

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ТА ЕКОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ЯДЕРНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

¹ Національний авіаційний університет, м. Київ

² Київський національний університет будівництва і архітектури

³ Одеський національний політехнічний університет

Анотація

Проведено технологічний та екологічний аналіз ядерних енергетичних реакторних установ (ЯЕРУ) типу ВВЕР, АР-1000 та МР-160 на основі яких планується подальший розвиток ядерної енергетики України.

Ключові слова: ядерна безпека, екологічна безпека, ядерний реактор ВВЕР, малий модульний реактор МР-160, атомна електростанція.

Abstract

Technological and ecological analysis of nuclear power reactor units (NERUs) of WWER, AR-1000 and MR-160 type has been carried out, on the basis of which further development of Ukraine's nuclear energy is planned.

Key words: nuclear safety, ecological safety, WWER nuclear reactor, small modular reactor MR-160, AR-1000, nuclear power plant.

Вступ

На сьогодні існують лінійка модернізованих старих технологій та відповідних проектів, які отримали назву покоління типу 3+. Ці проекти мають підвищений рівень надійності та безпеки. Американська технологія АР-1000 компанії Vestinhaus є єдиною з технологій реакторів покоління 3+, яка ліцензована комісією з ядерного регулювання в США. Впровадження в Україні апробованої реакторної установки покоління 3+ на базі ядерного реактора АР-1000 потужністю до 1100 МВт (ел.) з системами пасивної безпеки, дають змогу скоротити терміни і вартість будівництва, забезпечити найвищий рівень технологічної та екологічної безпеки, надійну роботу АЕС та отримати новий важливий елемент безвуглецевої енергетики.

Чотири енергоблоки з АР-1000, вже працюють у Китаї і показали скорочені терміни планово-попереджувальних ремонтів та процесів перезавантаження ядерного палива, покращення коефіцієнту встановленої потужності. В США на АЕС Vogtle завершується будівництво останнього з 4-х енергоблоків з АР-1000.

Показовою є комп'ютерна частина проекту АР-1000. Компанія Westinghouse, більше як за 8 років, створила детальну 3D модель прототипного реактора АР-600. А за допомогою програм Primavera підготувала план будівництва. Потім ці програми були об'єднані в 4D і створені засоби візуалізації 4D моделей будівництва. Віртуальна модель CAVE - це кімната 3x3x2,8 м, де підлога і стіни є екранами, координованими системою комп'ютерів. Людина всередині в спеціальних окулярах, синхронізованих з системою, бачить стерео зображення і може віртуально ходити по АЕС у реальних чи зменшених/збільшених розмірах. Під час експлуатації енергоблоків, влаштований в CAVE імітатор дозиметра в реальному часі віртуально можна розмішувати на перчатках чи одязі і оптимізувати радіаційно брудні роботи для мінімізації дозових навантажень на персонал.

Що ж стосується українського вибору малих модульних реакторів МР-160 для заміни вуглецевих теплових електростанцій і для збільшення маневрових потужностей в Об'єднаній енергосистемі України, то тільки вони в липні 2021 року отримали в своєму класі ліцензію Комісії з ядерного регулювання США.

Тому головною метою роботи є технологічний та екологічний аналіз головних характеристик технологічної, експлуатаційної і, як наслідок, екологічної безпеки в контексті прогресивних досягнень на головних напрямках розробки та створення ЯЕРУ з AP-1000 та МР-160.

Результати дослідження

Детальний технологічний аналіз ядерних енергетичних реакторних технологій типу ВВЕР, які знаходяться на сьогодні в експлуатації і світова кількість яких становить на сьогодні понад 80% всього енергетичного реакторного парку планети, приводить до наступних висновків щодо їх ядерної, експлуатаційної і, як наслідок, екологічної безпеки:

1. У всіх діючих реакторів є серйозні недоліки в частині ядерної та екологічної безпеки, які не можна усунути шляхом модернізації їх захисних та протиаварійних систем.

2. Як показує історія ядерної енергетики, кожна, відома на сьогодні, важка запроектна ядерна аварія на різних АЕС світу може привести до радіоактивного викиду, еквівалентного декільком Чорнобилям і Фукусім. Однак, незважаючи на цей досвід, уроки кожної з них підтверджують існування реального нерозуміння фізичної суті таких катастроф і наслідків самої класифікації ядерних аварій на АЕС [1]. Тому у світового ядерного співтовариства є пранення створити нові типи енергетичних абсолютно безпечних ядерних реакторів.

3. Уроки, усіх без виключення ядерних катастроф на ядерних об'єктах, говорять про небезпечність людського фактора та про відсутність необхідного найвищого рівня ядерної культури.

4. Багато країн продовжили, або планують продовжити експлуатацію своїх ЯЕРУ на 10-20 і більше років відносно встановленого для них проектного ресурсу.

5. Модернізація діючих у світі ядерних реакторів здійснюється в напрямку збільшення тиску в реакторі, підвищення робочої температури і збільшення відсотка вигорання палива. Але при цьому принципових фізичних змін в інженерних та конструкторських рішеннях не відбувається. Стару електротехніку та прилади конструктори замінюють на нові покоління силового та електронного апаратурного обладнання [1].

6. Експлуатовані сьогодні в світі реактори неможливо в необхідній мірі захистити від терористів. Падіння авіалайнера на будівлю реактора і інші сценарії терористичної атаки, можуть привести до великої запроектно ядерної аварії. Крім того існує також небезпека зовнішніх впливів екстремальних природних явищ - землетрусів, повеней, смерчів, змін глобального клімату та геокосмічних явищ.

7. Процеси виробництва ядерного палива та переробки опроміненого в реакторах ядерного палива (ОЯП) пов'язані з масштабними екологічними загрозами. Розроблюване міжнародними зусиллями четверте покоління енергетичних ядерних реакторів G-4 в певній мірі продовжує цю тенденцію. Виробництво електроенергії на сучасних АЕС а в перспективі на АЕС з реакторами четвертого покоління G-4, також не дає абсолютних гарантій щодо можливого неконтрольованого поширення ядерних матеріалів.

На відміну від абсолютно переважної кількості реакторів типу ВВЕР на АЕС світу, технологія AP-1000 є реакторною технологією Покоління III+ і має наступні особливості в частині її експлуатаційної, ядерної та екологічної безпеки:

1. Повністю комп'ютеризований процес проектування і планування будівництва з координацією різних видів діяльності при спорудженні енергоблоків AP-1000.

2. Охолодження активної зони і корпусу реактора AP-1000 здійснюється за допомогою пасивних систем безпеки, значно простіших і дешевших за активні насосні системи охолодження. В AP-1000, в порівнянні з діючими на АЕС ЯЕРУ типу ВВЕР з аналогічною потужністю, вдалося зменшити кількість клапанів - на 50%, трубопроводів - на 80-83%, кабелів - на 70-87%, насосів - на 35%, а обсяг сейсмостійких будівель - на 45-50%. Наприклад, число насосів у випадку енергоблоку AP-1000 становить 180 шт. Відомо, що багато техногенних аварій, як і природних катастроф, носить системний характер - велика катастрофічна подія відбувається не в силу несприятливого збігу обставин, а в силу притаманної складним системам невідвратної «схильності» до катастрофічної поведінки. Тому, таке зменшення кількості технічних систем, вузлів и комунікаційних елементів значно спрощує технічну та технологічну складність і перевантаженість як самої ЯЕРУ так і всієї АЕС в цілому. І в результаті повинно зменшити число відмов обладнання і відповідно кількість аварійних подій і ситуацій.

3. Розширено кількість елементів в системах технічного водопостачання і дизель-генераторів, що виготовляються за більш жорсткими нормами.

4. ЯЕРУ з AP-1000 складається з 50 великих і 250 малих модулів. Використання модульних конструкцій при спорудженні АЕС. Стандартні малі модулі розміром 3,7x3,7x24,4 м і вагою 80 т можна перевозити залізницею. Прикладом великого модуля є сталеві модулі захисної оболонки, з них найбільш важкий кільцевої модуль діаметром 39,6 м важить 658 т. Всі ці модулі серійно виготовляють на заводі і транспортують на площадку АЕС.

Отже габаритно-масові характеристики обладнання для АЕС на базі ЯЕРУ AP-1000 цілком придатні для їх транспортування на власному українському літаку «Мрія», який здатний доставити в Україну практично всі модулі AP-1000.

5. Використання виготовлених у заводських умовах модулів при спорудженні АЕС дозволяє: - зменшити об'єми трудовитрат на будівельно-промисловому майданчику АЕС; підвищити якість контролю при виготовленні модулів, який якісніше забезпечується в заводських умовах; організувати та реалізувати паралельне проведення багатьох різних робіт, які традиційно виконуються послідовно; скоротити терміни спорудження АЕС.

6. Гарантувати неможливість на МР-160, як і на усіх інших ММР, радіаційних аварій та катастроф можна тільки в тому випадку, якщо проектна аварійна чи важка запроектна аварія неможлива в силу закладених в його роботу фізичних законів. Але, нажаль, серед усіх проектів проектів створення ММР такі інженерно-фізичні принципи та конструкції не реалізуються.

7. Задачі забезпечення експлуатаційної та радіоекологічної безпеки для МР-160, як і для інших ММР, зводяться до отримання та обґрунтування максимально низької розрахункової ймовірності подій, пов'язаних з аварією, а також максимальна низької ймовірності радіаційних наслідків з дотриманням усіх вимог національних та міжнародних нормативних та рекомендаційних документів, які приймаються конкретною державою та її громадянським суспільством.

Український вибір реакторів МР-160 аргументується, зокрема, можливістю підвищення економічності виробництва електроенергії за рахунок зниження капітальних і експлуатаційних витрат; скорочення термінів будівництва; можливість більш швидкого повернення інвестицій в порівнянні з створенням енергоблоків великої потужності. Разом з цим також гарантується висока надійності і безпека; можливість наближення джерела енергії до споживачів, включаючи енергозабезпечення віддалених і специфічних територій зі складним географічним розташуванням та, що дуже важливо для української енергетики, можливість роботи енергоблоків в маневреному режимі видачі електричної енергії. Однак, в певному сенсі, це декларативні переваги, які повинні досліджуватися і підтверджуватися для кожного конкретного даних проекту ММР, а також для умов енергосистем конкретної країни.

У залежності від конструкції ММР можуть генерувати потужності від 50-и до 300 МВт (ел.). Завдяки модульній конструкції такі реактори мають підвищену безпеку завдяки використанню пасивних та інтегрованих систем. Виходячи з того, що МР-160 працює на урановому паливі збагаченому менше 20-и %, з їхнім відпрацьованим ядерним паливом слід поводитися так само, як і з опроміненим паливом для великих реакторів, використовуючи існуючу інфраструктуру. Однак для вирішення цих складних і екологічно важливих питань необхідні додаткові нові науково-дослідницькі, інженерно-фізичні та експериментально-конструкторські роботи у сферах технологій ядерного паливного циклу для ММР.

У документі Канадської комісії з ядерної безпеки стверджується, що "Концепції СМР, хоча і базуються на досвіді експлуатації існуючих проектів, пропонують нові підходи, що можуть вплинути на впевненість у тому, як АЕС працюватиме не тільки в звичайних умовах, але і в умовах аварії, в яких передбачуваність має першочергове значення для безпеки. Ці нові підходи та відповідні невизначеності викликають регуляторні питання під час процесу ліцензування" [2]. Таким чином, Комісія запропонувала застосувати ступінчастий підхід до безпеки та безпеки, в якому суворість застосованих заходів та умов контролю є сумірною з ризиком втрати контролю [3]. Цей підхід технологічно нейтральний, але водночас інформує про реально існуючі ризики.

Висновки

1. Процеси створення та впровадження нових технологій ММР і в т.ч. МР-160, в умовах конкретної держави, пов'язані з нагальною необхідністю вирішення багатьох технічних та технологічних питань, проведення різних додаткових досліджень і обґрунтувань з позицій

абсолютного пріоритету безпеки [1, 4]. Тому потрібні ще роки, щоб оцінити реалістичність реалізації цієї технології в Україні.

2. Реактори ММР мають певні переваги в порівнянні з великими ядерними реакторами. Модульність побудови ММР та їх відносна компактність дає можливість застосувати принцип "економії кратних рішень" [5] для поступового нарощування потужності АЕС і уникнути великих фінансових ризиків.

3. Малі модульні реактори не є принципово новими в реакторобудуванні. Перші такі реактори були побудовані ще за часів СРСР. Модульне виробництво та будівництво було впроваджено у суднобудуванні за «правилом 1-3-8» яке стосується відносних годин, витрачених на виконання завдань на заводі, на складальному майданчику та на будівельному майданчиках [6].

4. Але не дивлячись на це, модульна концепція сучасних ММР все ще знаходиться в процесі свого розвитку і має певні серйозні суперечливості, створення нових сучасних ММР може дати нові знання, отримані в процесах проектування, випробувань та їх експлуатації. Наприклад, даний фактор є важливим для перевірки та верифікації кодів комп'ютерного моделювання, що використовуються для аналізу безпеки.

5. Модульні конструкції подаються розробниками як простіші та гнучкіші за традиційні конструкції [7] але добре відомо, що модулювання енергоємних електромеханічних систем є досить важкою задачею [8] при тому, що надмірна модулізація конструкції ЯЕРУ та АЕС може призвести до створення менш ефективних енергетичних ядерних систем [9] з розподіленою функціональністю модулів [7] і навіть блокувати різні інноваційні рішення [10]. Тому декларування гнучкості ММР і різні фахівці не вважають його необхідним і достатнім для модулювання процесу [11, 12, 13]. При цьому звертається увага на відсутність фактичної інформації щодо експлуатації, обслуговування та виведення з експлуатації ММР [14]. Однак тренінг і його навчальний ефект в процесі модульної розбудови ММР зможе дати ймовірну економічну вигоду [15].

6. Розвиток ММР в комплексі ядерної енергетики вимагає подальших досліджень для створення та інтеграції ефективних і надійних модульних структур і між модульних зв'язків [16, 17] з використанням інженерії на основі нових знань [18]. Тому, навіть якщо модульність проектування та побудови ММР не досягне декларованих цілей, принцип масштабування модульності може виправдати її задекларовану високу експлуатаційну та екологічну безпеку [5].

7. Новіші конструкції ММР мають багато активних і пасивних елементів безпеки розроблюваних для реакторів Покоління-IV. Однак разом з цим можливі непередбачені наслідки таких елементів і засобів безпеки які у випадку їх застосування для ММР необхідно ретельно переоцінити. Наприклад, великий коефіцієнт реакційної здатності до негативних температур, обмежуючи швидке зростання потужності реактора з підвищенням температури, може викликати позитивну реакційну здатність під час швидкого охолодження. Коротший термін служби швидких нейтронів у малих швидких реакторах створює проблему часу відгуку систем управління. Пасивне первинне природне циркуляційне охолодження обмежує проектовану потужність малих реакторів відповідно до певного розміру серцевини, а його ефективність може перешкоджати перекриття потоку, дисбаланс температури, випадкова втрата теплоносія, втрату/активацію охолоджуючої рідини та хімічні реакції. Поглиблений захист конструкції ММР забезпечує протидію таким факторам. Але в даному випадку на постачальників та операторів перекладається відповідальність за демонстрацію надійності таких заходів. Тобто небезпечний людський фактор залишається.

8. Майже всі відомі конструкції ММР працюють на низькозбагаченому урані (НЗУ) різних рівнів збагачення та певну кількість плутонію. Це може стати перешкодою для юрисдикцій, які прагнуть мати незалежні енергосистеми, покладаючись на незалежність від імпортного забезпечення ядерним паливом НЗУ, і для яких є привабливим природний уран.

9. ММР мають багатопрофільне призначення від виробництва електроенергії до утилізації ядерних відходів, і можуть зіграти помітну роль у декарбонізації вуглецевої промисловості, уникаючи спалювання великих кількостей викопного палива [19, 20].

10. Малі реактори що призначені для довготривалих кампаній, можуть мати на початкових стадіях кампанії більші запаси надлишкової реактивності, яка компенсується за рахунок вибраних технічних проектних рішень - наприклад, за рахунок використання вигоряючих поглиначів та/або органів регулювання. Небезпеку для нерозповсюдження в даному випадку можна бачити в тому, що в таких активних зонах можна невидимо організувати опромінення зразків для їх використання у недеklarованій ядерній діяльності - великий запас надлишкової реактивності дозволить установці витримати розміщення в зоні додаткових поглиначів у вигляді мішеней. Мова тут,

наприклад, може йти про несанкціоноване напрацювання плутонію з уранових мішеней для послідовних лабораторних експериментів. Проте, потенційну небезпеку таємного опромінення зразків можна буде зменшити шляхом проведення попереднього перед експлуатаційного інспектування МАГАТЕ у поєднанні з надійними методами plombування та моніторингу.

11. У різних проектах ММР планується використання непрозорих теплоносіїв - рідких солей або свинцю-вісмуту. Для таких систем традиційні підходи щодо інспектування, що включають візуальний огляд активної зони і басейну витримки, виявляться непрацюючими. Тому очевидно, що МАГАТЕ повинне мати доступ до систем "бачення", що розробляються для ММР з неводними теплоносіями.

12. Малі реактори мають малий тепловий слід і це значно ускладнює застосування аерокосмічних та інших дистанційних методів та засобів їх контролювання.

13. Перспективні ММР, побудовані за відмінними від ВВЕР/LWR технологіями, є новинками і для операторів та регуляторів, і для інспекторів МАГАТЕ. Тому для їх кваліфікованого інспектування необхідно додаткове навчання інспекторів МАГАТЕ, що вимагає їх активної співпраці з проєктвальниками ММР.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Б.С. Пристер, А.А. Ключников, В.М. Шестопапов В.П. Кухарь. Проблемы безопасности атомной энергетики. Уроки Чернобыля: монография. - Чернобыль -2013, 199с.

2. CNSC, Small Modular Reactors: Regulatory Strategy, Approaches and Challenges, Tech. Rep. DIS-16-04, Canadian Nuclear Safety Commission (May 2016). URL

<http://nuclearsafety.gc.ca/eng/acts-and-regulations/consultation/comment/d-16-04/index.cfm>.

3. IAEA, IAEA Safety Glossary Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection (2018 Edition), Tech. Rep. STI/PUB/1830, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria (Jun. 2018). URL [h-https://www.iaea.org/publications/11098/iaea-safety-glossary-2018-edition](https://www.iaea.org/publications/11098/iaea-safety-glossary-2018-edition).

4. Дибач А.М., Плачков Г.І. О лицензировании малых модульных реакторов. – Ядерна та радіаційна безпека, 2019, с. 3-9.

5. G. Locatelli, C. Bingham, M. Mancini. Small modular reactors: a comprehensive overview of their economics and strategic aspects. - Prog. Nucl. Energy, 73 (2014), pp. 75-85, 10.1016/j.pnucene.2014.01.010, Article, Download PDFView Record in Scopus.

6. P.L. Francis, K. Zuckerstein, K. Bradley, C.R. Durbin, B. Egger, K. Heuwinkel, J. Kelly, C.J. Madar. Best practices: high levels of knowledge at key points differentiate commercial shipbuilding from navy shipbuilding, - Tech. Rep. GAO-09-322, U.S. Government Accountability Office (GAO) (2009) May. <https://www.gao.gov/products/GAO-09-322>

7. T. Miller, P. Pedersen. Defining modules, modularity and modularization: evolution of the concept in a historical perspective. - Design for Integration in Manufacturing: Proceedings of the 13th IPS Research Seminar, Fuglsoe 1998, Aalborg University (1998)
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.454.868&rep=rep1&type=pdf>

8. D.E. Whitney. Physical limits to modularity. - Working Paper. ESD-WP-2003-01.03-ESD Internal Symposium, Massachusetts Institute of Technology. Engineering Systems Division (2002), <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/102731?show=full>

9. K. Hölttä-Otto. Modular Product Platform Design. - Ph.D. thesis, Helsinki University of Technology, finland (2005), <http://lib.tkk.fi/Diss/2005/isbn9512277670/>

10. A.K.W. Lau, R.C.M. Yam, E. Tang. The impact of product modularity on new product performance: mediation by product innovativeness. - J. Prod. Innovat. Manag., 28 (2) (2011), pp. 270-284, 10.1111/j.1540-5885.2011.00796.x

arXiv <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1540-5885.2011.00796.x>

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1540-5885.2011.00796.x>

Cross Ref View Record in Scopus.

11. J.F. Schank, S. Savitz, K. Munson, B. Perkinson, J. McGee, J.M. Sollinger. - Designing adaptable ships: modularity and flexibility in future ship designs. - Tech. Rep. RR-696-NAVY RAND Corporation, Santa Monica, Calif (2016), 10.7249/RR696

https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_reports/RR600/RR696/RAND_RR696.pdf

12. M. Baldea, T.F. Edgar, B.L. Stanley, A.A. Kiss. Modular manufacturing processes: status, challenges, and opportunities, - AIChE J., 63 (10) (2017), pp. 4262-4272, 10.1002/aic.15872

Cross Ref View Record in Scopus

13. Westinghouse Electric Corporation - Advanced LWR program for small modularized plants,

- project 1585-10, - Tech. Rep., Electric Power Research Institute, Palo Alto, California (1985)
14. B. Mignacca, G. Locatelli. Economics and finance of small modular reactors: a systematic review and research agenda, - *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 118 (2020), p. 109519, 10.1016/j.rser.2019.109519 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119307270>
Article Download PDF View Record in Scopus
15. A.A. Andrianov, I.S. Kuptsov, T.A. Osipova, O.N. Andrianova. Comparative analysis of the investment attractiveness of nuclear power plant concepts based on small and medium sized reactor modules and a large nuclear reactor, *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy, - Yadernaya Energetika*, 2018 (4) (2018), pp. 89-101, 10.26583/npe.2018.4.08
<https://nuclear-power-engineering.ru/en/article/2018/04/08/>
CrossRefView Record in Scopus
16. A.K. Upadhyay, K. Jain. Modularity in nuclear power plants: a review, - *J. Eng. Des. Technol.*, 14 (3) (2016), pp. 526-542
<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/JEDT-11-2013-0080/full/html>
View Record in Scopus
17. L. Hohmann, K. Kössl, N. Kockmann, G. Schembecker, C. Bramsiepe. Modules in process industry: a life cycle definition, - *Chem. Eng. Process: Processes*, 111 (1) (2017), pp. 115-126, 10.1016/j.cep.2016.09.017 CEP 6873
Article Download PDFView Record in Scopus
18. S. Cooper, I. Fan, G. Li. Achieving Competitive Advantage through Knowledge-Based Engineering - A Best Practice Guide, - Cranfield University, Bedford, UK (1999) prepared for the Dept. of Trade and Industry by Dept. of Enterprise Integration, Cranfield University
19. S. Chu. America's new nuclear option - small modular reactors will expand the ways we use atomic power, - *Wall St. J.* (2010)
<https://www.energy.gov/articles/secretary-chu-op-ed-small-modular-reactors-wall-street-journal>
20. R. Campbell. Small Modular Nuclear Reactors Would Be Beneficial for South Africa, Says Industry Body, *Creamer Media's Engineering News* (May 2020). URL <https://www.engineeringnews.co.za/article/small-modular-nuclear-reactors-would-be-beneficial-for-south-africa-says-industry-body-2020-05-18>. Google Scholar

Ващенко Володимир Миколайович – професор, факультет екологічної безпеки, інженерії та технологій,
¹Національний авіаційний університет, м. Київ, e-mail: nucleorid@gmail.com

Кордуба Ірина Богданівна – доцент, факультет інженерних систем та екології, ²Київський національний університет будівництва і архітектури.

Гриб Віталій Юрійович – аспірант, Інститут енергетики і комп'ютерно-інтегрованих систем управління,
³Одеський національний політехнічний університет.

Vashchenko Volodymyr M. - Doctor of Phys. and Math. Sc., Professor, Faculty of Environmental Safety, Engineering and Technology, National Aviation University, Kyiv, e-mail: nucleorid@gmail.com

Korduba Irina B. - Cand. Sc. (Eng), Associate Professor, Faculty of Engineering Systems and Ecology, Kyiv National University of Construction and Architecture

Hryb Vitalii Y. - graduate student, Institute of Energy and Computer-Integrated Control Systems, Odessa National Polytechnic University