

О. Ю. ЧЕРНОУСЕНКО, Т. В. НИКУЛЕНКОВА, А. Г. НИКУЛЕНКОВ

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОБЛОКІВ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ (ЧАСТИНА 1)

АНОТАЦІЯ Для України реалізація резервів збільшення потужності діючих енергоблоків атомних електростанцій є нагальним завданням, рішення якого дозволить підвищити обсяги генерації електроенергії. При цьому, важливу роль відіграє і економічна вигода – підвищення потужності на 1 кВт обходиться приблизно в 10 разів дешевше, ніж вартість будівництва 1 кВт нової потужності. Ще один фактор – це світовий досвід з підвищення потужності. Спираючись на вказану актуальність, в роботі проаналізований міжнародний досвід щодо підвищення теплової потужності енергоблоків АЕС, а також приведені основні механізми та інструментарій з реалізації даної модифікації на атомних енергоблоках України. Встановлені рекомендації щодо об'єму необхідних заходів та обґрунтувань, які необхідні для впровадження відповідного рівня підвищення теплової потужності для українських енергоблоків з ВВЕР-1000 та ВВЕР-440.

Ключові слова: водо-водяний енергетичний реактор, безпечна експлуатація, підвищення теплової потужності, енергоблок, циліндр високого тиску, електроенергія.

О. CHERNOUSENKO, T. NIKULENKOVA, A. NIKULENKOV

ANALYSIS OF THE OPPORTUNITY FOR AN INCREASE IN THE THERMAL POWER OF POWER GENERATING UNITS OF NUCLEAR POWER PLANTS (PART 1)

ABSTRACT For Ukraine the realization of available reserves to increase the power of operating power units of nuclear plants is a vital problem the solution of which would allow us to increase electric power output. A special role is also played by economic priorities; in particular an increase in power by 1 kW is ten times cheaper in comparison with the construction of 1 kW of new power facilities. One more factor is the world experience in the field of an increase in the thermal power of operating power units of nuclear power plants. Based on the specified urgency this scientific paper analyzes the international experience gained in the field of an increase in the thermal power of the power units for nuclear power plants and describes the main mechanisms and instrumentation required for the realization of the given modification of nuclear power units in Ukraine. The reserves embedded into the project to enable an increase in the thermal power of power units were represented graphically. Recommendations on the scope of appropriate measures to be taken and substantiations required for the implementation of the appropriate level of an increase in the thermal power of Ukrainian power units with water-moderated water-cooled power reactors VVER-1000 and VVER-440 have been given.

Key words: water-moderated water-cooled power reactor, safe operation, increase in the thermal power, power unit high pressure cylinder and the electric power.

Вступ

Досвід експлуатації водо-водяних енергетичних реакторів (ВВЕР) як на українських, так і зарубіжних АЕС підтверджує надійну і безпечну роботу основного обладнання, обслуговуючих систем і енергоблоків в цілому. При цьому, фактичні характеристики систем безпеки, активної зони, реактора та реакторної установки, включаючи другий контур, які визначають безпечні умови експлуатації мають запаси. Закладання певних запасів на стадії проектування дозволяє врахувати певні невизначеності, що стосуються обладнання, дій персоналу, а також потенційно врахувати невідомі та непередбачувані механізми деградації чи феномени, що можуть виникнути під час гарантійного часу експлуатації ядерної установки. Досягнений рівень наукових знань у поєднанні з застосуванням сучасного розрахункового інструментарію, а також аналізом досвіду експлуатації надає широкі можливості щодо зменшення консерватизму, який був закладений на етапі проектування.

В даний час значно підвищилася точність теплотехнічних і нейтронно-фізичних розрахунків,

а також точність теплотехнічних вимірювань. Таким чином, склалися об'єктивні передумови для пошуку і реалізації резервів, закладених в проектні основи енергоблоків ВВЕР.

Мета роботи

Вирішення завдання реалізації резервів збільшення потужності діючих енергоблоків АЕС, що дозволить підвищити обсяги генерації електроенергії без істотних витрат.

Загальні принципи підвищення потужності діючих енергоблоків АЕС

Реакторні установки з водою під тиском (*PWR*), включаючи ВВЕР, успішно експлуатуються у різних країнах світу. Вони спроектовані з досить великим запасом по основним критичним параметрам та функціям, що забезпечує їх безпечну та надійну експлуатацію. По мірі накопичення досвіду ці запаси можна ефективно використовувати. Виконані наукові дослідження (як в Європі, так і в США), що були спрямовані на виявлення

© О. Ю. Черноусенко, Т. В. Нікулєнкова, А. Г. Нікулєнков, 2017

меж експлуатаційної безпеки енергоблоків, показали, що потужність вказаних реакторних установок, без зменшення рівня безпеки, можливо збільшити, в залежності від специфічних особливостей, до 15–20 % [1].

На сьогоднішній день програма з підвищення потужності енергоблоків АЕС реалізована у ряді країн світу. Так, наприклад, на АЕС «Ловіза» (Фінляндія) з реакторами ВВЕР-440 – теплова потужність реакторів збільшена з 1375 до 1500 МВт (109 % від проектної номінальної), на АЕС «Дуковані» (Чехія) з реакторами ВВЕР-440 – виконані роботи з підвищення потужності для енергоблоків № 3, 4 до 105 % від проектної номінальної, на АЕС «Пакш» (Угорщина) з реакторами ВВЕР-440 – виконані роботи з підвищення потужності до 108 %, на АЕС «Богуніце» (Словаччина) з реакторами ВВЕР-440 – виконані роботи з підвищення потужності для енергоблоків № 3, 4 до 107 %. Роботи з підвищення теплової потужності ВВЕР-1000 до 104 % виконані на енергоблоці № 2 Балаковської АЕС і на енергоблоці № 1 Волгодонської АЕС та продовжуються на всіх інших енергоблоках АЕС Росії з ВВЕР-1000. Аналогічні роботи проводяться в ряді інших європейських країн і США. Це нормальна світова практика.

Якщо розглядати американський досвід, то підвищення потужності енергоблоків на 104 % – це, можна сказати, лише стартова величина. У кожному конкретному випадку комісія приймає обґрунтоване рішення на підставі наданих обґрунтувань щодо можливості підвищення потужності навіть на 20 %.

В Росії пілотною атомною станцією, на якій вперше став втілюватися в життя проект з підвищення потужності енергоблоку, стала Балаковська АЕС. Енергоблоки Балаковської атомної станції вже декілька років працюють на підвищеному рівні потужності – два роки всі чотири енергоблоки на потужності 104 % в режимі дослідно-промислової експлуатації, а енергоблок № 2 – 4 роки (з них два – в промисловій експлуатації). За цей час вони вже довели свою безпеку при роботі в такому режимі.

В Україні в якості пілотного проекту на Южно-Українській АЕС був проведений аналіз можливості підвищення теплової потужності реактора до 3045 МВт за рахунок виконання комплексу робіт з підвищення точності вимірювання витрати живильної води на 1,0 % і підвищення точності регулювання потужності реактора на 0,5 % [2].

Аналізуючи міжнародний досвід можна виділити наступні три рівня підвищення потужності енергоблоків АЕС:

1 Підвищення потужності за рахунок підвищення точності вимірювання.

В даному випадку можливе підвищення потужності до 2 % від номінальної. Підвищення ба-

зується на покращенні точності методів вимірювання витрати живильної води. Даний фактор є домінуючим і впливає на загальну похибку калориметрування активної зони реакторної установки. Заміна проектних витратомірів на витратоміри підвищеної точності вимірювання витрати живильної води дозволяє підвищити теплову потужність енергоблоку.

2 Підвищення потужності в рамках проектних можливостей енергоблоку.

В даному випадку можливо підвищення потужності до 10 % від номінальної, як правило в межах проектних можливостей енергоблоку АЕС, шляхом використання конструкторського запасу, вдосконалення систем вимірювання і технологічних систем.

3 Розширене підвищення потужності.

В даному випадку передбачається модернізація або заміна основного обладнання АЕС і забезпечується підвищення електричної потужності на величину до 20 %.

На сьогоднішній день на АЕС України заплановано підвищення потужності по двох з вище перелічених рівнів, а саме:

1) підвищення теплової потужності на 1,5 % від номінальної для: енергоблоків № 1, 2 Южно-Української АЕС; енергоблоків № 3, 4 Рівненської АЕС; енергоблоків № 1, 2 Хмельницької АЕС; енергоблоку № 2 Запорізької АЕС;

2) підвищення потужності на 4 % від номінальної для енергоблоку № 6 Запорізької АЕС (пілотний проект) з подальшим поширенням досвіду на енергоблоки ВВЕР-1000; підвищення потужності до 8 % від номінальної для енергоблоків № 1, 2 Рівненської АЕС.

Згідно встановлених в Україні норм і правил [3] процес підвищення потужності для діючих атомних енергоблоків здійснюється по нижченаведеному алгоритму:

1 Розробка та узгодження з Держатомрегулювання концептуального рішення щодо проведення модифікації.

2 Розробка та узгодження з Держатомрегулювання технічного рішення на монтаж об'єкту модифікації (ОМ):

а) впровадження ОМ (монтаж);

б) проведення комплексних випробувань ОМ в складі ядерної установки.

3 Розробка та узгодження з Держатомрегулювання технічного рішення про введення ОМ в дослідну експлуатацію:

а) дослідна експлуатація;

б) випробування ОМ перед введенням в промислову експлуатацію.

4 Розробка та узгодження з Держатомрегулювання технічного рішення про введення ОМ в промислову експлуатацію.

Держатомрегулювання України – це орган, який здійснює постійний контроль на всіх етапах

проведення модифікації шляхом проведення оцінки безпеки матеріалів та узгодження відповідних технічних рішень, а також безпосереднього нагляду за виконанням модифікацій, внесенням змін в експлуатаційну документацію і навчанням персоналу.

Крім цього важливою умовою при підвищенні потужності є проведення державної експертизи ядерної та радіаційної безпеки (ЯРБ), метою якої є:

- оцінка відповідності наданих матеріалів фундаментальним та організаційно-технічним принципам і критеріям з ЯРБ;

- оцінка відповідності запропонованих рішень вимогам Законів України, нормативно-

правових актів і стандартів з ЯРБ;

- визначення повноти, достатності та обґрунтованості передбачених організаційних і технічних заходів;

- підготовка об'єктивного та обґрунтованого висновку державної експертизи ЯРБ.

Для підвищення теплової потужності реактора енергоблоку АЕС вводиться в дію «Програма робіт з підвищення теплової потужності реакторів діючих енергоблоків». За умови виконання робіт, передбачених даною програмою, підкріплених аналітичними та розрахунковими обґрунтуваннями, приймається рішення про введення в дослідну експлуатацію енергоблоку АЕС (табл. 1).

Таблиця 1 – Рекомендований перелік заходів з підвищення теплової потужності енергоблоків, передбачених «Програмою робіт з підвищення теплової потужності реакторів діючих енергоблоків АЕС до 3045 МВт»

№	Найменування заходів
Обладнання і системи реакторної установки	
1	Провести контрольні вимірювання параметрів енергоблоку і скласти теплові баланси першого та другого контурів після заміни засобів вимірювання витрати і температури живильної води
2	Виконати перевірку теплогідравлічних характеристик реактора, парогенераторів, обладнання спецоочистки першого контуру
Обладнання турбінного відділення	
3	Заміна і монтаж звужуючих пристроїв живильної води
4	Отримати підтвердження від заводу-виготовлювача щодо можливості роботи турбіни з електричним навантаженням 1062 МВт. Виконати розрахунок теплової схеми 2-го контуру
Електротехнічні системи і обладнання	
5	Отримати від заводу-виготовлювача турбогенераторів підтвердження щодо можливості тривалої експлуатації турбогенератора з електричним навантаженням 1060 МВт
6	Провести теплові дослідження турбогенератора для оцінки теплових характеристик активних елементів статора
7	Провести дослідження вібрації для турбогенератора, враховуючи підвищення потужності
Автоматичні системи управління технологічними процесами	
8	Заміна термометрів опору, датчиків вимірювання перепаду тиску на звужуючих пристроях живильної води на датчики класу точності 0,25
9	Провести зміни алгоритмів і шкали вимірювання витрати живильної води парогенераторів в математичному забезпеченні системи внутрішнього реакторного контролю
10	Опрацювати можливості зміни зони нечутливості автоматичного регулятора потужності до 1 %

Підвищення встановленої потужності на АЕС з ВВЕР-1000

З метою збільшення вироблення електроенергії за рахунок інженерних запасів основного обладнання при збереженні основних проектних рішень можливе підвищення теплової потужності енергоблоку АЕС [4].

Основними резервами підвищення встановленої потужності на АЕС з ВВЕР-1000 є: конструктивні особливості реактора, що дозволяють підняти його теплову потужність; можливість оптимізації схем паророзподілу і живильної води; резерви, закладені в підвищенні рівня потужності парогенераторів, турбоустановки і трансформаторів; можливість оптимізації систем охолодження обла-

днання; наявність висококваліфікованого персоналу для оперативного та ремонтного обслуговування обладнання.

В проектах енергоблоків ВВЕР-1000 показано виконання критеріїв надійності охолодження твелів в активній зоні реакторів і критеріїв надійності основних систем реакторної установки для режимів з нормальними умовами експлуатації, режимів з порушенням нормальних умов експлуатації і режимів проектних аварій. При виконанні розрахункових обґрунтувань для підтвердження даних критеріїв враховувались: похибки вимірювання і підтримки параметрів реакторної установки; похибки і допуски виготовлення палива; похибки розрахункових методологій для нейтронно-фізичного і теплогідравлічного аналізів; похибки

кореляційної залежності, яка використовується для визначення коефіцієнту запасу до кризи тепловіддачі тощо.

Вищевказані невизначеності в проектах ВВЕР-1000 закладені з використанням консервативного підходу.

Закладені консервативні проектні запаси, на прикладі теплової потужності ядерної енергетичної установки, графічно представлено на рис. 1.

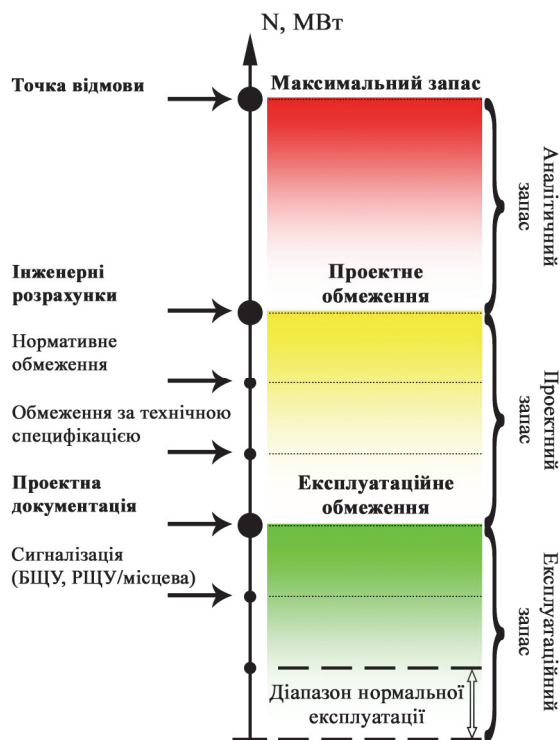


Рис. 1 – Графічне представлення закладених в проект ядерної реакторної установки консервативних запасів

Досвід з експлуатації ядерного палива і реакторної установки ВВЕР-1000, а також удосконалення розрахункових методик і кодів, уточнення початкових умов (в рамках впровадження нових конструкцій тепловідляючих збірок), що застосовуються при аналізі безпеки, дозволяє знизити консерватизм, закладений проектом в 70-ті роки для ВВЕР. Наприклад, нова проектна документація на тепловідляючі збірки вже частково враховує реальні зміни параметрів реакторної установки замість консервативних. Зменшені значення інженерних коефіцієнтів запасу на лінійне навантаження твелів і підігрів теплоносія. В розрахунках режимів з нормальними умовами експлуатації і режимів з порушенням нормальних умов експлуатації витрата через реактор енергоблоку береться по результатах вимірювань під час експлуатації.

Для реалізації вищезазначеного сценарію, окрім зазначеного, щонайменше необхідно провести такі роботи як:

– заміна звужуючих пристроїв вимірювання витрати живильної води парогенераторів;

– заміна діючих термометрів опору на термометри опору першого класу точності на трубопроводі живильної води парогенератора з метою зменшення похибки вимірювання температури живильної води;

– заміна датчиків вимірювання перепаду тиску на звужуючих пристроях вимірювання витрати живильної води парогенератора на датчики класу точності 0,25 з метою зменшення похибки вимірювання витрати живильної води;

– виключення блоку добування кореня і діодних розв'язок в вимірювальному тракті витрати живильної води парогенератора;

– випуск обґрунтованих матеріалів щодо підвищення точності регулювання нейтронної потужності та коригування алгоритмів і програмно-технічного комплексу АРП (автоматичного регулятора потужності);

– проведення теплових випробувань турбогенератора, парогенератора, турбоживильного насосу, конденсаційного електричного насосу для оцінки теплових характеристик;

– проведення обстежень електротехнічного обладнання (трансформатора, вимикачів, трансформаторів тощо), допоміжного обладнання (систем вентиляції, технічного водопостачання) і проведення інших робіт.

На практиці теплову потужність активної зони безпосередньо виміряти неможливо, тому величина теплової потужності отримується розрахунковим шляхом, за допомогою математичної обробки прямих теплотехнічних і нейтронно-фізичних вимірювань в апаратурі СВРК (система внутрішньо реакторного контролю) за спеціальним алгоритмом. В результаті розрахунку отримують середньозважене значення теплової потужності активної зони $N_{акз}$, яке і використовується в процесі експлуатації енергоблоку. Найбільш точними є теплотехнічні вимірювання, тому регламентом передбачається обов'язкове включення в алгоритм розрахунку $N_{акз}$ розрахованих значень за параметрами першого і другого контурів ($N_{1к}$, $N_{2к}$).

Похибка визначення $N_{акз}$ в проекті прийнята 2 %, проте виконана на енергоблоці № 1 Южно-Української АЕС модифікація системи вимірювання параметрів 2-го контуру дозволила істотно зменшити похибку вимірювання витрати та температури, і, отже, точність розрахунку потужності реактора за параметрами 2-го контуру. Таким чином, модифікований алгоритм розрахунку $N_{акз}$ дає похибку $0,75 \% \cdot N_{ном}$.

Для впровадження підвищення потужності, що є по своїй сутності модифікацією, необхідно провести аналіз впливу цієї модифікації для режимів: «нормальні умови експлуатації», «порушення нормальних умов експлуатації», «проектні аварії» з точки зору підтвердження неперевиконання встановлених меж безпечної експлуатації ядерної енергетичної установки.

Обґрунтування безпеки об'єкту модифікації при підвищенні дозволеної потужності енергоблоків АЕС з реакторами ВВЕР-440 і ВВЕР-1000

В цілому рівень безпеки АЕС і будь-якого технічно складного інженерного об'єкта залежить на практиці від чотирьох чинників: рівня професійної кваліфікації персоналу; рівня фізичного зносу обладнання; ефективності системи управління технологічною та екологічною безпекою АЕС. Детальний аналіз усіх зазначених чинників дозволяє зробити висновок про можливість підвищення теплової потужності енергоблоку до 104 % без зниження експлуатаційної надійності і екологічної безпеки.

Безпека модифікації забезпечується наступними факторами:

- відповідністю вимогам нормативних документів прийнятих проектних рішень в частині структури системи і вибору технічних засобів;
- виконанням програм забезпечення якості на всіх етапах впровадження модифікації;
- підтвердженням вимог до обладнання, випробуваннями на всіх стадіях їх створення і введення в експлуатацію;
- використанням апробованих проектних рішень, технічних і програмних засобів, методик випробувань;
- експертизою ядерної та радіаційної безпеки документів по створенню і впровадженню модифікованої системи.

При нормальній експлуатації виключення небезпечних наслідків забезпечено суворим дотриманням вимог ТРБЕ (технологічний регламент безпечної експлуатації), експлуатаційних інструкцій і програм.

У зв'язку з тим, що дана модифікація не змінює проектну конфігурацію енергоблоку, порядок експлуатації реакторної установки не змінюється.

Реакторна установка ВВЕР-1000 та пов'язані з нею системи енергоблоку АЕС здатні надійно і безпечно виконувати покладені на них функції при підвищенні номінальної потужності до 3030 МВт та дозволеної потужності до 3045 МВт. Нижче приведений аналіз встановлених обмежень для ядерної енергетичної установки на прикладі енергоблоку № 1 Южно-Української АЕС у розрізі на можливість підвищення теплової потужності на 1,5 %.

Реактор. Експлуатація реактора ВВЕР-1000 обмежена наступними основними граничними технологічними параметрами реакторної установки (РУ):

- максимально допустима теплова потужність реактора (з урахуванням точності підтримки системою регулювання) 3091 МВт;
- максимальний допустимий підігрів ТПК

(теплоносій першого контуру) реакторної установки, середній в реакторі: 30,5 °С;

– максимальний допустимий підігрів ТПК в петлі: 30,7 °С;

– температура теплоносія на вході в реактор не більше 289 °С.

В результаті підвищення величини дозволеної потужності до 3045 МВт збільшення середньої температури першого контуру буде становити не більше 0,4 °С, що не призводить до перевищення вищевказаних обмежень. Модифікація не торкається конструкції і матеріалів реактора.

Головний циркуляційний насос. Внаслідок незмінної витрати в петлях перешкод для підвищення дозволеної потужності на $1,5\% \cdot N_{\text{ном}}$ немає. Модифікація не торкається обладнання, конструкції і матеріалів головного циркуляційного насоса.

Парогенератор. Підвищення потужності активної зони на 1,5 % викличе підвищення потужності кожного з парогенераторів також в середньому на 1,5 %, що складе +11,25 МВт.

При забезпеченні високої якості живильної води та водно-хімічного режиму, який дозволить зберегти в цілісності теплообмінні трубки, а значить і високу поверхню теплообміну, парогенератори забезпечують додаткову паропродуктивність без порушень проектних параметрів у разі підвищення потужності РУ на $1,5\% \cdot N_{\text{ном}}$.

Турбіна. Турбіна призначена для роботи з реактором ВВЕР-1000 і тривало може нести як максимальне, так і часткове навантаження.

В даний час, при повністю відкритих регулюючих клапанах, максимально можна підвищити потужність РУ на енергоблоці № 1 до 3070 МВт. З умов роботи системи регулювання турбіни, потужність енергоблоку повинна бути менше максимально можливої, тобто повинен бути запас на регулювання. Модифікація не торкається обладнання, конструкції і матеріалів паротурбінної установки К-1000-60/1500. По турбінній установці немає обмежень щодо підвищення дозволеної потужності на $1,5\% \cdot N_{\text{ном}}$.

Основне електрообладнання. Виходячи з технічних даних основного електрообладнання і багаторічного досвіду експлуатації зрозуміло, що, при підвищенні теплової потужності реакторів на $1,5\% \cdot N_{\text{ном}}$, основні обмеження в обладнанні електричної частини АЕС можуть виникати по параметрах систем охолодження і допустимих температур обмоток статора генератора; по струмах статора генератора, напрузі статора генератора; по параметрах охолодження обмоток блочних трансформаторів; по температурі металу окремих елементів генератора.

Підтвердження резервів по потужності основного електричного обладнання повинно бути показано шляхом проведення теплових випробувань на основних генераторах з одночасним контролем в схемах власних потреб, на генераторних

вимикачах, в обладнанні розподільних пристроїв на потужності $1,5 \% \cdot N_{\text{ном}}$.

В рамках робіт з підвищення теплової потужності реакторів діючих енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000 до 3120 МВт (104 % від номінальної) необхідно виконати розрахункові та інженерно-аналітичні обґрунтування, на підставі результатів яких провести коригування інженерних коефіцієнтів запасу, а також визначити необхідні зміни експлуатаційних меж і комплекс виконуваних заходів.

Реакторна установка ВВЕР-440 та пов'язані з нею системи енергоблоку АЕС здатні надійно і безпечно виконувати покладені на них функції при підвищенні теплової потужності до 1485 МВт. Нижче приведений аналіз необхідних робіт у розрізі можливості підвищення теплової потужності енергоблоків з ВВЕР-440 до 8 %.

Реактор. При експлуатації енергоблоку з потужністю 108 % від номінальної для обладнання і систем реакторної установки необхідно провести додаткові дослідження і виробити рекомендації з впровадження заходів по оптимізації надійної роботи обладнання при збільшенні потужності енергоблоку.

Турбіна. Необхідно розглянути заходи, впровадження яких дозволить збільшити електричну потужність енергоблоку 440 МВт у відповідності із збільшенням теплової потужності реакторної установки, а саме:

- модернізація вихлопних частин ЦВТ (циліндр високого тиску) і ЦНТ (циліндр низького тиску) на енергоблоках;

- реконструкція проточної частини ЦНТ турбін;

- модернізація системи шарикової очистки конденсаторів турбін енергоблоків;

- заміна регуляторів рівня на енергоблоках.

Оцінка залишкового ресурсу роторів парових турбін обов'язково повинна доповнюватися питаннями залучення маловитратних модернізацій пошкоджених роторів, моніторингом стану роторів в процесі експлуатації, в тому числі в режимі *on-line* [5].

Генератор. При підвищенні потужності реакторної установки до 108 % від $N_{\text{ном}}$ для знаття обмежень по системі охолодження генератора слід розробити проект на нову систему для можливості зниження температури «холодного» газу до $+20 \dots +25$ °С.

За результатами виконаних модифікацій необхідно розробити:

- проектну документацію по окремих модифікаціях або в цілому по енергоблоку, пов'язаних зі змінами в конструкціях і системах важливих для безпеки;

- технологічний регламент безпечної експлуатації;

- інструкції по експлуатації, інструкції з ліквідації аварій з урахуванням їх узгодження при

необхідності, з органами Держатомрегулювання.

Висновки

Збільшення теплової потужності реакторів діючих енергоблоків АЕС України проводиться з метою підвищення економічної ефективності роботи АЕС (збільшення вироблення електроенергії) при забезпеченні безпеки реакторної установки не нижче вимог чинних нормативних документів при збереженні основних проектних рішень.

Набутий в даний час значний досвід експлуатації ядерного палива, удосконалення розрахункових методик і кодів, дозволяють уточнити початкові умови, що застосовуються при виконанні аналізу безпеки реакторних установок ВВЕР-440 і ВВЕР-1000 та знизити консерватизм раніше закладених проектних рішень.

Досягнутий рівень техніки дозволяє зменшити похибку вимірювань, знизити нечутливість і підвищити точність регулювання параметрів.

Вищевикладене дозволяє обґрунтувати і провести модифікацію, що дозволяє збільшити рівень теплової потужності без зниження рівня безпеки енергоблоку і конструктивних змін в системах та основного обладнання реакторної установки.

Список літератури

- 1 Хрусталеv, В. А. Повышение мощности энергоблоков АЭС с PWR в США / В. А. Хрусталеv // Атомная техника за рубежом. – 1988. – № 5. – С. 10–14.
- 2 КТР.1.0023.3468. Концептуальное технического решение о повышении тепловой мощности реакторов действующих энергоблоков № 1, 2 ОП ЮУАЭС до 3045 МВт». – Киев, 2015. – № КТР.1.0023.3468. – 7 с.
- 3 НП 306.2.106-2005. Вимоги до проведення модифікації ядерних установок та порядку оцінки їх безпеки. – Київ, 2005.
- 4 Шутиков, А. В. Обоснование способов и эффективности повышения мощности энергоблоков АЭС с ВВЭР выше номинального уровня / А. В. Шутиков, В. А. Хрусталеv // Вестник СГТУ. – 2006. – № 4(20). – С. 32–39.
- 5 Comprehensive Rotor Service Life Study for High & Intermediate Pressure Cylinders of High Power Steam Turbines / V. Peshko, O. Chernousenko, T. Nikulenkova, A. Nikulenkov // Propulsion and Power Research. – London, 2016. – 5(4):302–309 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.jprr.2016.11.008>).

Bibliography (transliterated)

- 1 Khrustalev, V. A. (1988), "Povyshenie moshchnosti energoblokov AES s PWR v SSHA [Power Uprate of NPPs with PWR reactors in the USA]", *Atomnaya tekhnika za rubezhom [Nuclear technology abroad]*, No. 5, pp. 10–14.
- 2 (2015), KTR.1.0023.3468. "Kontseptual'noe tekhnicheskogo reshenie o povyshenii teplovoi moshchnosti reaktorov deistvuyushchikh energoblokov №1, 2 OP YuUAES do 3045 MVt [Conceptual design for

- thermal power uprate of reactors at operating SUNPP units № 1, 2 up to 3045 MW]", No. KTP.1.0023.3468, Kiev, Ukraine.
- 3 (2005), NP 306.2.106-2005. *Vimogi do provedennya modifikatsii yadernikh ustanovok ta poryadku otsinki yikh bezpeki [Requirements to modifications of nuclear facilities and procedure for their safety assessment]*, Kiev, Ukraine.
- 4 **Shutikov, A. V. and Khrustalev, V. A.** (2006), "Obosnovanie sposobov i effektivnosti povysheniya moshchnosti energoblokov AES s VVER vyshe nominal'nogo urovnya [Justification of power uprate approaches above the rated power and their efficiency for NPPs with VVER reactors]", *Vestnik SGTU [Bulletin of the CSTU]*, No. 4(20), pp. 32–39.
- 5 **Peshko, V., Chernousenko, O., Nikulenkova, T. and Nikulenkov, A.** (2016), "Comprehensive Rotor Service Life Study for High & Intermediate Pressure Cylinders of High Power Steam Turbines", *Propulsion and Power Research*, London, 2016, No. 5(4), pp. 302–309.

Відомості про авторів (About authors)

Черноусенко Ольга Юріївна – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Теплоенергетичних установок теплових і атомних електростанцій, Національний Технічний Університет України «Київський Політехнічний Інститут ім. Ігоря Сікорського»; м. Київ; тел.: (067) 504-82-92; e-mail: chernousenko20a@gmail.com. ORCID 0000-0002-1427-8068.

Chernousenko Olga Yuriivna – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Cogeneration Installations of Thermal and Nuclear Power Plants, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"; Kyiv.

Нікуленкова Тетяна Володимирівна – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри Теплоенергетичних установок теплових і атомних електростанцій, Національний Технічний Університет України «Київський Політехнічний Інститут ім. Ігоря Сікорського»; м. Київ; тел.: (067) 375-54-44; e-mail: tvnikulenkova@yandex.ua; ORCID 0000-0003-1880-1124.

Nikulenkova Tetiana Volodymyrivna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Lecturer at the Department of Cogeneration Installations of Thermal and Nuclear Power Plants, National Technical University of Ukraine National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"; Kyiv.

Нікуленков Анатолій Геннадійович – аспірант кафедри Теплоенергетичних установок теплових і атомних електростанцій, Національний Технічний Університет України «Київський Політехнічний Інститут ім. Ігоря Сікорського»; м. Київ; тел.: (063) 82–94–86; e-mail: a-Nikulenkov@yandex.ua; ORCID 0000-0003-4345-8575.

Nikulenkov Anatolii Hennadiiovych – Postgraduate Student at the Department of Cogeneration Installations of Thermal and Nuclear Power Plants, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"; Kyiv.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Черноусенко, О. Ю. Аналіз можливості підвищення теплової потужності енергоблоків атомних електростанцій (Частина 1) / **О. Ю. Черноусенко, Т. В. Нікуленкова, А. Г. Нікуленков** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 10(1232). – С. 6–12. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.01.

Please cite this article as:

Chernousenko, O. Yu., Nikulenkova, T. V. and Nikulenkov, A. H. (2017), "Analysis of the Opportunity for an Increase in the Thermal Power of Power Generating Units of Nuclear Power Plants (Part 1)", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 10(1232), pp. 6–12, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.01.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Черноусенко, О. Ю. Анализ возможности повышения тепловой мощности энергоблоков атомных электростанций (Часть 1) / **О. Ю. Черноусенко, Т. В. Никуленкова, А. Г. Никуленков** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 10(1232). – С. 6–12. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.01.

АННОТАЦИЯ Для Украины реализация резервов увеличения мощности действующих энергоблоков атомных электростанций является актуальной задачей, решение которой позволит повысить объемы генерации электроэнергии. При этом, особую роль играет и экономическая выгода – повышение мощности на 1 кВт обходится примерно в 10 раз дешевле, чем стоимость строительства 1 кВт новой мощности. Еще один фактор – это мировой опыт в области повышения тепловой мощности действующих энергоблоков атомных электрических станций. Опираясь на указанную актуальность, в работе проанализирован международный опыт по повышению тепловой мощности энергоблоков АЭС, а также приведены основные механизмы и инструментари по реализации данной модификации на атомных энергоблоках Украины. Графически представлены заложенные в проект резервы, позволяющие повысить тепловую мощность энергоблока. Установлены рекомендации по объему необходимых мероприятий и обоснований, необходимых для внедрения соответствующего уровня повышения тепловой мощности для украинских энергоблоков с ВВЭР-1000 и ВВЭР-440.

Ключевые слова: водо-водяной энергетический реактор, безопасная эксплуатация, повышение тепловой мощности, энергоблок, цилиндр высокого давления, электроэнергия.

Поступила (received) 15.02.2017