

УДК 621.039.586:614.876

Volodymyr Vashchenko¹, Dr. of Sci., Professor
e-mail: nucleoroid@gmail.com

Irina Korduba², PhD, Associate Professor of the Department of Labour and Environment Protection
ORCID ID 0000-000105135-8465 *e-mail: uaror-korduba@ukr.net*

Olena Zhukova², PhD, Associate Professor of the of Labour and Environment Protection
ORCID ID 0000-0003-0662-9996 *e-mail: elenazykova21@gmail.com*

¹ National Aviation University, Kyiv, Ukraine

² Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

TECHNOLOGICAL AND OPERATING FEATURES OF THE AR-1000 REACTORS GENERATION III⁺ AND SMALL MODULAR REACTORS MR-160

Abstract. *Technological and environmental analysis of the main characteristics of technological, operational and environmental safety in the context of progress in the main areas of development of reactor units such as VVER, MR-160 and AR-1000 for power units currently under development, design and construction is one of the most pressing issues development of world nuclear energy. This urgency in particular is due to the fact that on the basis of these technologies further development of Ukraine's nuclear energy is planned. The tasks of ensuring operational and radioecological safety for new generation power reactors are reduced to obtaining the lowest possible probability of events related to a possible accident, as well as the lowest possible probability of radiation consequences in compliance with all requirements of national and international regulations and recommendations adopted by a particular state and its civil society.*

Keywords: *nuclear safety; environmental safety; nuclear reactor; small modular reactor; nuclear power plant*

В.М. Ващенко¹, І.Б. Кордуба², О.Г. Жукова²

¹ Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

² Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ОСОБЛИВОСТІ РЕАКТОРІВ АР-1000 ПОКОЛІННЯ ІІІ+ ТА МАЛИХ МОДУЛЬНИХ РЕАКТОРІВ МР-160

Анотація. *Технологічний та екологічний аналіз головних характеристик технологічної, експлуатаційної і екологічної безпеки в контексті прогресивних досягнень на головних напрямках розробки реакторних установок типу ВВЕР, МР-160 та АР-1000 для енергоблоків, що на сьогодні знаходяться на етапах розробки, проектування та будівництва, є одним із найактуальніших питань розвитку світової ядерної енергетики. Така актуальність, зокрема, зумовлена тим, що на базі даних технологій планується подальший розвиток ядерної енергетики України. Задачі забезпечення експлуатаційної та радіоекологічної безпеки для енергетичних*

© В.М. Ващенко, І.Б. Кордуба, О.Г. Жукова, 2021

реакторів нових поколінь зводяться до отримання максимально низької розрахункової ймовірності подій, пов'язаних з можливою аварією, а також максимально низької ймовірності радіаційних наслідків з дотриманням усіх вимог національних та міжнародних нормативних та рекомендаційних документів, які приймаються конкретною державою та її громадянським суспільством.

Ключові слова: ядерна безпека; екологічна безпека; ядерний реактор; малий модульний реактор; атомна електростанція

DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.149-156>

Вступ

На сьогодні існує лінійка модернізованих традиційних ядерних енергетичних технологій та відповідних проектів, які отримали назву Покоління типу III+. Ці проекти мають підвищений рівень надійності та безпеки і тому можуть розглядатися для їх застосування в ядерній енергетиці України.

Американська технологія AP-1000 компанії Вестінгауз є єдиною з реакторних технологій Покоління III+, яка ліцензована комісією з ядерного регулювання в США. В офіційних джерелах зазначається, що впровадження в Україні апробованої реакторної установки AP-1000 Покоління III+ на базі провідного світового ядерного реактора потужністю до 1100 МВт із системами пасивної безпеки та унікальними особливостями в частині інноваційності і стандартизації дасть змогу скоротити терміни і вартість будівництва, забезпечити найвищий рівень технологічної та екологічної безпеки АЕС і стати новим важливим елементом майбутньої безвуглецевої енергетики.

Чотири блоки AP-1000, що вже побудовані і працюють у Китаї, показали рекордні експлуатаційні властивості, а саме: скорочені терміни планово-попереджувальних ремонтів та процесів перезавантаження ядерного палива, покращення коефіцієнта встановленої потужності. Ще чотири таких реактори будуються в США. Тому для України є реальна практична можливість вивчити та використати досвід будівництва реакторів AP-1000, досвід їх введення в експлуатацію та досвід їх експлуатації.

Основна частина

Детальний технологічний аналіз ядерних енергетичних реакторних технологій типу ВВЕР, які знаходяться на сьогодні в експлуатації і складають понад 80% реакторного парку планети, призводить до наступних висновків щодо ядерної і відповідно екологічної безпеки:

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

2. Велика аварія на найпоширенішому в світі легководному ядерному реакторі типу ВВЕР може призвести до радіоактивного викиду, еквівалентного декільком Чорнобилям і Фукусімам.

3. Уроки усіх без виключення ядерних катастроф на ядерних об'єктах свідчать про небезпечність людського фактору й відсутності необхідного рівня ядерної культури.

4. Робота ядерних реакторів в подовженому режимі експлуатації призводить до додаткового старіння їх важливих елементів і, як наслідок, може

збільшити ймовірність проектних і запроектних аварій. При цьому механізми старіння реакторних матеріалів в умовах високих радіаційних, термічних та баричних навантажень вивчені недостатньо і їх важко прогнозувати. Однак багато країн планують продовжити встановлені проектом терміни експлуатації своїх ядерних енергетичних реакторів.

5. Модернізація діючих у світі ядерних енергетичних реакторів здійснюється в напрямку збільшення тиску в реакторі, підвищення робочої температури і збільшення відсотка вигорання палива. Наслідком такої модернізації є прискорене старіння металу і подальше зниження надійності і безпеки. Але стандарти для ядерних підприємств не завжди враховують такі нові умови роботи.

6. Існує небезпека зовнішніх впливів екстремальних природних явищ – землетрусів, повеней, смерчів, змін глобального клімату та геокосмічних явищ.

Процеси виробництва низькозбагаченого ядерного палива та переробки ядерного палива, опроміненого в реакторах за час паливної кампанії, також пов'язані з масштабними екологічними загрозами і ризиками. Розроблюване міжнародними зусиллями четверте покоління енергетичних ядерних реакторів G-4 в певній мірі продовжує цю тенденцію. Виробництво електроенергії на сучасних АЕС, а в перспективі і 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 світового парку ядерних енергетичних реакторів типу ВВЕР, американська технологія AP-1000 є реакторною технологією Покоління III+ і має наступні нові особливості в частині її безпеки:

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

2. Використання модульних конструкцій при спорудженні АЕС. Конструктивно кожний блок AP-1000 складається з 50 великих і 250 малих модулів. Стандартні малі модулі розміром 3,7x3,7x24,4 м і вагою 80 т можна перевозити залізницею або транспортувати їх українським літаком «Мрія», який здатний доставити в Україну практично всі модулі AP-1000.

3. Використання виготовлених у заводських умовах відносно малогабаритних модулів при спорудженні АЕС дозволяє:

- зменшити об'єми трудовитрат на будівельно-промислому майданчику АЕС;

- підвищити якість та контроль якості при виготовленні модулів в заводських умовах;

- реалізувати паралельне проведення багатьох робіт, які традиційно виконуються послідовно, і таким чином скоротити терміни спорудження АЕС.

4. Впровадження реакторів МР-160 т в українській ядерній енергетиці має забезпечити:

- підвищення економічності виробництва електроенергії за рахунок зниження капітальних і експлуатаційних витрат;

- скорочення термінів будівництва;

- можливість більш швидкого повернення інвестицій, в порівнянні зі створенням енергоблоків великої потужності, і гарантію високої надійності і безпеки;

– 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.

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

Процеси створення та впровадження нових технологій ММР та відповідних їм проектів, в умовах конкретної країни, пов'язані з нагальною необхідністю вирішення багатьох технічних та технологічних питань, проведення різних аналізів та обґрунтувань, у першу чергу питань безпеки та вирішення питань ліцензування з урахуванням наступних положень:

1. Малі модульні реактори не є принципово новими в реакторобудуванні. Але незважаючи на це, модульна концепція сучасних ММР все ще знаходиться в процесі свого розвитку і має певні серйозні суперечливості, а створення нових сучасних ММР може дати нові знання, отримані в процесах проектування, випробувань та їх експлуатації.

2. Модульний принцип побудови ММР та їх відносна компактність дає можливість застосувати принцип "економії кратних рішень", що дозволяє застосовувати поступове нарощування потужності АЕС і уникнути великих фінансових ризиків.

3. Розробники та виробники стверджують, що модульні конструкції простіші та гнучкіші, ніж традиційні конструкції, але модулювання енергоємних електромеханічних систем є досить важкою задачею. Проте перевантажена, надмірна модулізація конструкції ЯЕРУ та АЕС в цілому може призвести до створення менш ефективних енергетичних ядерних систем з розподіленою функціональністю модулів і навіть до перешкоджання інноваціям. Тому декларування гнучкості ММР дискутується та оскаржується.

4. Вважається, що модульна конструкція невеликих реакторів покращить їх якість та ефективність, а також знизить вартість. Проте, опонентська думка звертає увагу на відсутність фактичної детальної інформації стосовно експлуатації, обслуговування та виведення з експлуатації ММР з відповідним обґрунтуванням адекватного аналізу витрат та вигод.

5. Розвиток модульної ядерної енергетики вимагає подальших досліджень для визначення, розробки, створення та інтеграції ефективних і надійних модульних структур і міжмодульних зв'язків з використанням інженерії та на основі нових знань. Тому, навіть якщо модульність проектування та побудови ММР не досягне декларованих цілей, масштабність модульності для певних малих потужностей все одно може виправдати ефективність, економічність, «економію кратності» і головне – її задекларовану високу експлуатаційну та екологічну безпеку.

6. Нові конструкції ММР мають багато активних і пасивних елементів безпеки, розроблених для реакторів Покоління-IV. Однак можливі непередбачені наслідки застосування таких елементів і засобів безпеки ще необхідно ретельно оцінити.

7. Щоб ММР могли споруджуватися поблизу заселених територій, вони повинні проектуватися так, щоб їхні зони виключення та планування надзвичайних ситуацій були значно меншими за відповідні зони навколо великих підприємств.

8. Відомі конструкції ММР працюють на низькозбагаченому урані (НЗУ) з різними рівнями збагачення та вмісту плутонію. Це може стати перешкодою для юрисдикцій, які прагнуть мати енергосистеми, незалежні від імпортного забезпечення ядерним паливом НЗУ, і для яких є більш привабливим природний уран.

9. ММР мають багатопрофільне призначення – від виробництва електроенергії до утилізації ядерних відходів. Вони можуть зіграти помітну роль у декарбонізації вугільної та нафтової промисловості шляхом виробництва пари, необхідної для інтенсифікації процесів видобутку та переробки нафти, уникаючи спалювання великих кількостей викопного палива.

10. Серед переваг малих реакторів називається можливість їх спорудження у віддалених географічних районах.

11. Реактори ММР, 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.

12. Небезпеку для режимів нерозповсюдження деякі автори в даному випадку вбачають в тому, що в таких активних зонах можна невидимим чином організувати опромінення зразків для подальшого використання у незадекларованій ядерній діяльності – великий запас надлишкової реактивності дозволить ядерній установці витримати розміщення в зоні додаткових поглиначів у вигляді мішеней. Мова тут може йти про несанкціоноване напрацювання плутонію з уранових мішеней для послідовних лабораторних експериментів.

13. В деяких проектах ММР передбачається використання непрозорих теплоносіїв – рідких солей або свинець-вісмута. Для таких систем традиційні методи інспектування, що включають візуальний огляд активної зони та басейну витримки ОЯП, стають “сліпими”. Тому МАГАТЕ повинно мати доступ до систем “бачення”, що розроблюються для ММР з непрозорими неводними охолоджувачами.

14. Реактори ММР мають маловидимий тепловий слід, що значно ускладнює застосування аерокосмічних та інших дистанційних методів та засобів їх контролю.

15. Перспективні ММР, побудовані за відмінними від LWR технологіями, є новинками для операторів і регуляторів, та для інспекторів МАГАТЕ.

16. Важливою проблемою є створення сховищ ОЯП для тих ММР, де такі сховища передбачені проектом.

Висновки

1. Реактори AP-1000 Покоління III+ компанії «Вестінгауз» мають підвищений рівень надійності та безпеки, в порівнянні з реакторами типу ВВЕР другого покоління, і можуть розглядатися для розвитку ядерної енергетики України.

2. В Україні розглядається можливість будівництва ММР типу МР-160 для заміни вуглецевих теплових електростанцій і для збільшення маневрових потужностей в об'єднаній енергосистемі України. Український вибір малих модульних реакторів пояснюється зокрема тим, що даний проект є єдиним в своєму класі реакторів, що отримав ліцензію Комісії з ядерного регулювання США в липні 2021 року.

3. Що стосується екологічної безпеки реакторів АР-1000 та МР-160, то декларовані їх виробниками переваги повинні досліджуватися і підтверджуватися для кожного конкретного проекту, що планується до впровадження в Україні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Small Modular Reactors: Regulatory Strategy, Approaches and Challenges. Discussion paper DIS-16-04 (May 2016). [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.nuclearsafety.gc.ca/eng/pdfs/Discussion-Papers/16-04/Discussion-paper-DIS-16-04-eng.pdf>
2. IAEA Safety Glossary Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection (2018 Edition), Tech. Rep. STI/PUB/1830 (Jun. 2018). [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.iaea.org/publications/11098/iaea-safety-glossary-2018-edition>.
3. Дибач А.М., Плачков Г.І. О лицензировании малых модульных реакторов. – Ядерна та радіаційна безпека, 2019, С. 3–9.
4. Locatelli G., Bingham C., Mancini M. Small modular reactors: a comprehensive overview of their economics and strategic aspects. – Prog. Nucl. Energy, 73 (2014), pp. 75–85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.01.010>.
5. Francis P.L., Zuckerstein K., Bradley K., Durbin C.R., Egger B., Heuwinkel K., Kelly J., Madar C.J. Best practices: high levels of knowledge at key points differentiate commercial shipbuilding from navy shipbuilding [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.gao.gov/products/GAO-09-322>
6. Miller T., Pedersen P. Defining modules, modularity and modularization: evolution of the concept in a historical perspective [Electronic resource]. – Access mode: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.454.868&rep=rep1&type=pdf>
7. Whitney D.E. Physical limits to modularity [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/102731?show=full>
8. Hölttä-Otto K. Modular Product Platform Design. – Ph.D. thesis, Helsinki University of Technology, Finland [Electronic resource]. – Access mode: <http://lib.tkk.fi/Diss/2005/isbn9512277670/>
9. Lau A.K.W., Yam R.C.M., Tang E. The impact of product modularity on new product performance: mediation by product innovativeness. – J. Prod. Innovat. Manag., 28 (2) (2011), pp. 270–284. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1540-5885.2011.00796.x> arXiv
10. Schank J.F., Savitz S., Munson K., Perkinson B., McGee J., Sollinger J.M. Designing adaptable ships: modularity and flexibility in future ship designs [Electronic resource]. – Access mode: https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_reports/RR600/RR696/RAND_RR696.pdf
11. Baldea M., Edgar T.F., Stanley B.L., Kiss A.A. Modular manufacturing processes: status, challenges, and opportunities. AIChE J., 63 (10) (2017), pp. 4262–4272, DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.15872>
12. Westinghouse Electric Corporation. Advanced LWR program for small modularized plants, project 1585-10 [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.osti.gov/servlets/purl/6806380>
13. Mignacca B., Locatelli G. Economics and finance of small modular reactors: a systematic review and research agenda. Renew. Sustain. Energy Rev., 118 (2020) [Electronic resource]. –

- Access mode: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119307270>, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109519>
14. Andrianov A.A., Kuptsov I.S., Osipova T.A., Andrianova O.N. 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, Yadernay a Energetika*, 2018 (4) (2018), pp. 89–101, DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.4.08>
 15. Upadhyay A.K., Jain K. Modularity in nuclear power plants: a review. *J. Eng. Des. Technol.*, 14 (3) (2016), pp. 526–542.
 16. Hohmann L., Kössl K., Kockmann N., Schembecker G., Bramsiepe C. Modules in process industry: a life cycle definition, – *Chem. Eng. Process: Processes*, 111 (1) (2017), pp. 115–126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2016.09.017> CEP 6873
 17. Cooper S., Fan I., Li G. *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
 18. Chu S. America’s new nuclear option – small modular reactors will expand the ways we use atomic power. *Wall St. J.* (2010) [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.energy.gov/articles/secretary-chu-op-ed-small-modular-reactors-wall-street-journal>
 19. Campbell R. Small Modular Nuclear Reactors Would Be Beneficial for South Africa, Says Industry Body, *Creamer Media’s Engineering News* (May 2020) [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.engineeringnews.co.za/article/small-modular-nuclear-reactors-would-be-beneficial-for-south-africa-says-industry-body-2020-05-18>

Стаття надійшла до редакції 01.07.2021 і прийнята до друку після рецензування 08.09.2021

REFERENCES

1. Small Modular Reactors: Regulatory Strategy, Approaches and Challenges. Discussion paper DIS-16-04 (May 2016). Retrieved from: <http://www.nuclearsafety.gc.ca/eng/pdfs/Discussion-Papers/16-04/Discussion-paper-DIS-16-04-eng.pdf>
2. IAEA Safety Glossary Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection (2018 Edition), Tech. Rep. STI/PUB/1830 (Jun. 2018). Retrieved from: <https://www.iaea.org/publications/11098/iaea-safety-glossary-2018-edition>.
3. Dybach, A.M., Plachkov, H.I. (2019). О ліцензуванні малих модул'них реакторів. *Yaderna ta radiatsiy na bezpeka*, 3-9.
4. Locatelli, G., Bingham, C., Mancini, M. (2014). Small modular reactors: a comprehensive overview of their economics and strategic aspects. *Prog. Nucl. Energy*, 73, 75-85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.01.010>.
5. Francis, P.L., Zuckerstein, K., Bradley, K., Durbin, C.R., Egger, B., Heuwinkel, K., Kelly, J., Madar, C.J. Best practices: high levels of knowledge at key points differentiate commercial shipbuilding from navy shipbuilding. Retrieved from: <https://www.gao.gov/products/GAO-09-322>
6. Miller, T., Pedersen, P. Defining modules, modularity and modularization: evolution of the concept in a historical perspective. Retrieved from: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.454.868&rep=rep1&type=pdf>
7. Whitney, D.E. Physical limits to modularity. Retrieved from: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/102731?show=full>
8. Hölltä-Otto, K. (n.d.). *Modular Product Platform Design* (Doctoral dissertation, Helsinki University of Technology) [Abstract]. Retrieved from <http://lib.tkk.fi/Diss/2005/isbn9512277670/>

9. Lau, A.K.W., Yam, R.C.M., Tang, E. (2011). The impact of product modularity on new product performance: mediation by product innovativeness. *J. Prod. Innovat. Manag.*, 28(2), 270-284. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1540-5885.2011.00796.x> arXiv
10. Schank, J.F., Savitz, S., Munson, K., Perkinson, B., McGee, J., Sollinger, J.M. Designing adaptable ships: modularity and flexibility in future ship designs. Retrieved from: https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_reports/RR600/RR696/RAND_RR696.pdf
11. Baldea, M., Edgar, T.F., Stanley, B.L., Kiss, A.A. (2017). Modular manufacturing processes: status, challenges, and opportunities. *AIChE J.*, 63(10), 4262-4272, DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.15872>
12. Westinghouse Electric Corporation. Advanced LWR program for small modularized plants, project 1585-10. Retrieved from: <https://www.osti.gov/servlets/purl/6806380>
13. Mignacca, B., Locatelli, G. (2020). Economics and finance of small modular reactors: a systematic review and research agenda. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 118. Retrieved from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119307270>
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109519>
14. Andrianov, A.A., Kuptsov, I.S., Osipova, T.A., Andrianova, O.N. (2018). 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 Zavedeniy, Yadernaya Energetika*, 2018 (4), 89-101. <https://doi.org/10.26583/npe.2018.4.08>
15. Upadhyay, A.K., Jain, K. (2016). Modularity in nuclear power plants: a review. *J. Eng. Des. Technol.*, 14(3), 526-542.
16. Hohmann, L., Kössl, K., Kockmann, N., Schembecker, G., Bramsiepe, C. (2017). Modules in process industry: a life cycle definition. *Chem. Eng. Process: Processes*, 111(1), 115-126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2016.09.017> CEP 6873
17. Cooper, S., Fan, I., Li, G. (1999). Achieving Competitive Advantage through Knowledge-Based Engineering – A Best Practice Guide. Cranfield University, Bedford, UK prepared for the Dept. of Trade and Industry by Dept. of Enterprise Integration, Cranfield University.
18. Chu, S. (2010). America's new nuclear option – small modular reactors will expand the ways we use atomic power. *Wall St. J.* Retrieved from: <https://www.energy.gov/articles/secretary-chu-op-ed-small-modular-reactors-wall-street-journal>
19. Campbell, R. (18.05.2020). Small Modular Nuclear Reactors Would Be Beneficial for South Africa, Says Industry Body. *Creamer Media's Engineering News*. Retrieved from: <https://www.engineeringnews.co.za/article/small-modular-nuclear-reactors-would-be-beneficial-for-south-africa-says-industry-body-2020-05-18>

The article was received 01.07.2021 and was accepted after revision 08.09.2021

Ващенко Володимир Миколайович

доктор фізико-математичних наук, професор Національного авіаційного університету
Адреса робоча: 03058, Україна, м. Київ, пр-т Любомира Гузара, 1
e-mail: nucleoroid@gmail.com

Кордуба Ірина Богданівна

кандидат технічних наук, доцент кафедри охорони праці та навколишнього середовища Київського національного університету будівництва і архітектури
Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, пр-т Повітрофлотський, 31
ORCID ID 0000-000105135-8465 **e-mail:** uaror-korduba@ukr.net

Жукова Олена Григорівна

кандидат технічних наук, доцент кафедри охорони праці та навколишнього середовища Київського національного університету будівництва і архітектури
Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, пр-т Повітрофлотський, 31
ORCID ID 0000-0003-0662-9996 **e-mail:** elenazykova21@gmail.com