нанорозмірні об'єкти: кластери, плівки, волокна, точки. Ступінь їх залучення до інженерії структур та композицій спецпризначення (стелс авіація, тканини для маскувального одягу, компоненти новітніх елементів електроживлення, вибухові речовини нового покоління та ін.) визначає рівень технологічної потужності економічної спроможності та обороноздатності держави.

Вирішення актуальних проблем потребує не тільки пріоритетної орієнтації зусиль зростаючої когорти дослідників та спрямування відповідних ресурсів але й для організації ефективно керованого процесу створення конкретних матеріальних структур, налагодження витонченої діагностики динаміки стану вихідних реагентів та досягнення максимального виходу цільових продуктів.

Відкриття Є. Завойським – вченим з українським корінням, явища Електронного Парамагнітного Резонансу, започаткувало виявлення осяжного сімейства резонансних ефектів (серед них всім відома МРТ томографія). Фізична суть, наприклад, явища ЕПР полягає у поглинанні енергії електромагнітного випромінювання речовиною розташованою у магнітному полі. Метрологічна особливість ситуації полягає в тому, що поглинання відбувається при строгому дотриманні умов взаємовідповідності енергії когерентного випромінювання та контрольованої напруженості магнітного поля.

Апаратурно оформлені та комп'ютеризовані методи електронного парамагнітного та ядерного магнітного резонансів дозволяють організувати високоінформативний діалог дослідника з неспареними електронами та ядрами атомів більшості елементів періодичної системи. Знаходячись на вістрі фізико-хімічних перетворень вони якби проводять репортажі про вир ініційованих в нанореакторах зовнішніми (механічними, термічними, радіаційними, реагентними) чинниками

процесів.

Джерелами безпосередньо сприймаємої оперативної інформації є такі параметри: значення Ж-тензорів та хімічних зсувів, що характеризують електронну густину в осередках відзначених зондів, інтегральні інтенсивності ліній, константи надтонкої та супер-надтонкої взаємодій, що характеризують електрон-електронні, електронно-ядерні та ядерно-ядерні ефекти; необхідно також враховувати, що всі акти зазначених взаємодій перебігають у різних шкалах часу. Свідоме опанування таким величезним масивом ієрархічно представлених вимірюємих характеристик життя атомно-молекулярних ансамблів дозволяє досягнути будь яких омріяних результатів.

Так, дослідження дозволили визначити оптимальний режим формування структур високоактивного діоксиду мангану для засобів автономного дихання при гасінні пожеж, роботі під водою та в космосі.

Залучення відходів різних виробництв дозволило створити добрива нового покоління для рекультивації техногенно забруднених ґрунтів.

На підставі отриманих даних розроблені методики медикаментозного впливу з позитивним результатом на організм з черепно-мозковими травмами.

Вивчення стану водню у структурі металевого титану виявило, окрім відомої гідридної форми, молекулярний водень, який займає октаедричні та мезопорожнини, що дозволило створити пілотитан для ефективного захисту військової техніки від радіаційного впливу.

Визначення механізму міграції бору через функціоналізовані мембрани дозволило розробити технології утилізації бору єдиного національного джерела – озера Сиваш, з одночасним вирішенням проблем водопостачання регіонів з обмеженим ресурсом питної води, синтезу компонентів добрив для плантації цукрового буряку, створення автоскла, виготовлення прецизійного інструментарію, а також спецпрепаратів для персоналу підприємств із зоною підвищеного радіаційного ризику.

Таких демонстрацій напрацьовано багато, Їх детальне висвітлення можна провести в наступних спільних зустрічах.

Олег Сасенко¹, Роман Сасенко²

¹кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри загальної фізики і математики
Полтавського національного педагогічного університету імені В. Г. Короленка

²Магістр фізики, вчитель фізики Полтавського ліцею №6 «Лідер»

УЯВНИЙ МОЛЯРНИЙ КОЕФІЦІЄНТ СТИСКАННЯ ТА НАДЛИШКОВА АДІАБАТИЧНА СТИСЛИВІСТЬ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ АДОНІТУ

На сьогодні поліюли, або багатоатомні (цукрові) спирти, знайшли широке застосування в різноманітних сферах діяльності людини та технологічних процесах. Зокрема, у медицині вони використовуються як плазмозамінники для покращення реологічних властивостей крові, мікроциркуляції, детоксикації та дегідратації, а також для корекції кислотно-лужного балансу та вирішення інших клінічних завдань [1]. Як різновид вуглеводів, цукрові спирти мають важливе значення для біологічних систем, зокрема в контексті вивчення їхніх термодинамічних та транспортних характеристик.

Окрім медицини, поліюли активно застосовуються у косметичній та фармацевтичній промисловостях. Тут вони виконують функції наповнювачів, зволожувачів, протимікробних агентів, пребіотиків, а також модифікаторів температури замерзання та кристалізації. Крім того, багатоатомні спирти використовують у виробництві вибухових речовин і як складову пластифікаторів.

У харчовій промисловості цукрові спирти набули особливої популярності як альтернатива синтетичним підсолоджувачам. Вони поєднують приємний смак із низькою калорійністю, що робить їх придатними для виготовлення дієтичних продуктів, зокрема для осіб із цукровим діабетом. Найчастіше у таких технологіях використовують поліюли з коротким вуглецевим ланцюгом, тобто сполуки, що містять не більше двох гідроксильних груп.

Поліюли можна отримувати як із природних джерел (рослин), так і шляхом гідрування відповідних моносахаридів [2, 3]. У продуктах харчування вони можуть бути присутні як природні складники або вводитися з метою поліпшення органолептичних властивостей та товарного вигляду.

Окрім підсолоджувальної функції, поліюли відіграють низку інших ролей у харчових системах. Зокрема, вони можуть впливати на буферні властивості розчинів, що має критичне значення для стабілізації кислотно-лужного балансу продукту. Значення рН впливає на активність ферментів, розчинність і функціональність білків, зміну кольору й

смаку, а також на мікробіологічну стійкість харчових продуктів. Тому контроль рН є ключовим чинником для забезпечення фізичної, хімічної та мікробіологічної стабільності харчових систем. Важливо також розуміти, як змінюється рН продукту з часом у залежності від його складу [3].

Дослідження показали, що поліолі здатні знижувати рН у розчинах соляної кислоти та фосфатних буферів, при цьому ефект зниження рН прямо пропорційний молекулярній масі поліолу [3].

Попри велику кількість досліджень, в'язкопружні властивості самих поліолів, а також їхніх бінарних і багатокомпонентних систем залишаються недостатньо вивченими. Тим часом такі характеристики, як густина та в'язкість, швидкість поширення звуку мають велике значення для промислових процесів, пов'язаних із тепломасообміном і передачею тепла в умовах в'язкої течії. Ці параметри є основоположними для побудови інженерних моделей і прогнозування поведінки систем у різних технологічних умовах. У зв'язку з цим рідинні системи на основі багатоатомних спиртів викликають зростаючий науковий інтерес [4, 5].

Вивчення акустичних властивостей водних розчинів полігідрокси сполук, таких як адоніт, дозволяє виявити характер міжмолекулярних взаємодій у розчинах. Одним з чутливих показників є уявний молярний коефіцієнт стискання (ϕ''), який дає змогу оцінити зміни у пружності середовища при додаванні розчиненої речовини, а також надлишкова адіабатична стисливість ($\Delta\beta_s^E$), що характеризує відхилення від ідеальної поведінки.

Для оцінки змін у стисливості розчиненої речовини внаслідок її розчинення у воді було розраховано уявний молярний коефіцієнт стискання (ϕ''), за даними експериментально визначених густини та швидкості звуку в розчинах адоніту.

Розчини, які готували ваговим методом із двічі дистильованої води і адоніту із 99 % вмістом основної речовини, досліджувалися в температурному інтервалі $20 \div 80^\circ\text{C}$. Температуру підтримували за допомогою циркуляційного термостату серії LOIP LT 316. Коливання температури не перевищували $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Усі зважування проводили на аналітичних вагах «AS 220» з похибкою $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ г. Зокрема, були приготовані і досліджені, розчини з концентраціями 10; 20; 30; 40; 50 мас. %. Густина, у широкому інтервалі температур, вимірювали пікнометричним методом, а швидкість звуку імпульсно-фазовим методом на частоті 15 МГц. Методика проведення досліджень детально описана у [6, 7].

Адiabатичну стисливість системи β'' і розчинника (води) β_{S0} визначали за рівняннями:

$$\beta_s = \frac{1}{\rho c^2}, \text{ та } \beta_{S0} = \frac{1}{\rho_0 c_0^2},$$

де ρ – густина розчину, c – швидкість поширення ультразвуку у розчині, ρ_0 – густина розчинника, c_0 – швидкість поширення ультразвуку у розчиннику.

Уявний молярний коефіцієнт стискання φ_k розраховували за формулою:

$$\varphi_k = \frac{M}{\rho} (\beta_s - \beta_{s0}) + \frac{1000(\beta_{s0} - \beta_s)}{m},$$

де M – молярна маса адоніту (152,15 г/моль), m – молярність (моль/кг), ρ – густина розчину, β_s, β_{s0} – стисливості розчину та чистого розчинника відповідно.

Надлишкова стисливість ($\Delta\beta_s^E$), розрахована як:

$$\Delta\beta_s^E = \beta_s - \beta_{s0},$$

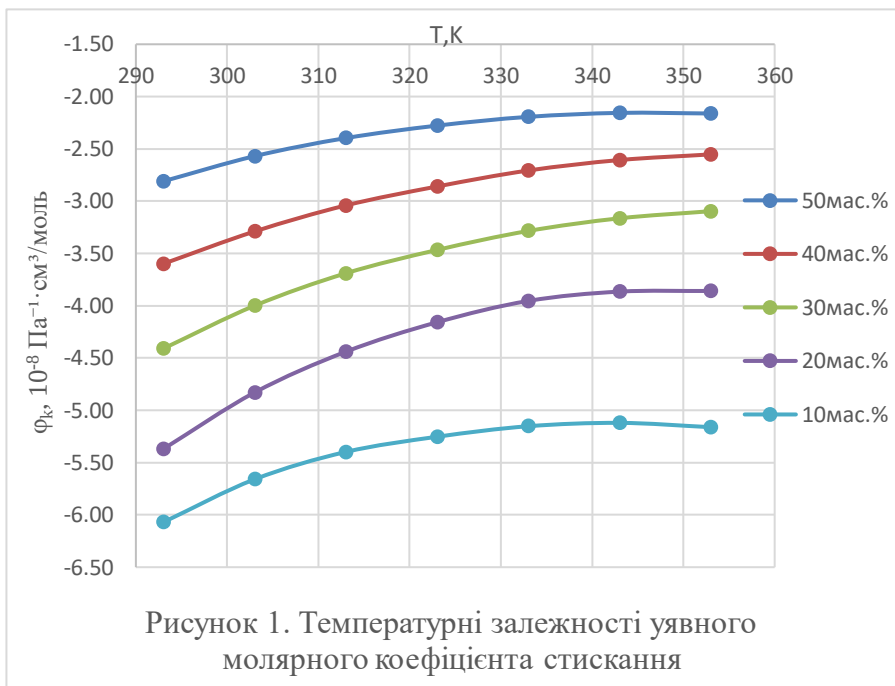
де β_s – адіабатична стисливість системи, β_{s0} – адіабатична стисливість розчинника (води). Значення густини і швидкості поширення звуку у воді взяті з [8].

Одержані нами значення φ_k є негативними в усьому дослідженому діапазоні температур (293–353 K) і концентрацій (0,73–6,57 моль/кг). Це вказує на домінування структурно утворювальних ефектів, які зумовлені водневим зв'язуванням між молекулами адоніту та води [9, 10].

На молекулярному рівні, адоніт – полігідроксильна сполука – може утворювати багато водневих зв'язків із молекулами води, спричиняючи локальне впорядкування та ущільнення структури розчинника, що знижує його стисливість. У області низьких концентрацій (≤ 10 мас %) такі ефекти домінують, оскільки кожна молекула адоніту оточена гідратаційною оболонкою, що веде до сильного зменшення загальної пружності системи ($\varphi_k < 0$) [11].

Із підвищенням концентрації відбувається перекриття гідратаційних оболонок, що послаблює структурування води, а за дуже високих концентрацій можуть розвиватися процеси структурування характерні для міжмолекулярних взаємодій типу адоніт-адоніт. У цьому випадку φ_k може наближатися до нуля або навіть змінювати знак [12].

Температурна залежність уявний молярного коефіцієнта стискання φ_k (див. рисунок 1) також узгоджується з цим поясненням: за підвищення температури водневі зв'язки послаблюються, що зменшує ефект впорядкування структури води й призводить до менш негативних або навіть позитивних значень φ_k [13].



Подібні результати були зроблені для еритритолу, ксиліту, сорбітолу та мальтитолу – багатоатомних спиртів, які мають спорідненість у структурі та здатності до водневого зв'язування [9, 14, 15].

Надлишкова стисливість ($\Delta\beta_s^E$) виявилася негативною для всіх досліджених концентрацій і температур. Найбільше від'ємне значення ($-1,85 \times 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$) було зафіксовано при 6,57 моль/кг і 293 К, що свідчить про максимальну структурованість системи за цих умов. Це узгоджується з аналогічними результатами для еритритолу та ксиліту [9, 14].

$\Delta\beta_s^E$, як і ϕ_k , відображає відхилення від ідеальної поведінки, і його негативні значення чітко вказують на ущільнення системи внаслідок специфічних міжмолекулярних взаємодій, таких як водневе зв'язування та гідрофільні ефекти.

Загалом, негативні значення ϕ_k та $\Delta\beta_s^E$ узгоджуються з концепцією структуроутворення, описаною в роботах [11] та [12], де багатоатомні спирти вказані як агенти, що підвищують впорядкованість водної структури на низьких концентраціях.

У роботі [9] одержані значення ϕ_k для водних розчинів еритритолу та ксиліту також були негативними в інтервалі 293,15–323,15 К, а в роботі [14] показано аналогічну поведінку для сорбітолу та мальтитолу. Одержані нами значення підтверджують, що адоніт поводить подібно до інших полігідроксильних сполук і що ϕ_k є надійним індикатором молекулярних взаємодій у розчині.

Отже, негативні значення ϕ_k та $\Delta\beta_s^E$ у водних розчинах адоніту свідчать про сильні міжмолекулярні взаємодії між розчинником і розчиненою речовиною, зумовлені гідратаційними ефектами. Зниження стисливості порівняно з чистою водою пояснюється

утворенням більш жорсткої, структурованої водної матриці навколо молекул адоніту. Поведінка адоніту відповідає загальній тенденції таких сполук, як еритритол, ксиліт, сорбітол і мальтитол у водних розчинах.

Література

1. Гуменюк Н. И., Лишнева В. Ю. Влияние реосорбилакта на реологические свойства крови у больных ишемической болезнью сердца и хроническим обструктивным бронхитом. *Укр. пульмонолог. журн.* 2003. № 3. С. 38–40.
2. Технологія борошняних кондитерських і хлібобулочних виробів : навч. посіб. / ред. Г. М. Лисюк. Суми : Університетська книга, 2013. 464 с.
3. Продукти харчування – Ефект поліолів URL : https://ukrayinska.libretexts.org/Хімія/Загальна_хімія/Книга... (10.05.2023)
4. Саєнко Р. О., Саєнко О. В., Свечнікова О. С. Адіабатична стисливість водних розчинів поліолів. *Український фізичний журнал* 2021. Т. 66, № 9. С. 779 – 783.
5. Руденко О. П., Саєнко О. В., Саєнко Р. О. Термодинамічні характеристики в'язкої течії водних розчинів ряду поліолів. *Український фізичний журнал*. 2020. Т. 65, № 9. С. 804–810.
6. Руденко О. П., Сперкач В. С., Експериментальні методи визначення поглинання звуку в рідинах // Метод. рек. для студ. фіз. спеціальностей. Полтава : 1992. 68 с.
7. Основи реології: Лабораторний практикум для студентів фізичного факультету зі спеціалізації «Молекулярна фізика» / [упоряд.: Л. А. Булавін, І. І. Адаменко, Г. М. Вербінська та ін]. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2001. 56 с.
8. Кухар В. І., Шпак В. П., Кордюма Ю. В. та ін. Фізико-хімічні величини: довідник / за ред. В. І. Кухаря. Київ : Наукова думка, 2001. 528 с.
9. Jiang, X., Zhu, C., & Ma, Y. (2013). Densities and Viscosities of Erythritol, Xylitol, and Mannitol in L-ascorbic Acid Aqueous Solutions at T = (293.15 to 323.15) K. *Journal of Chemical & Engineering Data*, **58**(11), 2970–2978.
10. Bernal, P., Brown, S., Mera, M., & Bouchibti, Y. (2019). Investigations to Explore Molecular Interactions and Sweetness Response of Polyhydroxy Compounds with Amino Acids in Aqueous Systems. *ACS Omega*, **4**(41), 17470–17480.
11. Mahendran, G., Palaniappan, L. (2009). Acoustical studies of some polyhydroxy compounds in aqueous medium. *Journal of Molecular Liquids*, **146**, 83–87.
12. Nain, A. K. (2008). Volumetric and compressibility studies of aqueous and non-aqueous solutions of polyols. *Journal of Chemical Thermodynamics*, **40**, 1217–1225.
13. Dash, U., Narasingh, R., & Swain, S. (2014). Ultrasonic investigations on some aqueous polyol systems at different temperatures. *Thermochimica Acta*, **589**, 153–159.

14. Wagle, D. V., & Shah, D. O. (2002). Compressibility and density measurements of polyols in aqueous solutions. *Fluid Phase Equilibria*, **199**, 231–239.
15. Ghauri, M. A., & Aminabhavi, T. M. (2003). Thermodynamic properties of aqueous solutions of some sugar alcohols. *J. Chem. Eng. Data*, **48**, 716–722.