

РОЗШИРЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ АТОМНИХ СТАНЦІЙ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

У всьому світі зараз інтенсивно розробляються атомні станції малої потужності (АСМП) з малими модульними реакторами (ММР). Декларується широке використання АСМП для теплопостачання. Після аналізу використання АЕС для теплофікації отримано, що можливість АСМП для теплопостачання міст має обмеження за потужністю. Метою роботи є аналіз можливостей підвищення потужності теплопостачання від АСМП. Для цього запропоновано режим з відключенням циліндру низького тиску (ЦНТ) та догрівом мережевої води гострою парою. За результатом розрахунків в цьому режимі АСМП з реактором SMR-160 при потужності реактора 525 МВт забезпечує теплоспоживача потужністю 442,5 МВт та електричну потужність 36,1 МВт (температура прямої мережевої води 130 °С). Розглянуто використання теплового насоса (ТН), випарником якого слугує конденсатор турбіни. Цей режим роботи дозволяє виробити 448,62 МВт теплоти для споживача та 76,38 МВт електрики (температура мережевої води 65 °С). Враховуючи, що теплота в цих режимах постачається з різним потенціалом для порівняння варіантів використовується ексергетичний ККД, який для варіанту з ТН менше на 1,33 % (абс.).

Ключові слова: атомна станція малої потужності, турбоустановка, теплофікаційний режим, тепловий насос, ексергетичний ККД

Вступ. На сьогоднішній день у всьому світі чітко проявився тренд розвитку АЕС малої потужності (АСМП) з реакторами різних типів [1]. Реактори з потужністю до 300 МВт отримали назву SMR – Small Modular Reactor. Найбільш близькими до впровадження є проекти американських фірм NewScale Power и Holtec International.

Holtec International розробляє проєкт SMR-160, який відповідно має потужність 160 МВт (ел.) [2,3]. Проєкт NewScale Power передбачає дванадцять модулів потужністю 75 МВт (ел.) кожний [4]. Розробники заявляють можливість різного призначення своїх установок: виробництво електроенергії, теплопостачання, опріснення води, виробництво водню та інше. Найбільш відпрацьованими та затребуваними є звичайно дві перші позиції.

Одною з основних особливостей SMR є їх підвищена безпека. Це досягається в першу чергу шляхом застосування пасивних систем безпеки, використання природної циркуляції теплоносія в першому контурі, підземним розташуванням обладнання реакторного відділення та іншими засобами. Ще однією особливістю є незалежність розташування від наявності потужного джерела водопостачання. Охолодження необхідних споживачів, включаючи конденсатор турбіни, забезпечується повітряним охолодженням у сухих градирнях. Високі показники безпеки та незалежність від джерела води дозволяють розміщувати SMR у безпосередній близькості до населених пунктів, що робить їх цікавими для теплопостачання великих міст.

Вартість АСМП є доволі високою. Питома вартість, як відомо, з підвищенням потужності знижується. Звідси витікає, що для зниження собівартості продукції АСМП мають забезпечувати достатньо потужного споживача. Тепер розглянемо, які потреби мають крупні міста. В результаті аналізу сучасного стану теплопостачання в м. Одеса було отримано, що теплопостачання здійснюється районними котельнями, потужність кожної приблизно дорівнює 300 МВт. Треба відмітити, що сьогодні з ціллю економії палива у світі приділяється особлива увага центральному теплопостачанню. По-перше, це дозволяє економити паливо через більш високий ККД потужних котлів, ніж у котлів малої потужності; по-друге, суттєву економію палива можна забезпечити при комбінованому виробництві електричної та теплової енергії на ТЕЦ, де підігрів води здійснюється за рахунок відбору пари з турбіни [5]. При реконструкції ТЕЦ доцільно замінити джерело теплоти. Наявна інфраструктура дозволить суттєво зменшити фінансові витрати. У якості нового джерела енергії пропонуються АЕС, саме за допомогою яких можуть бути досягнуті цілі, позначені Паризькою угодою [6].

Оцінимо можливості АЕС, що використовуються сьогодні в Україні, для теплопостачання. Треба відмітити, що теплопостачання міст-супутників АЕС здійснюється у теплофікаційному режимі: мережева вода нагрівається при конденсації пари, що відбирається з турбіни [7]. При цьому при електричній потужності турбіни 1000 МВт теплова потужність теплофікаційної установки серійної турбіни К-1000-5,8/50 дорівнює 200 МВт. Треба відмітити, що при роботі конденсаційної турбіни є обмеження за мінімальним пропуском пари в конденсатор. Тому з конденсаційної турбіни неможливо відібрати велику

кількість пари на теплопостачання. Це означає, що для забезпечення тільки одного району міста Одеса треба використати 1,5 енергоблоки АЕС з реакторами ВВЕР-1000, що абсолютно неприйнятно. У вісімдесяти роки минулого сторіччя планувалося будівництво Одеської АТЕЦ, де мали стояти турбіни К-450/500-5,8. Тобто вони мали підвищений відбір пари на теплопостачання і у теплофікаційному режимі видавали електричну потужність 450 МВт, а влітку - 500 МВт.

Крім АТЕЦ, які звичайно мають турбіни для виробітку електроенергії та теплофікаційну установку, для теплопостачання можливо використання атомних станцій теплопостачання (АСТ), які призначені тільки для виробництва теплоти [8]. Це дозволяє зменшити параметри теплоносія і тим самим підвищити безпеку. Але в цьому разі втрачається перевага комбінованого виробництва теплової та електричної енергії. До того ж економічні показники АСТ, які будуть працювати тільки взимку, будуть відносно гірше.

Метою досліджень є пошук шляхів підвищення потужності теплопостачання АСМП та пропозиція найбільш оптимального варіанту.

Для досягнення поставленої мети було запропоновано два варіанти:

1) теплопостачання забезпечується теплофікаційною установкою, що включає два підігрівача мережевої води. Стандартна схема турбоустановки з двоциліндровою турбіною в теплофікаційному режимі змінюється: циліндр низького тиску (ЦНТ) відключається. Вся пара з вихлопу циліндру високого тиску (ЦВТ) спрямовується в підігрівач мережевої води 1-го ступеня, підігрівач мережевої води 2-го ступеня обігрівается гострою парою;

2) теплопостачання здійснюється тепловим насосом, випарником для якого використовується конденсатор турбіни. Турбоустановка працює в конденсаційному режимі.

Для можливості вибору найкращого варіанту потрібно виконати наступне:

- розрахувати теплову схему турбоустановки для теплофікаційного режиму, тобто при роботі без ЦНТ;
- розрахувати показники АЕС при використанні теплового насоса, який теплоту конденсації відпрацьованої пари передає споживачу після під'єму її потенціалу. Відпуск електричної потужності знижується за рахунок роботи компресору теплового насоса (ТН);
- розрахувати ексергетичний ККД для двох варіантів з урахуванням різної температури мережевої води у розглянутих варіантах.

Матеріал дослідження.

Варіант роботи АСМП у теплофікаційному режимі. У якості прикладу для розрахунків розглянемо використання SMR-160 для теплопостачання. Беручи за основу наведене раніше співвідношення між електричною та тепловою потужністю конденсаційної турбіни, отримуємо, що при електричній потужності 160 МВт можлива теплова потужність складе 32 МВт (160·200/1000). Звідси витікає, що SMR, які за визначенням мають електричну потужність до 300 МВт, не доцільно використовувати для теплопостачання великих міст за відомою технологією. Відносно мала теплова потужність буде отримана і в результаті аналізу теплової схеми другого контуру АСМП фірми NewScale [9], де опріснення води забезпечується теплофікаційними відборами з турбіни. Слід звернути увагу на наведену у [9] теплову схему турбоустановки. Така схема має розвинену систему регенерації теплоти та характерна для потужних турбоустановок. Для турбін, які будуть комплектувати АСМП фірми NewScale, більш підходять турбіни транспортних енергоустановок, які відпрацьовані та мають достатній досвід експлуатації. Ці турбіни мають один ПНТ та два ПВТ. Між циліндрами турбіни використовується сепаратор [10].

Початкові параметри ($P_0=3,4$ МПа) турбоустановок з реакторами типу PWR забезпечують ККД на рівні 30 %. Використовуючи наведені характеристики SMR-160, розрахунковий ККД дорівнює $\text{Нел}/Q_{\text{реакт.}} = 160/525=0,3047$. Це означає, що в потужності реактора не закладено можливості додаткового виробітку теплоти. Це треба було визначити тому, що, наприклад, в установці KLT-40S при електричній потужності турбіни 35 МВт потужність реактора 150 МВт, що перевищує необхідну для турбіни потужність $35/0,30=117$ МВт. Тобто в проєкті передбачено виробництво теплоти для споживача: $25 \text{ Гкал/год} = 29 \text{ МВт}$.

Якщо використовувати SMR-160 у якості АСТ, то при тепловій потужності реактора 525 МВт, він може успішно забезпечити теплотою район крупного міста у режимі АСТ. Але тут постає питання економіки. При конфігурації АСТ станція буде працювати тільки в опалювальний період, що робить її неекономічною. Для забезпечення роботи цілий рік схема АСМП повинна мати обладнання для обох режимів: конденсаційного при виробітку тільки електроенергії літом та теплового для теплозабезпечення взимку (рис.1). Влітку АСМП працює у конденсаційному режимі: задіяна основна двоциліндрова турбіна 3. Взимку пропонується перехід на теплофікаційний режим: відключається циліндр низького тиску та вся пара з вихлопу циліндру високого тиску направляється в систему регенерації теплоти та на теплофікаційну установку (ТФУ). Термодинамічно вигідно підігрівати воду у двох ступенях: спочатку відбірною парою, а потім гострою парою.

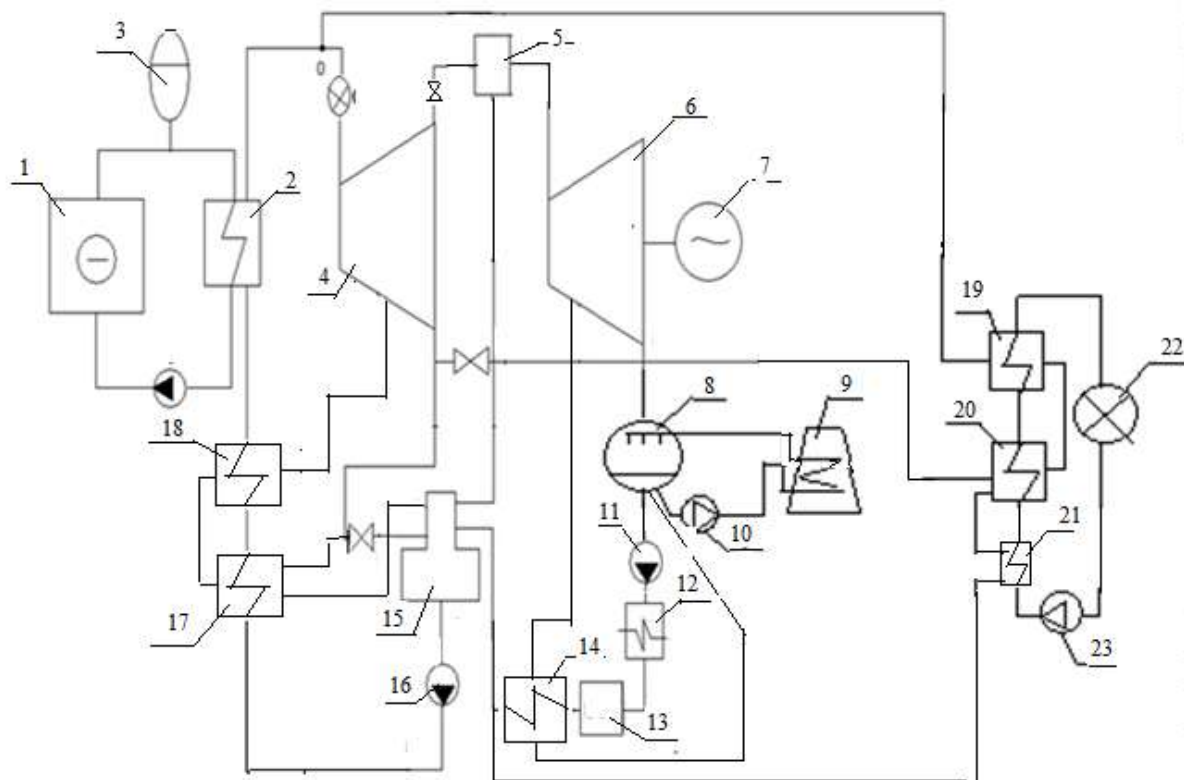


Рисунок 1 - Принципова схема АСМП для роботи в конденсаційному режимі влітку та у теплофікаційному режимі взимку:

1 – реактор; 2 – парогенератор; 3- компенсатор тиску; 4 – циліндр високого тиску парової турбіни; 5 – сепаратор; 6 - циліндр низького тиску; 7 - електрогенератор; 8 – конденсатор змішення; 9 – суха градирня; 10 – циркуляційний насос; 11 - конденсатний насос; 12 – охолоджувач ежекторів; 13 – знесолююча установка; 14 - підігрівач низького тиску; 15 – деаератор; 16 – живильний насос; 17 – підігрівач високого тиску (ПВТ) №1; 18 – ПВТ-2; 19 підігрівач мережової води (ПМВ-2); 20 – ПМВ-1; 21 – охолоджувач дренажу; 22 – споживач теплоти; 23 – мережовий насос.

Для визначення максимально можливої теплової потужності теплоспоживача була розрахована теплова схема турбоустановки у теплофікаційному режимі (рис.2). Вихідні дані для розрахунку наведено в табл. 1.

Таблиця 1 - Вихідні дані для розрахунку теплової схеми рис. 2

Найменування параметру	Значення
1. Потужність реактора (парогенератору), МВт	525
2. Параметри гострої пари: тиск, МПа	3,4
температура, °C	285
3. Тиск в деаераторі, МПа	0,1
4. Температура прямої мережової води, °C	130
5. Температура зворотної мережової води, °C	70
6. Тиск пари за ЦВТ, МПа	0,357

Методика розрахунку. Спочатку була розрахована теплофікаційна установка при будь-якій потужності теплоспоживача. В результаті розрахунку при потужності ТФУ 50 МВт було отримано: витрати пари на мережіві підігрівачі $D_2 = 13,014$ кг/с; $D_7 = 9,44$ кг/с; співвідношення витрати гострої пари до витрати пари на ПМВ-1: $D_2/D_7 = 1,3785$.

За методикою розрахунку теплових схем турбоустановок [11] у вузлових точках схеми спочатку визначаються температура, тиск та ентальпія. З матеріально-енергетичного балансу парогенератору визначається витрата пари з ПГ та живильної води:

$$D_0 = Q_{\text{пг}} / (h_0 - h_{\text{жв}}) = 525000 / (2946,8 - 721) = 237,8 \text{ кг/с},$$

де $Q_{\text{пг}}$ - теплова потужність парогенератору;
 $h_0, h_{\text{жв}}$ – ентальпія гострої пари та живильної води, відповідно.

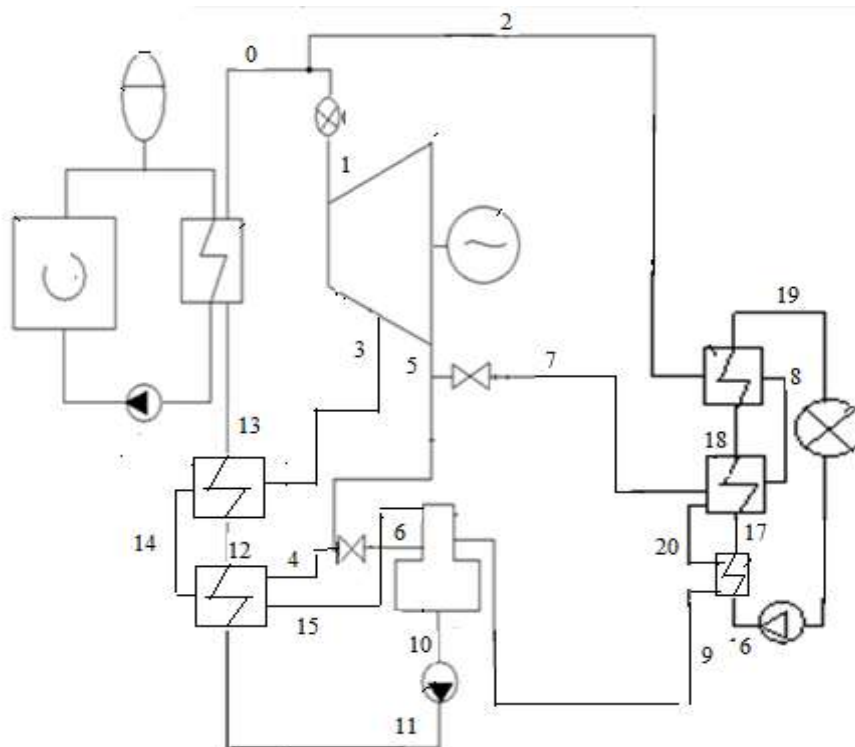


Рисунок 2 - Розрахункова схема роботи АСМП у теплофікаційному режимі

В результаті розрахунку рівнянь матеріально-енергетичного балансу послідовно ПВТ-2, ПВТ-1 та деаератору визначаються витрати пари на ці елементи схеми: D_3 , D_4 , D_6 та D_9 . У свою чергу:

$$D_9 = D_7 + D_2,$$

звідки $D_7 = D_9 / 2,3785 = 83,7$ кг/с; $D_2 = 115,4$ кг/с.

Потужність теплоспоживача визначиться з пропорції:

$$D_7 = 9,44 \text{ кг/с} \text{ відповідає потужності } 50 \text{ МВт};$$

$$D_7 = 83,7 \text{ кг/с} \text{ забезпечить потужність } X.$$

З цієї пропорції отримаємо, що запропонована схема при потужності реактора 525 МВт забезпечить в теплофікаційному режимі відпуск теплоти 442,5 МВт.

Електрична потужність турбоустановки в теплофікаційному режимі:

$$N_{\text{ел}} = (D_1 \cdot (h_0 - h_3) + (D_1 - D_3) \cdot (h_3 - h_5)) \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{ген}} = 36,1 \text{ МВт}.$$

Використання теплових насосів для теплопостачання. Відомий досвід Швеції використання теплових насосів (ТН) для теплопостачання [12]. При розгляді АСМП з турбоустановкою цікавим є використання теплоти конденсації пари у якості джерела низької потенційної теплоти. В цьому випадку взимку слід використовувати конденсатор поверхового типу з використанням фреону у якості середі охолодження. Це дозволить знизити кінцевий тиск в конденсаторі та підвищити ККД турбоустановки. При цьому підвищиться виробіток електроенергії. З другого боку з підвищенням температури конденсації росте коефіцієнт перетворення енергії теплового насоса COP [13]. Таким чином, зміною витрати фреону через конденсатор можна буде впливати на відношення між виробітком електроенергії та теплоти.

Оцінимо максимальну потужність теплопостачання для АСМП з SMR-160 при використанні теплового насоса. У [13] приводиться розрахунок теплового насоса для умов АЕС. З наведених результатів можна зробити висновок, що при температурі конденсації пари в конденсаторі $32,9^\circ\text{C}$ та нагріві води до

65°C $\text{COP} = 5,365$. В SMR-160 потужність конденсатора турбіни дорівнює:

$$Q_{\text{конд}} = Q_{\text{випТН}} = Q_{\text{реактор}} - N_{\text{ел}} = 525 - 160 = 365 \text{ МВт},$$

де $Q_{\text{випТН}}$ – теплова потужність випарника теплового насоса;

$Q_{\text{реактор}}$ – теплова потужність реактора;

$N_{\text{ел}}$ – електрична потужність турбоустановки.

Тобто потужність випарника для ТН дорівнює 365 МВт.

Для теплового насосу:

$$\begin{aligned} Q_{\text{кондТН}} &= Q_{\text{випТН}} + N_{\text{компр}}; \\ Q_{\text{кондТН}} &= Q_{\text{випТН}} + Q_{\text{кондТН}} / \text{COP}; \\ Q_{\text{кондТН}} &= Q_{\text{випТН}} / (1 - 1/\text{COP}) = 365 / (1 - 1/5,365) = 448,62 \text{ МВт}; \\ N_{\text{компр}} &= Q_{\text{кондТН}} / \text{COP} = 448,62 / 5,365 = 83,62 \text{ МВт}, \end{aligned}$$

де $Q_{\text{кондТН}}$ – теплова потужність конденсатору теплового насосу,
 $N_{\text{компр}}$ – потужність приводу компресору.

Таким чином, використання теплового насосу з конденсатором парової турбіни у якості низькопотенційного джерела енергії дозволить виробити 448,62 МВт теплоти для теплоспоживача та $N_{\text{турб}} - N_{\text{компр}} = 160 - 83,62 = 76,38$ МВт електроенергії.

В табл. 2 наведено результати розрахунків розглянутих варіантів теплової схеми АСМП. З наведених результатів видно, що перший варіант (конденсаційний режим з теплофікаційними відборами) програє через неможливість забезпечити достатньо велику теплову потужність споживача. Дві наступні схеми (а – з відключенням ЦНТ та б – використання теплового насосу) по тепловій потужності теплопостачання практично однакові, але схема з використанням ТН має вдвічі більшу електричну потужність і тому на перший погляд вона має перевагу.

Слід зауважити, що при використанні варіанту а мережева вода має температуру 130 °С, а при використанні ТН – 65 °С. Ця різниця може бути врахована при розрахунку ексергетичного ККД [14]:

$$\eta_{\text{ex}} = (N_{\text{el}} + E_q) / Q_r,$$

де N_{el} – електрична потужність;
 E_q – ексергія теплової потужності;
 Q_r – теплова потужність реактора.

Таблиця 2 - Порівняння різних схем використання АСМП з SMR-160 з точки зору виробітку електричної та теплової енергії

Теплова схема	Нел, МВт	Q _{тепл} , МВт	E _q , МВт	ККД _{ex} , %
Конденсаційний режим	150	32	-	-
Схема рис. 2	36,1	442,5	116,3	29,03
Використання ТН	76,38	448,62	69,9	27,7

З наведених в табл. 2 даних, ексергетичний ККД для варіанту з використанням ТФУ на 1,33 % (абс.) вище, ніж при використанні ТН, що пояснюється більшою температурою мережевої води у варіанті використання теплофікаційної установки в порівнянні з використанням теплового насосу.

Висновки. З проведеного аналізу використання конденсаційних турбін для теплофікації отримано, що можливість SMR для теплопостачання міст має обмеження за потужністю.

Для підвищення потужності теплопостачання запропоновано схему з використанням ЦВТ у протитисковому режимі та догрівом мережевої води гострою парою. В цьому режимі роботи АСМП з SMR-160 при потужності реактора 525 МВт забезпечує теплоспоживача потужністю 442,5 МВт та електричну потужність 36,1 МВт.

Розглянуто використання теплового насосу, випарником якого слугує конденсатор турбіни. Цей режим роботи дозволяє виробити 448,62 МВт теплової енергії для теплоспоживача та 76,38 МВт електричної потужності.

Враховуючи, що теплота в цих режимах постачається з різним потенціалом (при протисковому режимі температура прямої мережевої води 130 °С, при використанні ТН температура прямої мережевої води 65 °С) для порівняння цих варіантів був використаний ексергетичний ККД. З порівняння двох розглянутих засобів теплопостачання зроблено висновок про перевагу протитискового режиму, для якого ексергетичний ККД більше ніж ККД схеми з використанням теплового насосу на 1,33 % (абс.).

V. Kravchenko¹, Dr. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-7557-3327

A. Overchenko¹, PhD student, ORCID 0000-0002-0527-118X

¹National University “Odesa Polytechnic”

EXPANDING THE CAPACITY OF SMALL-POWER NUCLEAR POWER PLANTS FOR HEAT SUPPLY

All over the world, low power nuclear power plants (LPNPP) with small modular reactors (SMR) are currently being intensively developed. The widespread use of SSP for heat supply is declared. After analyzing the

use of large nuclear power plants for district heating, it was found that the possibility of SMR for urban heat supply has limitations in terms of capacity. Thus, a nuclear power plant with a VVER-1000 reactor usually has a heating plant with a capacity of no more than 200 MW. The thermal capacity of one district of a large city (for example, Odessa) is approximately 300 MW. This means that SSP are not able to provide even one district of a large city. To increase the heat supply capacity, a mode with the low-pressure turbine (LPT) turned off is proposed. The high-pressure turbine (HPT) operates in a counter-pressure mode. The network water is sequentially heated in two heaters, which are supplied with steam from the HPT exhaust and hot steam, respectively. According to the results of calculations, in this mode, the LPNPP with the SMR-160 reactor at a reactor power of 525 MW provides heat consumers with a capacity of 442.5 MW and electrical power of 36.1 MW (direct network water temperature 130 °C). The use of a heat pump (HP) with a turbine condenser as the evaporator is considered. This operating mode allows the release of 448.62 MW of heat for the consumer and 76.38 MW of electricity (network water temperature 65 °C). Comparison of the given data shows the advantage of using HT, but it is necessary to pay attention to the different potential of the released heat. The quality of heat is taken into account when determining the exergy efficiency, which for the variant with a heating plant is 1.33% higher (abs.).

Keywords: low power nuclear power plants, turbine plant, heating mode, heat pump, exergy efficiency.

References

1. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). 2018 Edition. IAEA.
2. SMR-160. A Safe and Secure Nuclear Energy Future for Ukraine. Holtec International. (https://www.slideshare.net/Ukrainian_Nuclear_Society/smr160-a-safe-and-secure-nuclear-energy-future-forukraine). (accessed at 15.04.2025).
3. SMR-160. Briefing to the USNRC, July 26, 2012. By SMR LLC, Holtec Center, 1001 U.S. Highway 1 North Jupiter, Florida 33477, USAю <https://www.nrc.gov/docs/ML1220/ML12205A143.pdf>. (accessed at 15.04.2025).
4. Handbook of Small Modular Nuclear Reactors. *Second Edition*. A volume in Woodhead Publishing Series in Energy. Book. Second Edition. 2020 (<https://www.sciencedirect.com/book/9780128239162/handbook-of-small-modular-nuclear-reactors#book-info>) (accessed at 15.04.2025).
5. Theory and calculation of steam and gas turbines [Text]: textbook. / G. F. Romanovskiy et al.; Ukrainian State Marine Technical University named after Makarov. – Mykolaiv: UDMTU, 2002. – 292 p.
6. IAEA on COP26: Як ядерна енергетика та технології можуть допомогти подолати зміну клімату. http://www.atomforum.org.ua/news/2021/magate_na_cop26_yak_yaderna_energetika_ta_tehnologiyi_mozhut_dopomogti_podolati_zminu_klimatu
7. G.P. Verkhivker, V.P. Kravchenko. Heat supply from nuclear power plants: textbook / edited by V. A. Dubkovsky. – Odessa: VMV, 2010. – 486 p.
8. G.P. Verkhivker, V.P. Kravchenko. Fundamentals of calculation and design of nuclear power reactors: textbook. – Odesa: TES, 2008. – 405 p.
9. Seyed Hadi Ghazaie 1, Khashayar Sadeghi, Ekaterina Sokolova, Evgeniy Fedorovich and Amirsaeed Shiran. (2020) Comparative Analysis of Hybrid Desalination Technologies Powered by SMR. *Energy*, 13(5006):5006 DOI: 10.3390/en13195006
10. Zhou, Xiaolong. Improvement of the calculation method of a direct-flow steam generator for small-power nuclear power plants: dissertation ... Doctor of Philosophy: speciality 143 - Atomic Energy / Xiaolong Zhou; scientific supervisor. V. P. Kravchenko; State Univ. "Odesa Polytechnic". - Odesa, 2021. - 176 p. https://op.edu.ua/sites/default/files/publicFiles/dissphd/dysertaciya_chzhou_143.pdf
11. Kirov V.S. Thermal schemes of nuclear power plant turbines and their calculation. – K.: Astroprint, 2004. – 212 p.
12. H. Averfalk, P. Ingvarsson, U. Persson and S. Werner On the Use of Surplus Electricity in District Heating Systems // Proceedings from the 14th International Symposium on District Heating and Cooling: September, 6-10, 2014. - Stockholm, Sweden. -P. 469- 474.
13. Increasing the Efficiency of NPP by Using the Heat Pump for Heat Supply / Kravchenko V., Kolykhanov M., Muromsky E., Vysotsky Yu., Galatsan M. // Proceedings of the 13th International Conference of the Croatian Nuclear Society. Zadar, Croatia, June 5 – 8, 2022. P. 120-1--120-10
14. V.A. Dubkovskii. Thermodynamic analysis and optimization of nuclear power plants. – Odesa: Science and Technology, 2005. – 96 p.

Надійшла: 05.09.2025

Received: 0509.2025