

АНОТАЦІЯ

Оверченко А.О. Підвищення ефективності роботи АЕС за рахунок їх розширеного використання для теплопостачання. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 143 «Атомна енергетика» (14 - Електрична інженерія). - Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, 2026.

На сьогоднішній день атомні електростанції (АЕС) України поставляють більше 55 % електрики, що виробляється в країні. Поряд з підтримкою високих показників безпеки першочерговою задачею ядерної галузі є підвищення економічності АЕС та вирішення екологічних задач, на що і націлена ця робота.

У вступі обґрунтовано актуальність і важливість роботи, визначено мету, завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відображено її зв'язок з галузевими дослідженнями, а також з науково-дослідними роботами, що виконувались в Національному університеті «Одеська політехніка» за напрямком підвищення ефективності та безпеки, відмічено особистий внесок здобувача.

У *першому розділі* показано необхідність широкого використання АЕС для вирішення проблем, пов'язаних з глобальним потеплінням. Суттєва частка використаного органічного палива приходить на опалення. Зроблено висновок, що для зменшення викидів парникових газів треба впроваджувати АЕС не тільки для виробництва електричної енергії, но і для опалення. Використання теплофікації, тобто забезпечення теплоспоживача за рахунок відбірної з турбіни пари, дозволяє економити паливо. Причому, чим більше відпускається теплоти в теплофікаційному режимі, тим більше ця економія. Для цього треба суттєво збільшити потужність теплофікаційних установок. Впровадження малих модульних реакторів передбачається для багатьох напрямків: виробництво водню, опріснення

води, але основним призначенням розглядається теплопостачання. На базі аналізу потужності сучасних теплофікаційних установок зроблено висновок про відносно малу теплофікаційну потужність АЕС малої потужності (АЕСМП), електрична потужність яких не перевершує 300 МВт. З аналізу теплової потужності крупних теплоспоживачів, наприклад, районів міст, зроблено висновок, що вони мають потужність порядку 300 МВт. Використання АЕСМП для їх теплопостачання потребує аналізу теплової схеми турбоустановки та суттєвого збільшення потужності теплофікаційної установки. З аналізу сучасних теплофікаційних установок зроблено висновок про необхідність збільшення їх потужності. При чому потрібно збільшувати потужність як теплофікаційних установок потужних АЕС для розширеного теплопостачання, так і АЕСМП для можливості теплопостачання крупних споживачів, наприклад районів міст. Це є наразі актуальним. У іншому випадку АЕСМП з їх перевагами відносно підвищеної безпеки та можливості наблизитися до населених пунктів, не зможуть грати суттєву роль в теплозабезпеченні. Треба також відмітити, що використання АЕСМП у режимі атомної станції теплопостачання, не є економічним. В результаті запропоновано визначити максимально можливу потужність теплофікаційної установки при комбінованому виробництві електричної та теплової енергії, що є найбільш ефективним режимом з точки зору економії палива.

Проаналізовано використання теплових насосів для теплопостачання від АЕС. Розглянуто декілька варіантів: використання компресійних та абсорбційних теплових насосів (ТН). Треба відмітити, що компресійний ТН має великі експлуатаційні витрати на привід компресорів. Абсорбційні ТН мають більшу металоємність і, відповідно, більшу вартість. Враховуючи більшу розповсюдженість та простоту компресійних ТН, зроблено висновок про подальші дослідження в напрямку використання саме компресійних ТН.

З аналізу літератури та власними розрахунками доведено, що з термодинамічної точки зору використання ТН не дає переваг. Мається на увазі, що при використанні ТН для теплопостачання, наприклад, з

використанням конденсатору турбіни у якості низько потенційного джерела енергії ТН, не треба відбирати пару з турбіни для теплофікації, що приводить до підвищення електричної потужності турбіни. Але одночасно має місце споживання електричної енергії компресорами ТН. Виявляється, що потужність компресорів перевищує приріст потужності турбіни. Тому виникає необхідність обґрунтування використання ТН для теплопостачання від АЕС. Для подальшого аналізу передбачається проведення економічного аналізу. Запропоновано це робити з врахуванням зменшення екологічного навантаження від АЕС при використанні ТН.

Таким чином, за результатами проведеного аналізу визначено шляхи подальших досліджень у вибраному напрямку. Визначено мету роботи та необхідні завдання, які потрібно виконати для досягнення мети.

Другий розділ присвячено визначенню максимальної потужності АЕС для теплопостачання в теплофікаційному режимі. Сучасні потужні АЕС, працюють в конденсаційному режимі та призначені для теплопостачання міст-супутників. Для цього турбоустановки мають нерегульовані відбори пари, які забезпечують як систему регенерації теплоти, так і теплофікаційні установки (ТФУ). Потужність ТФУ коливається від 116 до 200 МВт. Ця потужність представляється недостатньою для розширеного теплопостачання.

В результаті аналізу літератури визначено, що для уникнення вентиляційного режиму роботи ЦНТ, треба забезпечити мінімальну витрату пари в конденсатор на рівні 10 % від початкової кількості пари на турбіну. Саме при цій умові і забезпечується максимальна теплова потужність ТФУ. Для її визначення була складена математична модель теплової схеми турбоустановки К-1000-5,8/25-1. Математична модель, крім теплової схеми турбоустановки, включає ТФУ та залежність тиску в конденсаторі від температури охолоджуючої води. В результаті розрахунку визначаються електрична потужність енергоблоку при заданій потужності ТФУ. Для оцінки термодинамічної ефективності було використано ексергетичний ККД,

який враховує потенціал теплоти, що відпускається.

Визначено, що з підвищенням теплової потужності ТФУ ексергетичний ККД підвищується, що свідчить про термодинамічну ефективність теплофікації. В результаті аналізу економічної ефективності визначено, що при збільшенні теплової потужності від нуля при конденсаційному режимі до 116 МВт дохід АЕС від продажу своєї продукції збільшується на 4,12 %. Це підтверджує економічну доцільність теплофікації. В результаті ітераційних розрахунків була визначена тепла потужність ТФУ, яка відповідає витраті пари в конденсатор на рівні 10 % від початкової витрати пари на турбіну. Цій умові відповідає тепла потужність ТФУ 900 МВт. При цьому електрична потужність дорівнюватиме 684,8 МВт.

Аналогічна робота була проведена для АЕС малої потужності з SMR-160. Максимально можлива тепла потужність ТФУ, яка відповідає витраті пари в конденсатор на рівні 10 % від початкової витрати пари на турбіну, дорівнює 429 МВт. При цьому електрична потужність дорівнює 48,4 МВт.

У *третьому розділі* розглянуто використання теплового насосу (ТН) для теплопостачання від АЕС. Розроблено математичну модель теплового насоса з фреоном R134a. Розглянуто ТН, який у якості джерела низько потенційної теплоти використовує теплоту конденсації пари в конденсаторі турбіни АЕС. При температурі конденсації 29 °С та температурі мережевої води 55 °С отримано коефіцієнт ефективності теплового насоса $COP = 6,065$.

Визначено, що залежність COP від температури конденсації пари має лінійний характер (при $t_{\text{конд}}=32,9$ °С $COP=6,84$). З ростом температури мережевої води COP знижується. Так при $t_{\text{конд}}=29$ °С та $t_{\text{мереж.води}}=70$ °С $COP=3,459$. Залежність $COP=f(t_{\text{мереж.води}})$ теж лінійна.

Проведено розрахунок теплового насоса, в якому низько потенційним джерелом теплоти є циркуляційна вода. Порівняно з попереднім варіантом ефективність ТН знижується на 29 %, тобто при використанні конденсатора турбіни у якості випаровувача ТН частина теплообмінної поверхні

конденсатора має використовуватися у якості випаровувача ТН.

При порівнянні показників традиційної АЕС з ТФУ та АЕС з ТН отримано, що електрична потужність, яка відпускається, у другому варіанті при тепловій потужності ТФУ 230 МВт на 4,5 МВт менша. Тобто, використання ТН програє використанню традиційної ТФУ. Але через мале значення цієї різниці можна вважати, що термодинамічна ефективність цих варіантів практично однакова.

Розглянуто варіант гарячого водопостачання міста Вараш від АЕС з використанням ТН. Співставлено два варіанти розташування ТН: 1) поряд АЕС та транспортуванням гарячої води до міста; 2) транспортування циркуляційної води до міста, де ТН розташовані біля споживачів теплоти. Критерій співставлення - мінімум річних приведених витрат. В результаті розрахунку отримано $Z_1=196$ тис. \$, $Z_2=357$ тис. \$. Таким чином, оптимальним варіантом розташування ТН, який має приведені витрати майже в два рази менші, є розташування ТН біля АЕС та транспортування гарячої води до міста.

Четвертий розділ присвячено висвітленню позитивного впливу АЕС на екологію. Останнього часу атомна енергетика долучена до “зеленої”. Так, робота одного блоку АЕС, який забезпечує потужність теплопостачання 200 МВт дозволяє зекономити $71,1 \cdot 10^3$ т природного газу, запобігти викиду $198 \cdot 10^3$ т парникових газів (CO_2) та споживання $144 \cdot 10^3$ т кисню за рік. Максимальне впровадження АЕС для теплопостачання суттєво покращить екологічну обстановку в країні.

Одним з основних недоліків АЕС є теплове забруднення. Через співставлення приведених витрат при роботі атомної ТЕЦ, в режимі якої сьогодні працюють українські АЕС, та АЕС з тепловими насосами, де теплове забруднення повністю відсутнє, визначено приблизне значення податку на теплове забруднення 18,36-19,6 \$/Гкал. Якщо врахувати, що тепла енергія переходить до навколишнього середовища та в принципі нема технології, яка змінила б цей порядок, зроблено висновок, що вводити

податок на теплове забруднення недоцільно.

Ключові слова: атомні електричні станції, теплопостачання, теплова схема турбоустановки, теплофікаційні установки, теплові насоси, ефективність, вплив на екологію.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Статті у фахових виданнях України

1. V. Kravchenko, **A. Overchenko** (2023). Influence of pressure in the turbine condenser on heat supply efficiency of NPP with heat pump. *Proceeding of Odessa Polytechnic University works*. 2(68) 2023. P. 33-42. URL: <https://pratsi.op.edu.ua/index.php/pratsi/article/view/142> (Дата звернення 10.05.2023). DOI: 10.15276/opu.2.68.2023.04 (Категорія Б., Index Google Scholar, Index Copernicus, Polish Scholarly Bibliography, Primo Central (ExLibris), SHERPA/RoMEO, Ulrich's Periodicals Directory, Universal Impact Factor, WorldCat.) (1,11 д.а., особистий внесок: рекомендації, розроблено математичну модель теплової схеми турбоустановки з використанням теплового насосу для теплопостачання, проведено розрахунки та аналіз результатів - 0,90 д.а.)

2. **Оверченко А.О.**, Леус В.І., Кравченко В.П. Співставлення варіантів розташування теплових насосів для гарячого водопостачання від АЕС. *Ядерна енергетика та довкілля*. 2023. №3 (28). С. 16-25. URL: <https://npe.org.ua/wp-content/uploads/2024/05/28-3.pdf> (Дата звернення 10.08.2023). doi.org/10.31717/2311-8253.23.3.3 (Категорія Б, Index Google Scholar, Index Copernicus) (1,1 д.а., особистий внесок: рекомендації, розроблено математичну моделі транспорту теплоти від теплового насосу, розташованого біля АЕС чи поряд з споживачем, проведено розрахунки та проаналізовано результати - 0,76 д.а.)

3. Кравченко В.П., **Оверченко А.О.**, Хищенко М.М., Галацан М.П.,

Леус Б.А. Аналіз можливості використання АЕС з ВВЕР-1000 для розширеного теплопостачання. *Ядерна енергетика та довкілля*. №3 (31) 2024. С. 3-11. URL: <https://npe.kiev.ua/wp-content/uploads/2025/02/31-1.pdf> (Дата звернення 10.10.2024) doi.org/10.31717/2311-8253.24.3.1 (Категорія Б, Index Google Scholar, Index Copernicus) (0,92 д.а., особистий внесок: рекомендації, розроблено математичну модель теплової схеми турбоустановки з можливістю зміни потужності теплофікаційної установки, проведено розрахунки та проаналізовано результати - 0,65 д.а.)

4. Кравченко В.П. **Оверченко А.О.** Розширення можливостей атомних станцій малої потужності для теплопостачання. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. №4, 2025. с.24-29. <https://energy.kpi.ua/article/view/341299/329347> (Категорія А, Index WorldCat, BASE, Polska Bibliografia Naukowa, Academic Keys) (0,85 д.а., особистий внесок: розроблено математичну модель теплової схеми турбоустановки для SMR-160 для забезпечення максимальної потужності теплопостачання, проведено розрахунки та проаналізовано результати, висновки - 0,7 д.а.)

Опубліковані праці апробаційного характеру

5. Kravchenko V., Kolykhanov M., Muromsky E., Vysotsky Yu., Galatsan M., **Overchenko A.** Increasing the Efficiency of NPP by Using the Heat Pump for Heat Supply. Proceedings of the 13th International Conference of the Croatian Nuclear Society. Zadar, Croatia, June 5 – 8, 2022. P. 120-1--120-10. URL: <https://nuclear-option.org/wp-content/uploads/2022/11/S3-120.pdf> (Дата звернення 24.10.2023) (0,7 д.а., особистий внесок: розроблено алгоритм визначення теплофізичних властивостей фреонів, розрахунку теплового насосу, проведено розрахунки, проаналізовано результати - 0,3 д.а.)

6. Кравченко В.П., Козлов І.Л., **Оверченко А.О.** Вибір варіанту теплопостачання міст за допомогою атомних станцій малої потужності. Збірник тез доповідей IV Міжнародна конференція: «Перспективи

впровадження інновацій у атомну енергетику» 30 вересня 2022 р. Київ. Інститут газу НАНУ. С. 39-40. URL: <https://www.ispnpp.kiev.ua/wp-content/uploads/2022/10/zbirnyk-tez-IV.pdf> (Дата звернення 07.03.2023) (0,12 д.а., *особистий внесок: рекомендації, розроблено та розраховано теплову схему турбоустановки для АЕС малої потужності з підвищеною потужністю для теплопостачання – 0,06 д.а.*)

7. Кравченко В.П., Колиханов В.М., **Оверченко А.О.**, Висоцький Ю.І. Використання теплових насосів для теплопостачання від АЕС. Proceedings of the XXXII International Scientific and Practical Conference «Modern development of science and the latest perspectives», August 16 – 19, 2022, Vancouver, Canada. p.323-329. DOI – 10.46299/ISG.2022.1. URL: <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2022/08/Modern-development-of-science-and-the-latest-perspectives.pdf> (Дата звернення 12.12.2022). (0,72 д.а., *особистий внесок: рекомендації, проаналізовано використання конденсатору АЕС в якості низько температурного джерела теплоти для теплового насосу – 0,55 д.а.*)

8. Кравченко В.П., **Оверченко А.О.**, Козлов І.Л., Ковальчук В.І., Головін М.О., Козлов О.І. Перспективи використання атомної генерації в системах теплопостачання. Збірник трудів XXXII міжнародній конференції "Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики". 20-21 вересня 2022 року. С. 84-89. URL: https://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2023/12/sbornik_2023_ppp.pdf (Дата звернення 03.02.2023) (0,61 д.а., *особистий внесок: рекомендації, проаналізовано використання АЕС для теплопостачання міста Одеса – 0,25 д.а.*)

9. Белозьоров О.М., **Оверченко А.О.** Розробка стратегії розвитку інфраструктури теплопостачання міста Одеси з використанням технології SMR-160. **Збірник** наукових праць за матеріалами Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Еколого-енергетичні проблеми сучасності» Одеський національний технологічний університет 13-14 квітня 2023 р. С. 63-64. URL:

https://ontu.edu.ua/download/konfi/2023/materials_ekol_energ_probl_23.pdf

(Дата звернення 04.09.2023) (0,1 д.а., *особистий внесок*: проаналізовано можливість дальнього транспортування теплоти від АЕС по морському дну – 0,05 д.а.)

10. Кравченко В.П. **Оверченко** , **А.О.** Хищенко М.М., Галацан М.П., Леус Б.А. Визначення максимальної можливості блоку АЕС з ВВЕР-1000 для теплопостачання. Збірник доповідей VI Міжнародній конференції «Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику», 26-27 вересня 2024 року у м. Київ. С. 48-50. URL: <https://drive.google.com/file/d/1GXX3jN4xAwKeE4o7UYIB1Ays3BAWPm9e/view>

(Дата звернення 05.01.2025) (0,3 д.а., *особистий внесок*: рекомендації, проаналізовано отримані результати розрахунків відносно визначення максимальної потужності теплопостачання від АЕС – 0,15 д.а.)

11. Vladimir Kravchenko, Igor Kozlov, Volodymyr Vashchenko, Iryna Korduba, **Andrew Overchenko**, Serhii Tsybytovskiy. (2024). 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, p. 107-117. April 2024. DOI: 10.4236/wjnst.2024.142006. URL:

<https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=132315> (Дата звернення 07.07.2024) (1,05 д.а., *особистий внесок*: розроблено режим роботи турбоустановки АЕС малої потужності з максимальною потужністю теплопостачання, проаналізовано вплив теплопостачання від АЕС на екологію – 0,4 а.д.)