

АНОТАЦІЯ

Цибитовський С. Ю. Підвищення екологічної безпеки децентралізованої енергетики задля сталого розвитку міст. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 183 – технології захисту навколишнього середовища (18 – виробництво та технології). – Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, 2026.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої науково-технічної задачі забезпечення екологічної безпеки та надійності децентралізованого енергогенерування в умовах військових і терористичних загроз.

Яке показав досвід війни росії проти України, розпочатої у 2014 р., споруди централізованого генерування енергії є привабливою мішенню для ворога, який веде терористичну війну з метою зламати волю нації до існування. Використання відновлюваних джерел енергії пов'язано з проблемою нестабільного їхнього надходження, що вимагає обов'язкових маневрових потужностей. Такими децентралізованими потужностями можуть бути модульні ко/тригенераційні установки, які працюють на як на природному газі чи біометані, так і на газах з умістом метану від 25...30 %, наприклад біогазі. При використанні природного газу виділяється значна кількість вуглекислого газу, що сприяє парниковому ефекту.

Місце ядерної енергетики в системі джерел енергії визначено шляхом створення тривимірної класифікації цих джерел за впливом на кліматичні зміни, доступністю та режимом надходження. Ядерна енергія посідає особливе місце як «вихідне джерело» для практично всіх джерел енергії, а також як єдине викопне безвуглецеве джерело.

Для постійних та плавнозмінних енергетичних потреб ефективним і екологічним джерелом енергії є сучасні ядерні енергетичні реакторні установки

ЯЕРУ з малими модульними реакторами (ММР), які входять до найактуальніших питань розвитку сучасної ядерної енергетики України і світу.

Перспективним шляхом декарбонізування енергетики на базі теплових електростанцій є перехід до атомних станцій малої потужності (АСМП) для постачання теплоти до міських теплових мереж. Виникає технологічна необхідність в удосконаленні схем теплопостачання для підвищення рівня їх ефективності, безпеки та екологічності. Тому в роботі доведено доцільність використання теплофікаційного режиму АСМП для теплопостачання міст шляхом нагрівання мережевої води парою від турбіни ТЕС. Наведено співвідношення електричної та теплової потужності атомної теплоелектроцентралі. При цьому встановлено перевагу використання теплового насоса, який при однаковій тепловій потужності забезпечує вдвічі більшу електричну потужність. Оскільки теплота в цих режимах постачається з різним потенціалом, для порівняння цих варіантів був використаний ексергетичний коефіцієнт корисної дії (ЕККД). Для підвищення потужності теплопостачання запропоновано вдосконалену схему з використанням підігрівача високого тиску у проти тисковому режимі та з догріванням мережевої води гострою парою. Показано, що теплопостачання від АСМП є ефективним та екологічним навіть у разі значної віддаленості теплоспоживачів. Також у роботі розглянуто вибирання черговості вжиття заходів на прикладі Києва. Показано, що в першу чергу слід модернізувати теплопостачання районів, які живляться від пошкодженої інфраструктури, у другу – зі зношеною інфраструктурою, а залежні від електропостачання насосів райони вже забезпечені генераторами.

Для зниження собівартості ядерної енергії в роботі також розглядається система герметичного огороження (СГО) яка є останнім бар'єром на шляху виходу радіоактивних речовин до довкілля в разі аварії на АЕС. У процесі експлуатації після кожного перевантаження ядерного палива проводиться випробування цієї системи на можливість виконати свої функції через визначення інтегрального витікання, значення якого має не перевершувати нормативного.

Випробування проводяться при надлишковому тиску в СГО рівному 0,72 бар, що досягається нагнітанням повітря компресором. У роботі розглянуто можливість використання ежектора для прискорення процесу нагнітання повітря, що позитивно впливає на техніко-економічні показники енергоблоку АЕС завдяки збільшенню кількості виробленої електроенергії, що дуже важливо саме сьогодні, коли АЕС забезпечують максимальну частку виробленої електроенергії в країні. У попередніх роботах була проведена оцінка використання ежектора для цієї мети, але в них не було враховано необхідність встановлення фільтрів на потоці повітря, що підсмоктується. До того ж були використані чисельні методи, що мають похибку. У представленій роботі використовується математичний апарат, який дозволяє отримати більш точний результат. Отриманий розрахунковий час нагнітання компресором збігається з реальним часом нагнітання для енергоблоків Рівненської АЕС. Визначено також конструктивні вимоги до ежектора, що забезпечує мінімальний час нагнітання. Оптимальний модуль ежектора, тобто відношення площі поперечного перерізу циліндричної камери змішування до площі критичного перерізу сопла робочого повітря, дорівнює 8,6. При цьому час нагнітання зменшується на 38,8 %. Повітря, що підсмоктується, має очищатися від пилу та вологи. Відповідні фільтри мають загальний аеродинамічний опір 0,2 бар. Наявності цих повітряних фільтрів повітря незначно знижує ефективність використання ежектора. Остаточний час нагнітання повітря з використанням ежектора дорівнює 2,56 години, що на 35,5 % скорочує час нагнітання повітря для проведення випробувань.

Усі види безпеки ядерної енергетики визначаються інженерно-фізичними та науково-технічними рішеннями, які закладаються в конструкції ЯЕРУ в процесі їх проектування а також від методів і технологій зберігання, перероблення, поводження з відпрацьованим ядерним паливом (ВЯП). При цьому повинна забезпечуватися гарантована комплексна ядерно-екологічна безпека ЯЕРУ за будь яких умов експлуатації.

Крім виробництва енергії кожна ЯЕРУ виробляє ВЯП та інші небезпечні рідкі та тверді радіоактивні відходи. Крім цього на різних ланках ядерного паливного енергетичного циклу також утворюються відвали породи після виробництва жовтого кеку; відвали збідненого урану утворювані в результаті збагачення ядерного палива; відходи після перероблення ВЯП на радіохімічних комбінатах і навіть самі АЕС стають відходами після закінчення терміну їх експлуатації та їх ліквідації. При цьому, навіть якщо якась країна відмовляється від власної ядерної енергетики і закриває усі свої АЕС, то увесь комплекс ядерної спадщини разом з зупиненими АЕС залишається практично вічною спадщиною яка потребує складного та дорогого поводження з нею. Екологічна ситуація з ядерним паливом помітно ускладнюється через відсутність екологічно чистих і безпечних технологій його економічно вигідного та екологічно чистого перероблення й безпечного фінішного управління відходами. При цьому ВЯП не є відходами у класичному їхньому визначенні та розумінні.

У даній роботі ВЯП визначаються як цінна вторинна енергетична сировина. У роботі отримано висновок про те, що подальший, соціально прийнятний та гарантовано безпечний розвиток світової ядерної енергетики можливий лише за умови абсолютного пріоритету ядерно-екологічної безпеки всього ядерного паливного циклу (ЯПЦ). У зв'язку з цим для вирішення складних екологічних проблем, пов'язаних з ВЯП, пропонується нова технологія покоління G5 на базі ядерних енергетичних реакторів фронтального нейтронно-ядерного горіння з внутрішньо реакторним ядерним паливним циклом.

В роботі запропоновано використання модернізованої установки «Плазмон-3М», для проміжного оброблення радіоактивних відходів, шляхом їхньої деструкції під дією високотемпературного плазмового факелу, утворюваного генератором плазми постійного струму ПУН-1, а також її головні експлуатаційні характеристики. У як плазмоутворювальні гази для установки можна застосовувати повітря, азот, аргон, гелій та інші гази. У роботі досліджено

переваги застосування високотемпературної плазмохімічної технології, що роблять цю технологію, з точки зору її екологічної безпеки, поза конкурентною.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені технологічні схеми залучення малих модульних реакторів для модернізування теплових електростанцій, а також управління ядерними відходами дозволяють ефективно та екологічно безпечно виробляти теплоту для більшого децентралізування та декарбонізування теплопостачання міст з максимальним повторним використанням відходів, що особливо актуально в умовах військових загроз, екоциду та нестачі енергетичних ресурсів.

Розроблена класифікація джерел енергії дозволяє підвищити якість навчання фахівців галузей будівництва, енергетики, транспорту та інших енергозалежних галузей.

Основні положення і результати проведених досліджень впроваджено і застосовано в діяльності ТОВ «Експертний центр» і ФГ «Енергія-1».

Наукова новизна отриманих результатів:

удосконалено:

- класифікацію джерел енергії, що дозволяє врахувати різні фактори, які впливають на зміни клімату;
- математичну модель ежекторної установки задля підвищення точності та обчислювальної ефективності;

набули подальшого розвитку:

- наукові основи модернізування енергетичних установок, що дозволяє залучити малі модульні реактори до децентралізованого теплопостачання міст.

Ключові слова: ядерна енергетика, атомна електростанція, ядерна енергетична реакторна установка, відпрацьоване ядерне паливо, ядерно-екологічна безпека, радіоактивні відходи, малий модульний реактор, атомні станції малої потужності, теплофікаційний режим, герметичне огороження, ежектор, плазмодугова установка, радіоактивні відходи.

ABSTRACT

Tsybytovskiy S. Improving the environmental safety of decentralised energy for the sustainable development of cities. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

The dissertation is devoted to solving an important scientific and technical problem of ensuring environmental safety and reliability of decentralized energy generation in conditions of military and terrorist threats.

As the experience of Russia's war against Ukraine, which began in 2014, has shown, centralized energy generation facilities are an attractive target for the enemy, which is waging a terrorist war in order to break the nation's will to exist. The use of renewable energy sources is associated with the problem of their unstable supply, which requires mandatory manoeuvring capacities. Such decentralized capacities can be modular co/trigeneration plants that operate on both natural gas or biomethane, and gases with a methane content of 25...30%, for example, biogas. When using natural gas, a significant amount of carbon dioxide is released, which contributes to the greenhouse effect.

The place of nuclear energy in the system of energy sources is determined by creating a three-dimensional classification of these sources by their impact on climate change, availability and supply regime. Nuclear energy occupies a special place as a “source source” for almost all energy sources, as well as the only fossil carbon-free source.

For constant and smoothly changing energy needs, an effective and environmentally friendly source of energy is modern nuclear power reactor plants (NPPs) with small modular reactors (SMRs), which are among the most pressing issues in the development of modern nuclear power in Ukraine and the world.

A promising way to decarbonize the energy sector based on thermal power plants is the transition to small-capacity nuclear power plants (SNPs) to supply heat to urban heating networks. There is a technological need to improve heat supply schemes to

increase their efficiency, safety and environmental friendliness. Therefore, the paper proves the feasibility of using the heat-generating mode of the SNPs for heat supply of cities by heating the network water with steam from the TPP turbine. The ratio of the electric and thermal power of a nuclear thermal power plant is given. At the same time, the advantage of using a heat pump is established, which, with the same thermal power, provides twice as much electric power. Since heat in these modes is supplied with different potentials, the exergy efficiency coefficient (EFC) was used to compare these options. To increase the heat supply capacity, an improved scheme is proposed using a high-pressure heater in the counter-pressure mode and with reheating of network water with hot steam. It is shown that heat supply from SNP is effective and environmentally friendly even in the case of significant remoteness of heat consumers. The paper also considers the selection of the order of taking measures using the example of Kyiv. It is shown that first of all, it is necessary to modernize the heat supply of areas that are powered by damaged infrastructure, secondly, with worn-out infrastructure, and areas dependent on pump power supply are already provided with generators.

To reduce the cost of nuclear energy, the work also considers the containment system (CS), which is the last barrier to the release of radioactive substances into the environment in the event of an accident at a nuclear power plant. During operation, after each reloading of nuclear fuel, this system is tested for its ability to perform its functions by determining the integral leakage, the value of which should not exceed the standard. The tests are carried out at an excess pressure in the CS of 0.72 bar, which is achieved by pumping air with a compressor. The work considers the possibility of using an ejector to accelerate the air injection process, which has a positive effect on the technical and economic indicators of the NPP power unit due to an increase in the amount of electricity generated, which is very important today, when nuclear power plants provide the maximum share of electricity generated in the country. In previous works, the use of an ejector for this purpose was assessed, but they did not take into account the need to install filters on the sucked-in air flow. In addition, numerical methods were used, which have an error. The presented work uses a mathematical

apparatus that allows you to obtain a more accurate result. The calculated injection time by the compressor coincides with the real injection time for the power units of the Rivne NPP. The design requirements for the ejector, which ensures the minimum injection time, were also determined. The optimal ejector module, i.e. the ratio of the cross-sectional area of the cylindrical mixing chamber to the critical cross-sectional area of the working air nozzle, is 8.6. In this case, the injection time is reduced by 38.8%. The sucked-in air must be cleaned of dust and moisture. The corresponding filters have a total aerodynamic resistance of 0.2 bar. The presence of these air filters slightly reduces the efficiency of using the ejector.

The final air injection time using the ejector is 2.56 hours, which reduces the air injection time for testing by 35.5%.

All types of nuclear power safety are determined by engineering, physical and scientific and technical solutions that are embedded in the design of the NPP during their design, as well as by the methods and technologies of storage, reprocessing, and handling of spent nuclear fuel (SNF). At the same time, guaranteed comprehensive nuclear and environmental safety of the NPP must be ensured under any operating conditions.

In addition to energy production, each NPP produces SNF and other hazardous liquid and solid radioactive waste. In addition, at various stages of the nuclear fuel energy cycle, rock dumps are also formed after the production of yellow cake; depleted uranium dumps formed as a result of nuclear fuel enrichment; waste after spent fuel reprocessing at radiochemical plants and even nuclear power plants themselves become waste after the end of their service life and their liquidation. At the same time, even if a country abandons its own nuclear power industry and closes all its nuclear power plants, the entire complex of nuclear heritage, together with the stopped nuclear power plants, remains an almost eternal heritage that requires complex and expensive handling. The environmental situation with nuclear fuel is noticeably complicated due to the lack of environmentally friendly and safe technologies for its economically profitable and environmentally friendly reprocessing and safe final waste management. At the same

time, spent fuel is not waste in its classical definition and understanding. In this work, spent fuel is defined as a valuable secondary energy raw material. The work concludes that further, socially acceptable and guaranteed safe development of world nuclear power is possible only under the condition of absolute priority of nuclear and environmental safety of the entire nuclear fuel cycle (NFC). In this regard, to solve complex environmental problems associated with spent fuel, a new generation G5 technology is proposed based on nuclear power reactors of frontal neutron-nuclear combustion with an internal reactor nuclear fuel cycle.

The paper proposes the use of a modernized installation "Plasmon-3M" for intermediate processing of radioactive waste by their destruction under the action of a high-temperature plasma torch formed by a direct current plasma generator PUN-1, as well as its main operational characteristics. Air, nitrogen, argon, helium and other gases can be used as plasma-forming gases for the installation. The paper investigates the advantages of using high-temperature plasma-chemical technology, which make this technology, from the point of view of its environmental safety, uncompetitive.

The practical significance of the results obtained. The developed technological schemes for involving small modular reactors for the modernization of thermal power plants, as well as nuclear waste management, allow for efficient and environmentally safe production of heat for greater decentralization and decarbonization of urban heat supply with maximum reuse of waste, which is especially relevant in conditions of military threats, ecocide and lack of energy resources.

The developed classification of energy sources allows for improving the quality of training of specialists in the construction, energy, transport and other energy-dependent industries.

The main provisions and results of the conducted research have been implemented and applied in the activities of LLC "Expert Center" and FE "Energy-1".

Scientific novelty of the obtained results:

improved:

- classification of energy sources, which allows taking into account various factors that affect climate change;
- mathematical model of the ejector installation to increase accuracy and computational efficiency;

further developed:

- scientific foundations of modernization of power plants, which allows to involve small modular reactors in decentralized heat supply of cities.

Keywords: nuclear power, nuclear power plant, nuclear power reactor plant, spent nuclear fuel, nuclear environmental safety, radioactive waste, small modular reactor, low-power nuclear power plants, heat-fixing mode, hermetic enclosure, ejector, plasma arc plant, radioactive waste.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Surkov S., Kravchenko V., Korduba I., Golovchenko A., Butenko O., Tsybytovskiy S., Trach Y. Use of an ejector to reduce the time of air injection during testing of the containment system at nuclear power plants. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, Vol. 33, No. 4, 2024. P. 401–418. <https://doi.org/10.22630/srees.9956> (Scopus, Q3).

Особистий внесок здобувача полягає в теоретичному описі системи випробувань з ежекторами.

2. **Цибитовський С.** Моделювання ежектора в системі випробування герметичності об'єктів підвищеної небезпеки. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*, Вип. 56, 2026. С. 131–152. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.56.131-152>

3. Ващенко В., Кордуба І., **Цибитовський С.** Ядерно-екологічна безпека зберігання відпрацьованого ядерного палива та поводження з ним. *Техніка будівництва*, No. 41, 2024. P. 128–141. <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0415>

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі літературних джерел та офіційної інформації щодо стану питання зберігання відпрацьованого ядерного палива в Україні.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

4. Tsybytovskiy S., Tkachenko T. Speeding Up the Tightness Testing of High-Risk Facilities Using the Absolute Pressure Method. V *International Scientific and Practical Conference «Green Construction» 20-21 May 2026, Kyiv*. P. 346-349. https://www.researchgate.net/publication/407139148_Materiali_V_Miznarodnoi_naukovo-prakticnoi_konferencii_Green_Construction_Zelene_budivnictvo_20-21_travna_2026_roku

Особистий внесок здобувача полягає в моделюванні течій в ежекторі методами обчислювальної гідродинаміки.

5. Волошкіна О.С., Кордуба І.Б., Жукова О.Г., **Цибитовський С.Ю.** Оцінка впливу існуючих систем охолодження атомних реакторів на екологічну безпеку України в умовах кліматичних змін. *II Міжнародна науково-практична конференція «Зелене будівництво» 13-14 квітня 2023, м. Київ. с. 427-431.* https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2023/04/materialy-konferencziyi_zelene-budivnycztvo_2023.pdf

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі впливу АЕС на довкілля з утворенням теплового острова.

Наукові праці, які додатково відображають матеріали дисертації:

6. Kravchenko V., Kozlov I., Vashchenko V., Korduba I., Overchenko A., **Tsybytovskyi S.** Increasing the Efficiency and Level of Environmental Safety of Pro-Environmental City Heat Supply Technologies by Low Power Nuclear Plants. *World Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 14, No. 2, 2024. P. 107-117. <https://doi.org/10.4236/wjnst.2024.142006>

Особистий внесок здобувача полягає в теоретичному описі теплової електростанції, модернізованої до атомної в теплофікаційному режимі з малим модульним реактором.

7. Vashchenko V., Korduba I., Nancy Mahmoud Al Saeed Hafez, Nehoda N., **Tsybytovskyi S.** Engineering and Physical Bases of Development and Creation of Plasmochemical Reactors for Mobile Facilities for Medical Waste Disposal. *Open Journal of Ecology*. Vol. 14, №9, 2024. Article No. 37. P. 651-662. <https://doi.org/10.4236/oje.2024.149037>

Особистий внесок здобувача полягає в участі в розробленні технологічної схеми плазмохімічного реактора, який може бути пристосований до утилізування нітрату уранілу.

8. Vashchenko V., Korduba I., al Saeed Hafez N.M., Nehoda N., **Tsybytovskyi S.**, Trach Y. Engineering and physical bases and environmental safety of plasmochemical disposal of hazardous medical waste. *Acta Scientiarum*

Polonorum. Architectura. Vol. 24, 2025. P. 16-27.

<https://doi.org/10.22630/ASPA.2025.24.2>

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі досвіду створення плазмохімічних установок та участі у створенні технологічних схем.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано вісім друкованих наукових праць, зокрема одна стаття в іноземному виданні в наукометричній базі даних Scopus квартилю Q3, дві у фахових виданнях України категорії Б, серед яких одна одноосібна та одна з трьома співавторами, а також дві тези доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях.