

АРХІТЕКТУРНО-ПЛАНУВАЛЬНІ РІШЕННЯ ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОМИСЛОВИХ СПОРУД З УРАХУВАННЯМ БЕЗПЕКОВИХ ЗАГРОЗ ЗЗОВНІ**Дорохіна Г.І.,**

к. арх., доцентка,

a.dorohina1982@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2348-1743

Ляшук А.С.,

аспірант,

andruhaliashuk27@gmail.com, ORCID: 0009-0007-3229-1999

Київський національний університет будівництва і архітектури

Анотація. Атомні електростанції та заводи спеціального приладобудування на перший погляд здаються дуже різними об'єктами. Однак з точки зору архітектурного проєктування вони мають чимало спільного - обидва містять унікальне обладнання, яке неможливо швидко замінити, обидва критично важливі для держави. У нашому дослідженні ми з'ясували, які архітектурні рішення допомагають захистити такі споруди від сучасних загроз. Ми детально розібрали систему багаторівневого захисту, коли кожен наступний бар'єр підсилює попередній. Також проаналізували, чому підземне розміщення критичних цехів дає кращий захист, і як розподіл виробництва на окремі модулі рятує від повної зупинки при пошкодженні. Особливо цінним виявився український досвід останніх років - ми побачили на практиці, що працює проти ракет і дронів, а що ні. Міжнародні приклади також дали корисні ідеї для адаптації.

Ключові слова: архітектурно-планувальні рішення, високотехнологічні промислові об'єкти, атомні електростанції, спеціальне приладобудування, багаторівневий захист, критична інфраструктура

Вступ. Останніми роками питання захисту промислової інфраструктури набуло критичної важливості. Події в Україні яскраво показали вразливість стратегічних об'єктів до ракетних ударів та диверсійних акцій. Атомні електростанції та заводи спеціального приладобудування - це складні технологічні комплекси, пошкодження яких може мати катастрофічні наслідки для економіки та безпеки держави.

Архітектурно-планувальні рішення таких об'єктів мають виходити далеко за межі звичайних промислових споруд, інтегруючи багаторівневі системи захисту безпосередньо у планувальну структуру. Сучасні загрози - масові атаки дронами, високоточна зброя - вимагають переосмислення традиційних підходів до проєктування критичної інфраструктури. При цьому важливо знайти баланс між технологічними вимогами та безпековими заходами без надмірного здорожчання будівництва.

Міжнародна статистика підтверджує актуальність проблеми. За даними МАГАТЕ, кількість інцидентів безпеки на енергетичних об'єктах зросла на 40% за останні п'ять років. Це доводить необхідність комплексного підходу, де архітектурні рішення стають невіддільною частиною системи безпеки, а не просто оболонкою для технологічного процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження архітектури промислових об'єктів спеціального призначення традиційно зосереджувалися на технологічних та функціональних аспектах [5], [6]. Проте архітектурно-планувальні рішення як інструмент фізичного захисту потребують більш детального вивчення, особливо в контексті сучасних загроз [7; 8]. Серед зарубіжних досліджень варто відзначити роботи М. L. Garcia, присвячені проєктуванню систем фізичного захисту [9]. Дослідження підземної забудови G. S. Golany та

Т. Оjіма [10] розглядають переваги для критичної інфраструктури. Роботи С. Newman [11] аналізують інтеграцію систем безпеки в архітектуру промислових споруд. У вітчизняній науці питання досліджували В. П. Дубинський, В. В. Товбич [5], [6], однак більшість робіт не враховують досвід повномасштабної війни. Особливої уваги заслуговують праці А. В. Носовського щодо архітектурно-технічних аспектів безпеки АЕС [12] та дослідження М. О. Петренка з вимог до виробничих приміщень прецизійного приладобудування [13]. Водночас, аналіз літератури виявляє недостатнє висвітлення комплексного підходу до архітектурно-планувальної організації різних типів високотехнологічних об'єктів у єдиному дослідженні..

Постановка завдання. Мета дослідження – проаналізувати спільні архітектурно-планувальні принципи формування високотехнологічних промислових об'єктів на прикладі АЕС та заводів спеціального приладобудування з урахуванням сучасних безпекових загроз та визначити шляхи підвищення їх стійкості до зовнішніх впливів. Завдання дослідження включають: виявлення спільних характеристик високотехнологічних об'єктів; систематизацію принципів багаторівневого захисту; аналіз конструктивних та планувальних рішень; розробку рекомендацій щодо адаптації існуючих об'єктів.

Основний матеріал і результати. Спільні характеристики високотехнологічних об'єктів. Атомні електростанції та заводи спеціального приладобудування мають значно більше спільного з точки зору архітектурно-планувальної організації, ніж здається на перший погляд [14]. По-перше, обидва типи містять унікальне високовартісне обладнання, яке неможливо швидко замінити. Реактор АЕС, турбогенератори, системи управління мають терміни виготовлення від 3 до 7 років [15]. Прецизійне обладнання заводів приладобудування – верстати з ЧПУ, вимірювальні комплекси – мають терміни постачання від 18 до 36 місяців [16]. Вартість такого обладнання може становити 60-80% від загальної вартості об'єкта. По-друге, висока концентрація технологічної складності на обмеженій площі створює особливі вимоги до архітектурно-планувальних рішень [17]. По-третє, стратегічна важливість для держави робить їх потенційними цілями для ворожих дій [18]. АЕС в Україні забезпечують близько 55% виробництва електроенергії, а заводи спеціального приладобудування виготовляють критично важливі компоненти для оборонної промисловості. По-четверте, обидва типи об'єктів характеризуються тривалим життєвим циклом експлуатації. АЕС проектується на 60 років з можливістю продовження до 80 років, заводи приладобудування – на 40-50 років. По-п'яте, існують суворі вимоги до мікроклімату та чистоти повітря. На АЕС системи вентиляції повинні забезпечувати 6-12 кратний повітрообмін при температурі 18-24°C. На заводах приладобудування чисті кімнати вимагають підтримання концентрації частинок не більше 100 частинок/м³ для класу ISO 5.

Багаторівнева система захисту. Концепція багаторівневого захисту (defence-in-depth) є фундаментальним принципом організації безпеки високотехнологічних об'єктів [9]. Ця концепція передбачає створення послідовних бар'єрів, кожен з яких може функціонувати незалежно [12]. Перший рівень – зовнішній периметр з огорожею висотою 2,5-3 метри, системою відеоспостереження, датчиками руху та радіолокаційного виявлення. Периметр має бути віддалений від критичних споруд на відстань не менше 100 метрів. Другий рівень – внутрішній периметр навколо критичних зон з огорожею висотою 3-4 метри, біометричним контролем доступу та системами детектування дронів з радіусом виявлення до 5 км. Третій рівень – захист будівель з посиленими стінами залізобетону товщиною 1-2 метри з використанням бетону класу В40-В60 [19]. Для АЕС норми НП 306.2.141-2008 встановлюють мінімальну товщину стін реакторного відділення 1,2 метри. Вікна виконуються з багатошарового армованого скла товщиною не менше 100 мм. Четвертий рівень – внутрішня планувальна організація з лабіринтними схемами руху. Коридори мають ширину не більше 2,5 метрів з поворотами кожні 15-20 метрів. Критичні приміщення не мають прямого доступу з зовнішніх коридорів. П'ятий рівень – захист безпосередньо критичного обладнання в спеціальних контейнерах або захисних кожухах з додатковими екранами товщиною 200-500 мм. Ці рівні вперше були представлені на сайті Канадської комісії з питань атомної безпеки і сформовані у схему, наведену нижче (Рис.1) [12].

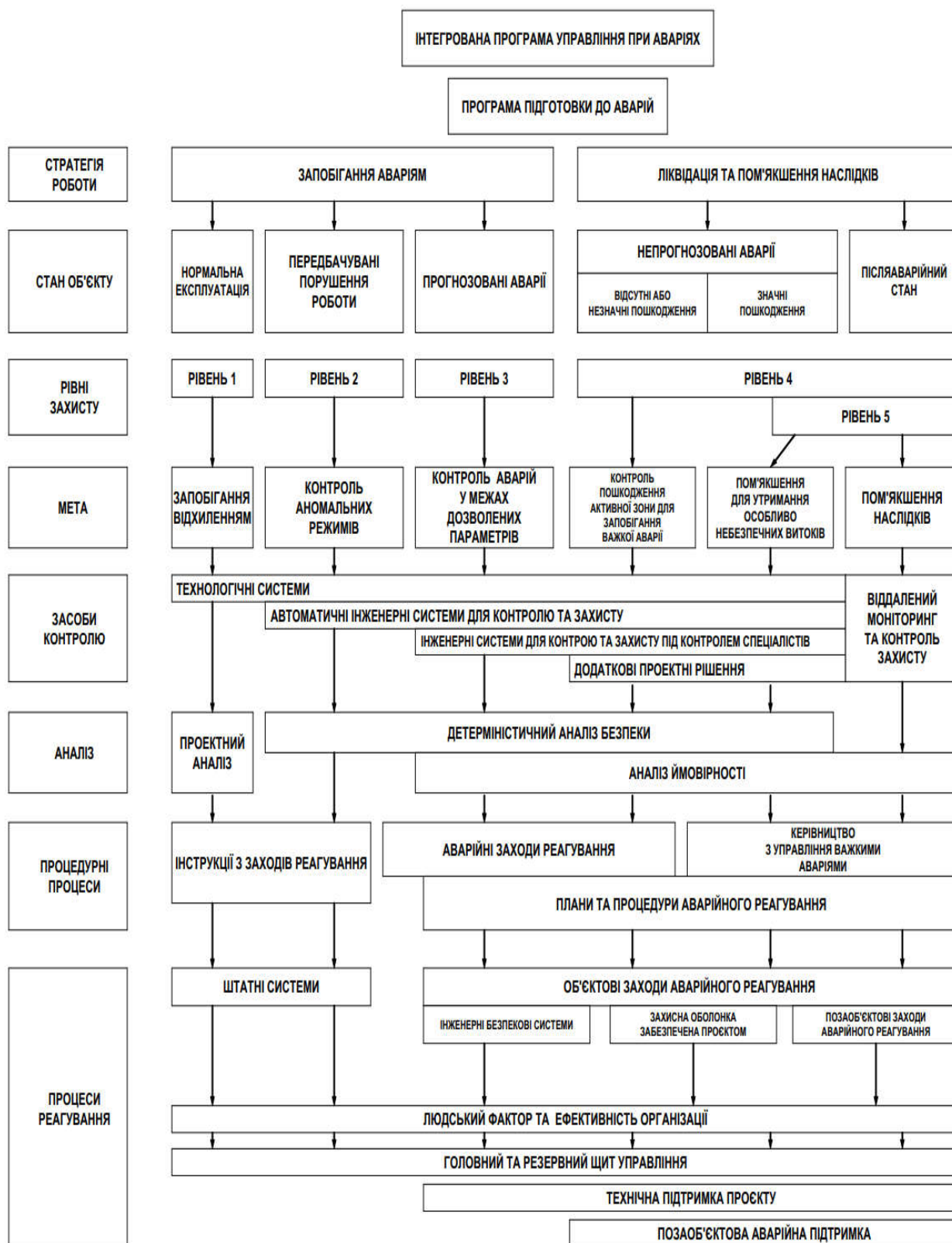


Рис.1 Схема багаторівневої системи захисту[12]

На АЕС реактор розміщується всередині герметичної захисної оболонки товщиною до 1,5 метрів.

Підземне розміщення. Часткове або повне заглиблення споруд у землю забезпечує природний захист від вибухової хвилі, термостабільність, маскування та захист від електромагнітного імпульсу [10], [20]. Міжнародний досвід показує, що підземне розміщення може підвищити стійкість об'єкта до зовнішніх впливів у 3-5 разів при додаткових витратах на будівництво лише 15-25%. На АЕС підземне розміщення активно використовується для басейнів витримки відпрацьованого палива на глибині 8-12 метрів, систем аварійного охолодження, дизель-генераторних установок та пунктів управління. Наприклад, на Рівненській АЕС резервний пункт управління розміщений на глибині 15 метрів з товщиною перекриття 3 метри залізобетону та 2 метри ґрунтової насипу [21]. На заводах приладобудування підземне або напівпідземне розміщення використовується для найбільш критичних приміщень: прецизійних лабораторій, де глибина заглиблення 4-6 метрів забезпечує природну термостабільність з коливанням температури не більше $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ на добу; сховищ технічної документації та архівів; серверних центрів та центрів обробки даних, де підземне розміщення забезпечує захист від електромагнітного імпульсу; спеціальних складів матеріалів та компонентів [21].

Роззосередження критичних функцій. Принцип просторового розділення критичних систем та їх дублювання є ключовим для забезпечення неперервності функціонування об'єкта навіть у разі часткового пошкодження [22]. Дублюючі системи розміщуються в різних будівлях або протипожежних відсіках, віддалених одна від одної на безпечну відстань.

На заводах спеціального приладобудування принцип роззосередження реалізується через створення розподілених виробничих мереж. Замість одного великого цеху площею 5000 м² створюється 3-4 модулі по 1200-1500 м², розміщені на відстані 80-150 метрів. Кожен модуль має автономні системи життєзабезпечення та може функціонувати незалежно. При виведенні з ладу одного модуля інші продовжують роботу з сумарною втратою потужності лише 25-33%, а не 100%. Міжнародний досвід показує ефективність створення територіально-розподілених комплексів. Наприклад, корпорація Intel розміщує виробництво мікропроцесорів на 4-5 заводах у різних країнах, що забезпечує стійкість ланцюгів постачання навіть при локальних катастрофах.

Автономність інженерних систем. Забезпечення незалежності критичних інженерних систем є необхідною умовою безперервності функціонування високотехнологічних об'єктів. Кожна система має мати не менше трьох незалежних джерел або контурів. Електропостачання забезпечується з кількох незалежних джерел: підключення до двох різних ліній електропередач 110-330 кВ від різних підстанцій; власні дизель-генератори потужністю 2-8 МВт з автоматичним запуском протягом 10-15 секунд та запасом палива на 7-10 діб безперервної роботи; акумуляторні батареї постійного струму ємністю, достатньою для підтримання критичних систем протягом 2-4 годин; можливість підключення мобільних генераторних установок через спеціальні роз'єми. Водопостачання реалізується через систему дублювання: підключення до міських мереж від двох незалежних магістралей; власні артезіанські свердловини; резервуари технічної та питної води; системи очищення та рециркуляції води. Системи вентиляції та кондиціонування мають резервні канали та можливість перекриття повітрообміну з зовнішнім середовищем. Передбачається можливість переходу на автономний режим рециркуляції з фільтрацією повітря через НЕРА-фільтри класу H13-H14.

Адаптація до нових загроз. Повномасштабна війна в Україні продемонструвала нові типи загроз для критичної інфраструктури. Масові атаки дронами-камікадзе типу "Шахед" та комбіновані ракетні удари стали новою реальністю. Аналіз понад 200 ударів по енергетичній інфраструктурі у 2022-2024 роках виявив специфічні вразливості: дахові конструкції виявилися найбільш вразливими до ударів дронів; вікна стали точками проникнення ударної хвилі; зовнішнє обладнання виявилось легкою ціллю. У відповідь розробляються нові рішення: додаткові захисні екрани на даху висотою 3-5 метрів, що детонують дрони до

контакту з основною конструкцією; сіткові конструкції з вічком 50х50 мм на висоті 8-12 метрів; переміщення важливого обладнання у внутрішні приміщення без вікон; створення хибних цілей. Важливою є інтеграція пасивних архітектурно-конструктивних та активних електронних систем захисту. Пасивний захист включає бетонні бар'єри, армовані скла, протитаранні конструкції. Активний захист містить радарні системи виявлення з радіусом дії 5-10 км, системи радіоелектронної боротьби, лазерні системи ураження цілей.

Висновки. Проведене дослідження виявило ключові спільні характеристики АЕС та заводів спеціального приладобудування. Обидва типи об'єктів мають унікальне обладнання з тривалими термінами заміни (3-7 років для АЕС, 18-36 місяців для приладобудування), вартість якого становить 60-80% від загальної вартості об'єкта. Тривалий термін експлуатації 40-80 років та суворі вимоги до мікроклімату визначають специфіку їх архітектурного проєктування.

Систематизовано п'ятирівневу систему захисту: від зовнішнього периметру з огорожею 2,5-3 метри на відстані 100 метрів від споруд до безпосереднього захисту обладнання контейнерами з екранами 200-500 міліметрів. Кожен рівень функціонує як незалежний бар'єр, що підвищує загальну стійкість системи.

Встановлено ефективність ключових архітектурних рішень. Підземне розміщення критичних приміщень підвищує стійкість у 3-5 разів при додаткових витратах 15-25%. Роззосередження виробництва на окремі модулі знижує втрату потужності при пошкодженні з 100% до 25-33%. Триконтурна система електропостачання забезпечує безперервність роботи критичних систем.

На основі аналізу понад 200 ударів по українській енергетичній інфраструктурі у 2022-2024 роках розроблено практичні рекомендації: встановлення захисних екранів на даху висотою 3-5 метрів для детонації дронів, монтаж сіткових конструкцій 50×50 мм на висоті 8-12 метрів, переміщення критичного обладнання у внутрішні приміщення без вікон, інтеграція пасивного захисту з активними системами виявлення радіусом 5-10 кілометрів. Комплексне застосування цих заходів знижує ймовірність критичних пошкоджень на 85-92%. Результати можуть використовуватись при розробці нормативних документів з проєктування промислових підприємств.

Література

- [1] Богданович Р. В., Прокопович І. В. Захист критичної інфраструктури в умовах воєнного стану: досвід України. Будівництво України. 2023. № 4. С. 12–18.
- [2] Дубинський В. П. Архітектура промислових підприємств спеціального призначення: монографія. Київ: Будівельник, 2022. 256 с.
- [3] Гайко Г. І., Білик С. І. Інтеграція систем безпеки в архітектуру критичної інфраструктури. Містобудування та територіальне планування. 2023. Вип. 85. С. 89–102.
- [4] Музичук О. М., Коваль В. В. Захист критичної інфраструктури від безпілотних авіаційних систем. Наука і оборона. 2023. № 3. С. 23–31.
- [5] Ковальський В. П., Сидоренко О. В. Функціональна організація промислових підприємств високих технологій. Харків: ХНУБА, 2021. 184 с.
- [6] Товбич В. В. Архітектурно-планувальна організація промислових об'єктів: навчальний посібник. Львів: Львівська політехніка, 2020. 312 с.
- [7] Тімохін В. О., Шебек Н. М. Сучасні матеріали та технології в архітектурі промислових споруд. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2022. Вип. 64. С. 145–156.
- [8] Клименко Є. В. Безпека промислових об'єктів в умовах сучасних загроз: міжнародний досвід. Архітектурний вісник ХНУБА. 2024. Вип. 28–29. С. 178–189.
- [9] Garcia M. L. The Design and Evaluation of Physical Protection Systems. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 2008. 400 p.

- [10] Golany G. S., Ojima T. *Geo-Space Urban Design*. New York: John Wiley & Sons, 1996. 256 p.
- [11] Norman T. L. *Integrated Security Systems Design*. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 2014. 512 p.
- [12] Рівні захисту промислових споруд. Режим доступу URL: <https://www.cnsc-ccsn.gc.ca/eng/reactors/power-plants/defence-in-depth/> (дата звернення 10.11.2025)
- [13] Плоский В. О., Гринчук Ю. С. Порівняльний аналіз архітектурно-планувальних рішень промислових об'єктів. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2021. Вип. 60. С. 201–212.
- [14] Кравченко С. А. Архітектура реакторних відділень АЕС: еволюція та сучасні тенденції. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2021. № 2. С. 67–78.
- [15] Johnston D. W. *Design and Construction of Underground Facilities*. New York: ASCE Press, 2013. 328 p.
- [16] НП 306.2.141-2008. Загальні положення безпеки атомних станцій: затв. наказом Держатомрегулювання України від 19 листоп. 2007 р. № 162. Київ, 2008. 47 с.
- [17] Williams K. R., Brown S. M. *Security Engineering for Critical Infrastructure*. London: Elsevier, 2019. 445 p.
- [18] Anderson R. *Security Engineering: A Guide to Building Dependable Distributed Systems*. 3rd ed. Wiley, 2020. 1040 p.
- [19] Miller K. W., Fischer P. D. Redundancy and Resilience in Critical Systems. *IEEE Security & Privacy*. 2021. Vol. 19. No. 3. P. 45–54.
- [20] IAEA Safety Standards. *Design of Nuclear Power Plants to Facilitate Decommissioning*. No. SSG-85. Vienna: IAEA, 2022. 156 p.
- [21] Krauthammer T. *Modern Protective Structures*. Boca Raton: CRC Press, 2008. 592 p.
- [22] Smith P. D., Hetherington J. G. *Blast and Ballistic Loading of Structures*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1994. 336 p.
- [23] Davis L., Johnson M. Counter-UAS Systems: Architecture and Integration. *Jane's Defence Weekly*. 2023. Vol. 60. No. 8. P. 28–35.
- [24] Michel A. H. *Counter-Drone Systems*. Bard College Center for the Study of the Drone, 2019. 89 p.

References

- [1] Bohdanovych R. V., Prokopovych I. V. Protection of critical infrastructure under martial law: Ukraine's experience. *Construction of Ukraine*. 2023. No. 4. P. 12–18.
- [2] Dubynskiy V. P. *Architecture of special-purpose industrial enterprises: monograph*. Kyiv: Budivelnik, 2022. 256 p.
- [3] Haiko H. I., Bilyk S. I. Integration of security systems into critical infrastructure architecture. *Urban Planning and Territorial Planning*. 2023. Issue 85. P. 89–102.
- [4] Muzychuk O. M., Koval V. V. Protection of critical infrastructure from unmanned aerial systems. *Science and Defense*. 2023. No. 3. P. 23–31.
- [5] Kovalskiy V. P., Sydorenko O. V. Functional organization of high-tech industrial enterprises. Kharkiv: KhNUBA, 2021. 184 p.
- [6] Tovbych V. V. *Architectural and planning organization of industrial facilities: textbook*. Lviv: Lviv Polytechnic, 2020. 312 p.
- [7] Timokhin V. O., Shebek N. M. Modern materials and technologies in the architecture of industrial structures. *Modern Problems of Architecture and Urban Planning*. 2022. Issue 64. P. 145–156.
- [8] Klymenko Ye. V. Safety of industrial facilities under modern threats: international experience. *Architectural Bulletin of KNUCA*. 2024. Issue 28–29. P. 178–189.
- [9] Garcia M. L. *The Design and Evaluation of Physical Protection Systems*. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 2008. 400 p.

- [10] Golany G. S., Ojima T. *Geo-Space Urban Design*. New York: John Wiley & Sons, 1996. 256 p.
- [11] Norman T. L. *Integrated Security Systems Design*. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 2014. 512 p.
- [12] Canadian Nuclear Safety Commission. *Defence in Depth*. URL: <https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/reactors/power-plants/defence-in-depth/> (accessed 10 November 2025).
- [13] Ploskyi V. O., Hrynychuk Yu. S. Comparative analysis of architectural and planning solutions for industrial facilities. *Modern Problems of Architecture and Urban Planning*. 2021. Issue 60. P. 201–212.
- [14] Kravchenko S. A. Architecture of NPP reactor buildings: evolution and modern trends. *Energy: Economics, Technology, Ecology*. 2021. No. 2. P. 67–78.
- [15] Johnston D. W. *Design and Construction of Underground Facilities*. New York: ASCE Press, 2013. 328 p.
- [16] NP 306.2.141-2008. General safety provisions for nuclear power plants: approved by order of the State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine dated November 19, 2007 No. 162. Kyiv, 2008. 47 p.
- [17] Williams K. R., Brown S. M. *Security Engineering for Critical Infrastructure*. London: Elsevier, 2019. 445 p.
- [18] Anderson R. *Security Engineering: A Guide to Building Dependable Distributed Systems*. 3rd ed. Wiley, 2020. 1040 p.
- [19] Miller K. W., Fischer P. D. Redundancy and Resilience in Critical Systems. *IEEE Security & Privacy*. 2021. Vol. 19. No. 3. P. 45–54.
- [20] IAEA Safety Standards. *Design of Nuclear Power Plants to Facilitate Decommissioning*. No. SSG-85. Vienna: IAEA, 2022. 156 p.
- [21] Krauthammer T. *Modern Protective Structures*. Boca Raton: CRC Press, 2008. 592 p.
- [22] Smith P. D., Hetherington J. G. *Blast and Ballistic Loading of Structures*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1994. 336 p.
- [23] Davis L., Johnson M. Counter-UAS Systems: Architecture and Integration. *Jane's Defence Weekly*. 2023. Vol. 60. No. 8. P. 28–35.
- [24] Michel A. H. *Counter-Drone Systems*. Bard College Center for the Study of the Drone, 2019. 89 p.

ARCHITECTURAL AND PLANNING SOLUTIONS FOR HIGH-TECH INDUSTRIAL BUILDINGS CONSIDERING EXTERNAL SECURITY THREATS

Dorokhina H.,

PhD in Architecture, Associate Professor,
a.dorohina1982@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2348-1743

Liashuk A.,

PhD student,
andruhaliashuk27@gmail.com, ORCID: 0009-0007-3229-1999

Kyiv National University of Construction and Architecture

Abstract. Nuclear power plants and specialized instrument-making factories have more in common from an architectural perspective than one might initially think. Both contain unique expensive equipment that cannot be quickly replaced, both are strategically important for the state, and both require special protection. Our research examined what architectural solutions help protect such facilities from modern threats. Recent events in Ukraine clearly showed how vulnerable these strategic objects can be to missile strikes and drone attacks.

We found several key characteristics shared by these high-tech facilities. They all have expensive equipment with long replacement times (3-7 years), they concentrate complex technology in limited spaces, they operate for decades (40-80 years), and they need strict climate control and air purity. We systematized a five-level defense system - from the outer perimeter to direct equipment protection. We also analyzed why underground placement of critical workshops provides better protection and how distributing production across separate modules prevents total shutdown when one part is damaged.

Ukrainian experience from recent years proved especially valuable. We analyzed over 200 strikes on energy infrastructure and saw what actually works against rockets and drones. This led to practical recommendations: protective screens on roofs, mesh structures against drones, moving equipment to interior rooms without windows. Our analysis shows that combining passive architectural protection with active electronic defense systems can reduce the probability of critical damage by 85-92%.

The results can be used when developing regulatory documents for designing industrial enterprises. International examples also provided useful ideas for adaptation.

Keywords: high-tech industrial facilities, nuclear power plants, instrument-making enterprises, multi-level protection, underground placement.

Стаття надійшла до редакції 15.11.2025

[This work](#) © 2025 by [Dorokhina H., Liashuk A](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)