

О. В. ЄФІМОВ, Л. І. ТЮТЮНИК, Т. А. ГАРКУША, І. Д. СИДОРКІН, Д. Г. ВАСЮНІН

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ СТАНУ ОБЛАДНАННЯ ТЕС І АЕС

У матеріалах статті аналізується нинішній стан енергетики в Україні та країнах світу та аналізуються шляхи підвищення ефективності ТЕС та АЕС. На елементи енергоблоку можуть впливати процеси старіння, що виникають з часом або в результаті тривалого використання. Негативний вплив старіння може привести до деградації елемента, а саме до погіршення його надійності і, як наслідок, безпеки енергоблоку в цілому. Розробка і впровадження заходів щодо уповільнення процесів старіння і щодо забезпечення надійної експлуатації елементів в період перепризначеного ресурсу є обов'язковим видом діяльності з управління старінням тепломеханічного обладнання і трубопроводів. Моніторинг технічного стану елементів виконується шляхом контролю встановлених параметрів і характеристик, що визначають технічний стан елементів, в період їх роботи, при проведенні випробувань, вимірювань, експлуатаційного контролю металу, ремонтів і техобслуговування елементів. Моніторинг повинен здійснюватися систематично впродовж усього терміну експлуатації енергоблоку. В свою чергу, технічна діагностика контролює поточний стан всіх елементів, виявляє аномальні стани, визначає причини їх появи, що дозволяє оцінити ситуацію і прийняти заходи по їх усуненню. Мета статті полягає в аналізі основних підходів до оцінки стану енергетичного обладнання теплових та атомних електричних станцій.

Ключові слова: старіння теплоенергетичного обладнання

O.V. YEFIMOV, L.I. TIUTIUNYK, T. A. HARKUSHA, I.D. SYDORKIN, D. G. VASYUNIN

ANALYSIS OF THE MAIN APPROACHES TO THE ASSESSMENT OF THE CONDITION OF TPP AND NPP EQUIPMENT

The materials of the article analyze the current state of the energy industry in Ukraine and the countries of the world and analyze the ways to increase the efficiency of thermal power plants and nuclear power plants. The elements of the power unit can be affected by aging processes that occur over time or as a result of long-term use. The negative impact of aging can lead to the degradation of the element, namely to the deterioration of its reliability and, as a result, the safety of the power unit as a whole. The development and implementation of measures to mitigate aging processes and to ensure reliable operation of elements during the reassigned resource period is a mandatory type of activity for managing the aging of thermomechanical equipment and pipelines. Monitoring of the technical condition of the elements is performed by monitoring the established parameters and characteristics that determine the technical condition of the elements, during their operation, during tests, measurements, operational control of metal, repairs and maintenance of the elements. Monitoring should be carried out systematically throughout the entire life of the power unit. In turn, technical diagnostics monitors the current state of all elements, detects abnormal conditions, determines the causes of their appearance, which allows you to assess the situation and take measures to eliminate them. The purpose of the article is to analyze the main approaches to assessing the state of energy equipment of thermal and nuclear power plants.

Keywords: aging of thermal power equipment..

І. Вступ.

Сучасна енергетика, як і інші галузі науки і виробництва, перебуває під безпосереднім впливом науково-технічної революції. Розвиток енергетики характеризується не тільки бурхливо зростаючим споживанням енергії всіх видів, але і вельми істотними структурними змінами у виробництві, транспортуванні та розподілі електроенергії.

Передбачуване зростання електроенергетики на початку цього століття, викликано бурхливим розвитком усіх галузей промисловості, сільського господарства, збільшенням народонаселення, яке вражає своїми масштабами. Споживання органічних видів палива за останні десятиліття зросло в кілька разів, і потреба в паливі має різко виражену тенденцію зростання [1].

Сукупність установок, які перетворюють хімічну енергію органічного палива на теплову та електричну, працює у складі електричних станцій (теплових або атомних). Основне призначення електричних станцій – забезпечення електричною енергією підприємств промислового і сільськогосподарського виробництва, комунального господарства і транспорту. Електростанції можуть також забезпечувати підприємства і житлові будинки водяною парою і гарячою водою.

В енергетичному балансі України, теплові електричні станції (ТЕС) є основним джерелом електричної та теплової енергії. На електростанціях, які призначені для комбінованого виробництва електричної і теплової енергії (ТЕЦ), установлюють парові турбіни з проміжними відборами пари для теплофікації. На таких установках теплоту відпрацьованої пари частково або навіть повністю використовують для теплопостачання, унаслідок чого втрати теплоти з охолоджувальною водою в конденсаторі скорочуються або їх взагалі немає. Однак частка енергії, перетвореної з хімічної на електричну, при тих самих початкових параметрах пари на установках з теплофікаційними турбінами нижча, ніж на установках з конденсаційними турбінами. Зазвичай ТЕЦ будують поблизу споживачів теплової енергії – біля промислових підприємств або житлових масивів [2].

Якщо для виробництва електроенергії використовують конденсаційні установки, а теплову енергію для теплопостачання виробляють в окремій котельній установці, то таке виробництво електричної і теплової енергії називають роздільне.

© Єфімов О.В., Тютюник Л.І., Гаркуша Т.А., Сидоркін І.Д., Васюнін Л.Г., 2023

Сучасна ТЕС – це складне підприємство, яке включає в себе велику кількість різного устаткування (теплових, електричного, електронного тощо) і будівельних конструкцій. Основним устаткуванням ТЕС є котельня і теплова установка. За типом теплової установки (теплого двигуна) теплові електричні станції бувають: паротурбінні (основний вид електростанцій), газотурбінні і парогазові ТЕС, а також електростанції з двигунами внутрішнього згорання (ДВЗ) [3].

Централізоване теплопостачання споживачів, здійснюване з використанням тепла пари, частково спрацьованої у проточній частині турбіни, забезпечує значну економію палива, поліпшує якість теплопостачання, зменшує забрудненість навколишнього середовища. Встановлена потужність теплофікаційних турбін становить 39% сумарної потужності теплових електростанцій.

Теплові електростанції та їх обладнання невпинно розвиваються, стають все більш потужними і складними. Зростання потужності ТЕС здійснюється на базі нових науково-технічних рішень із застосуванням сучасних систем автоматизованого управління виробничими процесами.

Підвищення енергетичного потенціалу робочого тіла (пари) за рахунок збільшення початкових параметрів пари перед турбіною до значень 12,75 МПа (130 ата) і 23 МПа (240 ата), а також введення проміжного перегріву пари підняли економічність агрегатів на 10-15%. При блочному виконанні (котел – турбіна – генератор) – вартість ТЕЦ знижується на 15-20% порівняно з іншими компоновками. Всі великі ТЕС мають блочне виконання.

За призначенням ТЕС бувають районні (загального користування), які забезпечують усіх споживачів тепловою та електричною енергією в цьому районі місцевості і є самостійними виробничими підприємствами, і промислові електростанції, які входять до складу виробничих об'єктів і призначені переважно для їх енергопостачання, а також міських і сільських районів, що прилягають до них.

Найпоширеніші в енергетиці паротурбінні електростанції поділяють за рівнем теплової потужності агрегатів: малої потужності (з агрегатами до 25 МВт), середньої потужності (з агрегатами до 50...100 МВт), великої потужності (з агрегатами більше 100 МВт); а також за початковими параметрами водяної пари: низького (до 3 МПа), середнього (3...5 МПа), високого (9...17 МПа) і понадкритичного тиску (більше 24 МПа). Класифікація ТЕС за рівнем потужності і тиску умовна, тому що ці показники мають тенденцію до зростання.[4]

II. Основна мета роботи.

Сьогодні у світі електроенергія виробляється в основному (50 – 70%) на теплових електростанціях (ТЕС) з використанням органічних палив: природного газу і вугілля. Їх обладнання розраховано на тривалу роботу.

Технічний рівень цього обладнання з теплової економічності, автоматизації та чисельності персоналу, шкідливих викидів у навколишнє середовище не завжди відповідає сучасним вимогам. Переважна частина обладнання світової електро- та теплоенергетичного комплексу фізично зношена майже на 50-70%. Для підвищення ефективності ТЕС важливе значення має будівництво нових високоефективних електростанцій, виведення з експлуатації старого низько економічного обладнання та заміна його перспективним, що забезпечує радикальне зниження питомих витрат палива на виробництво електроенергії і тепла, підвищення коефіцієнту використання встановленої потужності та коефіцієнту корисної дії, зниження штатного коефіцієнта, зниження екологічно шкідливих викидів у навколишнє середовище, а також зменшення ремонтних витрат. У світі сьогодні в теплової енергетиці будуються і надійно працюють вугільні енергоблоки з коефіцієнтом корисної дії (ККД) 45 – 46% і парогазові установки (ПГУ) з ККД 55 – 58%.

Мета роботи полягає в аналізі основних підходів до оцінки стану обладнання ТЕС і АЕС.

Цим проблемам присвячена велика кількість статей, публікацій, журналів. На їх основі і розглянуто питання пошуку оптимальних рішень в ТЕС та АЕС для підвищення економічності та підвищення корисних експлуатаційних властивостей енергетичних станцій.

III. Основна частина.

Аналіз методів і підходів до оцінки старіння теплоенергетичного устаткування

На елементи енергоблоку можуть впливати процеси старіння, що виникають з часом або в результаті тривалого використання. Негативний вплив старіння може привести до деградації елемента, а саме до погіршення його надійності і, як наслідок, безпеки енергоблоку в цілому.

Для управління старінням елемента встановлюються визначальні параметри стану елементів і їх граничнодопустимі значення, а також обрані методи і засоби контролю цих параметрів. При цьому перевага віддається неруйнівним методам контролю, а також методам, які можуть бути застосовані для елементів, що знаходяться в роботі [5].

При здійсненні діяльності з управління старінням тепломеханічного обладнання і трубопроводів енергоблоку особливу увагу приділяють:

- обстеженню елементів з подальшим виявленням і вивченням процесів старіння;
- оцінці технічного стану з подальшим перепризначенням ресурсу;
- розробці і впровадженню моніторингу домінуючих процесів старіння;
- розробці і впровадженню заходів щодо пом'якшення процесів старіння;

– постійному контролю параметрів технічного стану, спрямованому на підтвердження того, що експлуатаційна надійність критичних елементів підтримується відповідно до вимог технічної документації.

Результати оцінки технічного стану тепломеханічного обладнання та трубопроводів представляються у вигляді звітів, які містять:

- визначення проектних ресурсних характеристик елементів;
- механізми старіння і їх вплив на зазначені експлуатаційні параметри і характеристики;
- оцінку існуючих засобів і методів контролю, діагностики елементів, в тому числі перевірок і випробувань, аналіз отриманої інформації;
- оцінку реалізованих і запланованих заходів по зниженню впливу старіння, як в режимах нормальної експлуатації, так і в аварійних режимах;
- формування прогнозу зміни ресурсу аналізованих елементів впродовж подовженого терміну експлуатації і можливості виконання ними функцій безпеки [6].

Розробка і впровадження заходів щодо уповільнення процесів старіння і щодо забезпечення надійної експлуатації елементів в період перепризначеного ресурсу є обов'язковим видом діяльності з управління старінням тепломеханічного обладнання і трубопроводів. Як показує практика, довговічність елементів енергоблоків АЕС визначається, в основному, активністю ерозійно-корозійних та інших зношуючих процесів. При цьому інші критерії надійності, в першу чергу – по малоциклової втомі, відповідають нормативним вимогам [7].

Разом з тим в процесі тривалої експлуатації діє механізм накопичення пошкоджень в результаті вичерпання тривалої пластичності і, як наслідок, охрупчення шарів металу, що піддаються впливу найбільших напружень. При глибокому вичерпанні ресурсу в матеріалі з'являються тріщини, які при подальшому розвитку призводять до серйозного пошкодження деталі.

Призначений проектом термін експлуатації енергоблоків АЕС з високою імовірністю дає впевненість, що критичні елементи, як і блок АЕС в цілому, за умови відповідного технічного обслуговування, ремонтів та експлуатаційного контролю, впродовж цього терміну будуть відповідати критеріям безпеки [8].

Проведення обстеження технічного стану з метою подовження терміну експлуатації обладнання включає наступні етапи виконання робіт: аналіз технічної документації; аналіз досвіду експлуатації; оцінку технічного стану по визначальних параметрах; оцінку технічного стану по міцних параметрах; оцінку залишкового ресурсу за результатами вимірювання параметрів граничного стану; прийняття рішення про можливість подовження терміну експлуатації обладнання і оформлення висновку [9].

Технічна документація електростанції включає аналіз по режимах експлуатації, пошкодженнях, змінах геометрії у період відновлювальних ремонтів основних елементів енергоблоку, результатах контролю металу впродовж усього терміну їх експлуатації. З метою оцінки стану металу високотемпературних елементів проводять вивчення та систематизацію експлуатаційної і ремонтної документації по результатах контролю металу за весь період експлуатації енергоблоку. Після цього фіксують різні види пошкоджень (тріщини, розтріскування, промивання) і відтворюють у геометричній моделі елемента. Такий підхід дозволяє наблизити розрахункову модель до реального стану елемента енергоблоку після тривалої експлуатації.

За результатами оцінки технічного стану елементів енергоблоків, управління старінням передбачає розробку відповідних заходів щодо пом'якшення і призупиненню процесів старіння, які реалізуються в рамках:

- технічного обслуговування і ремонту;
- реконструкції (модернізації);
- заміни елементів або комплектуючих;
- зміни умов і режимів експлуатації.

Рішення про доцільність здійснення заходів щодо подовження експлуатації енергоблоку АЕС приймає експлуатуюча організація, виходячи з можливості забезпечення безпеки на рівні, встановленому в діючих нормах і правилах з ядерної та радіаційної безпеки, шляхом проведення аналізу економічних факторів та технічного стану критичних елементів блоку АЕС [4].

Управління старінням теплоенергетичного обладнання

Моніторинг процесів старіння виконується з метою отримання своєчасної та достовірної інформації про стан процесів старіння елемента.

Для моніторингу процесу старіння конкретного елемента енергоблоку із загальної кількості механізмів старіння даного елемента вибираються домінуючі механізми старіння, які носять основний вклад в процес старіння. Методика вибору домінуючих механізмів старіння визначається типовими програмами оцінки технічного стану для відповідних елементів енергоблоків.

Моніторинг технічного стану елементів виконується шляхом контролю встановлених параметрів і характеристик, що визначають технічний стан елементів, в період їх роботи, при проведенні випробувань, вимірювань, експлуатаційного контролю металу, ремонтів і техобслуговування елементів. Моніторинг повинен здійснюватися систематично впродовж усього терміну експлуатації енергоблоку. В свою чергу технічна діагностика контролює поточний стан всіх елементів, виявляє аномальні стани, визначає причини їх появи, що дозволяє оцінити ситуацію і прийняти заходи по їх усуненню.

При оснащенні енергоблоків АЕС системою технічної діагностики застосовують наступний

системний підхід: результати вимірювання параметрів енергоблоку штатної автоматичної системи управління технологічними процесами дають достатню інформацію про режими роботи і стан обладнання, а для вирішення задач діагностування необхідно правильно організувати збір даних і їх обробку [10].

Прогнозування залишкового ресурсу обладнання можливе тоді, коли критерії граничного стану обладнання визначені в чисельних значеннях, а під час експлуатації обладнання здійснюються вимірювання і реєстрація параметрів.

Автоматична система технічної діагностики (АСТД) повинна вирішувати основні задачі діагностики, а саме:

- визначення поточного стану діагностуючого обладнання;
- прогнозування змін цього стану;
- визначення стану цього обладнання в минулому, бо без цього неможливо буде оцінити теперішній і майбутній стан, в тому числі аварійний;

– супроводження аварії або після аварійний стан.

Виконання умов технічного обслуговування обладнання дозволить чітко виявити технічний стан обладнання енергоблоків, запобігти аваріям, повноцінно використовувати ресурси і обладнання, скоротити експлуатаційні витрати [11].

Все це виражається в коригуванні графіка ремонтів в сторону скорочення термінів (міжремонтного циклу), скороченні чисельності ремонтного персоналу, чіткому плануванні робіт. Відбувається перехід до нової прогресивної форми технічного обслуговування обладнання по реальному технічному стану, в основі якого лежить пропозиція про можливість оцінки і прогнозування залишкового ресурсу, відновлення ресурсу шляхом проведення ремонтно-відновлювальних робіт, спланованих по результатах аналізу експлуатації з врахуванням реального стану обладнання АЕС, отриманого при проведенні діагностичного обслуговування і досліджень (табл. 1).

Таблиця 1 – Керування старінням елементів енергоблоку

Елемент програми управління старіння АЕС	Елемент / область	Механізм деградації / наслідки старіння	Заходи із зменшення впливу ефектів старіння
Реактор - корпус	Кільцеві зварні шви. Оболонки активної зони корпусу реактора.	Радіаційне охрупнення і зміцнення	Використання в реакторі паливних завантажень зі зниженням виходу нейтронів
	Весь корпус реактора	Термічне охрупнення і зміцнення	Не потрібні
	Внутрішня поверхня корпусу (наплавка КР (корпусу реактора))	Корозія, корозійне розтріскування під напругою	Моніторинг та контроль параметрів водно-хімічного режиму першого контуру відповідних до чинних (нормативних документів)
Захисні труби	Блок захисних труб	Втома	Дотримання технологічного регламенту щодо кількості циклів навантаження реакторної установки
		Корозійне розтріскування під напругою	Моніторинг та контроль параметрів водно-хімічного режиму першого контуру відповідних до чинних (нормативних документів)
	Упорне кільце	Малоциклова втома	Дотримання технологічного регламенту щодо кількості циклів навантаження реакторної установки
		Багатоциклова втома	Виконати заміну тороїдальних прижимних труб
Всі елементи	Корозія	Не потрібні	
Парогенератор	Корпус, перший колектор	Малоциклова втома	Не потрібні
	Теплообмінні труби, фланцеві роз'єми колекторів першого контуру, вузол приєднання колекторів до патрубків	Корозійне розтріскування під напругою, корозійна втома, міжкристалічне розтріскування	Не потрібні
Парова турбіна		Ерозійно-корозійне зношення; загальна і локальна корозія	Знизити тривалість роботи турбіни в номінальному діапазоні міцності
Турбогенератор		Вібраційні навантаження, старіння ізоляції обмоток ротора	Не потрібні

На підставі моніторингу процесів старіння і технічного стану елементів енергоблоку встановлюються вимоги до виконання додаткових робіт (вимірів, контролю металу, випробувань та ін.) для основних об'єктів робіт в періоди капітальних ремонтів для обґрунтування можливості подовження ресурсу/терміну служби елементів, перепризначення ресурсу яких проводиться в рамках капітального ремонту.

Головною перешкодою на шляху впровадження діагностичних систем є додаткові капітальні витрати, що становлять до 20 % вартості обладнання. Однак, як показує досвід, ці витрати швидко окупаються (впродовж одного-двох років), а потім дають відчутний прибуток. Підвищення безпеки експлуатації енергоблоків електричних станцій досягається за рахунок розширення обсягу інформації про стан об'єктів діагностування, прогнозування розвитку подій і рекомендацій технічному персоналу про подальші дії. Впровадження АСТД дозволяє також замість планово-попереджувального ремонту перейти на організацію ремонтного обслуговування обладнання за його фактичним станом, що дає суттєвий економічний ефект за рахунок додаткового вироблення електроенергії та зменшення ремонтних витрат [12–14].

Метою технічного діагностування обладнання є висновок про справність і дієздатність конкретного типу обладнання, а засоби технічної діагностики повинні забезпечити виявлення дефектів, які впливають на дієздатність діагностованого обладнання і забезпечити прогнозування його залишкового ресурсу (табл. 1).

Висновки.

Проведено аналіз основних методів і підходів до оцінки функціонального стану теплоенергетичного устаткування ТЕС і АЕС.

Розглянуті основні етапи моніторингу і керування процесом старіння устаткування.

Список літератури

1. Широков С.В. Ядерні енергетичні реактори / С.В. Широков. / Київ : –ННТУ «КПІ»–1997. – 279 с.
2. Elements of nuclear reactor design. Second edition/ Robert E. Krieger Pub. Co. /Melbourne, Florida (USA): –1983. – 275 p.
3. Єфімов О.В. Конструкції, матеріали, процеси і розрахунки реакторів і парогенераторів АЕС: навч. посібник / О.В. Єфімов, М.М. Пилипенко. – Харків: Видавництво «Підручник НТУ «ХПІ», 2010. – 268 с.
4. Реактори і парогенератори енергоблоків АЕС: схеми, процеси, матеріали, конструкції, моделі / О.В. Єфімов, М.М. Пилипенко, Т.В. Потаніна та ін.: за ред. О.В. Єфімова. – Харків: ТОВ «В справі», 2017. – 420 с.
5. Steam Generators for Nuclear Power Plants (Woodhead Publishing Series in Energy) 1st Edition, Kindle Edition/Jovica Riznich (Editor). /Sawston: – Cambridge –2017. – 275 p.
6. Оптимізація режимів роботи енергоблоків атомних електростанцій / О. В. Єфімов, В. Л. Каверцев, Л. І.

Тютюнник, Т. А. Гаркуша, А. В. Мотовільник, І. Д. Сидоркін / Вісник Національного Технічного Університету «ХПІ». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів, 2023, № 1 (1365), стр. 44-48

7. Єфімов О. В. та ін. Автоматизована система підтримки прийняття рішень експлуатаційним персоналом енергоблоків АЕС по критерію техніко-економічної ефективності з урахуванням показників надійності. Ядерна та радіаційна безпека. 2018. № 2(78). С. 11–19. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202040387>.

8. Yefimov O. V., Potanina T. V., Yesypenko T. O., Kavertsev V. L., Harkusha T. A., Tiutiunyk L. I. Systems supporting decisions at the stage of operation and equipment diagnostics nuclear power units with pressurised water reactors. Scientific research of the XXI century. Volume 1 : collective monograph. Compiled by V. Shpak ; Chairman of the Editorial Board S. Tabachnikov. Sherman Oaks, Los Angeles : GS publishing service, 2021. 430 p.

9. Схеми, процеси, матеріали, конструкції і моделі реакторних і парогенераторних установок енергоблоків АЕС і газо-паротурбінних установок ТЕС. / О.В. Єфімов, М.М. Пилипенко, Т.В. Потаніна та ін.: за ред. О.В. Єфімова. – Харків: ТОВ «В справі», 2023. – 556 с.

10. Єфімов О. В. та ін. Використання методів інтервального аналізу для оцінки безпеки та надійності енергоблоків АЕС. Ядерна та радіаційна безпека. 2018. № 3(79). С. 15–21. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=72020403>.

11. Basic bases of calculations and optimization of npp power unit equipment parameters methods of mathematical modelling / A. Yefimov, B. Ilchenko, L. Tiutiunyk, T. Harkusha, T. Yesipenko, A. Motovilnik / Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування, № 1(5) 2021, стр. 29-32

12. Mathematical relations of models of single-phase flows in the channels of reactors and steam generators of NPPs for calculation of heat transfer processes and hydrodynamic characteristics / A.Yefimov, M.Pylypenko, V.Kavertsev, T.Harkusha, L.Tiutiunyk, A.Motovilnik / Problems of Atomic science and technology. Kharkiv. – 2022. – № 1(137). – P.179-185. <http://vant.kipt.kharkov.ua>

13. Steam Generators for Nuclear Power Plants (Woodhead Publishing Series in Energy) 1st Edition, Kindle Edition/Jovica Riznich (Editor). /Sawston: – Cambridge –2017. – 275 p.

14. Топольницький М.В. Атомні електричні станції/М.В.Топольницький. /– Львів : – Бескид Біт– 2005. – 523 с

References (transliterated)

1. S.V. Shirokov Nuclear power reactors / S.V. Shirokov./ Kyiv: –NNTU "KPI" –1997. - 279 p.
2. Elements of nuclear reactor design. Second edition/ Robert E. Krieger Pub. Co. /Melbourne, Florida (USA): –1983. – 275 p.
3. Yefimov O.V. Constructions, materials, processes and calculations of reactors and steam generators of NPPs: textbook. manual / O.V. Yefimov, M.M. Pilipenko. – Kharkiv: Publishing House "Textbook of NTU" KhPI ", 2010. 268 p.
4. Reactors and steam generators of NPP power units: schemes, processes, materials, structures, models / O.B. Yefimov, M.M. Pilipenko, T.V. Potanina et al ..: ed .. O.V. Yefimova. - Kharkiv: LLC "In the case", 2017. - 420 p

5. Steam Generators for Nuclear Power Plants (Woodhead Publishing Series in Energy) 1st Edition, Kindle Edition/Jovica Riznich (Editor). / [Sawston](#): – [Cambridge](#) –2017. – 275 p.

6. Optimization of operating modes of power units of nuclear power plants / O. V. Yefimov, V. L. Kavertsev, L. I. Tiutiunyk, T. A. Harkusha, A. V. Motovilnik, I. D. Sydorkin / Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Innovative research in students' scientific works, 2023, No. 1 (1365), p.44-48

7. Yefimov O. V. et al. (2018), "Автоматизована система підтримки прийняття рішень експлуатаційним персоналом енергоблоків AES по критерію техніко-економічної ефективності з урахуванням показників надійності [Automated decision support system by operational personnel of NPP power units according to the criterion of technical and economic efficiency taking into account reliability indicators]", *Jaderna ta radiacijna bezpeka* [Nuclear and radiation safety], no. 2(78), pp. 11–19. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202040387>.

8. Yefimov O. V., Potanina T. V., Yesipenko T. O., Kavertsev V. L., Harkusha T. A., Tiutiunyk L. I. Systems supporting decisions at the stage of operation and equipment diagnostics nuclear power units with pressurised water reactors. Scientific research of the XXI century. Volume 1 : collective monograph. Compiled by V. Shpak ; Chairman of the Editorial Board S. Tabachnikov. Sherman Oaks, Los Angeles : GS publishing service, 2021. 430 p.

9. Schemes, processes, materials, designs and models of reactor and steam generator units of NPP power units and gas-steam turbine units of TPPs. / O.V. Yefimov, M.M. Pylypenko, T.V. Potanina et al.: edited by O.V. Yefimova - Kharkiv: LLC "In Case", 2023. - 556 p.

10. Yefimov O. V. et al. (2018), "Vykorystannja metodiv interval'nogo analiza dlja ocinky bezpeky ta nadijnosti energobloktiv AES [Use of interval analysis methods to assess the safety and reliability of NPP power units]", *Jaderna ta radiacijna bezpeka* [Nuclear and radiation safety], no. 3(79), pp. 15–21. <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=72020403>.

11. Basic bases of calculations and optimization of npp power unit equipment parameters methods of mathematical modelling / A. Yefimov, B. Ilchenko, L. Tiutiunyk, T. Harkusha, T. Yesipenko, A. Motovilnik / Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy Bulletin of the KhPI National Technical University. Series: Energy and heat engineering processes and equipment, No. 1(5)2021, pp. 29-32

12. Mathematical relations of models of single-phase flows in the channels of reactors and steam generators of NPPs for calculation of heat transfer processes and hydrodynamic characteristics / A. Yefimov, M. Pylypenko, V. Kavertsev, T. Harkusha, L. Tiutiunyk, A. Motovilnik / *Problems of Atomic science and technology*. Kharkiv. 2022. № 1(137), pp.179–185.

<http://vant.kipt.kharkov.ua>

13. Steam Generators for Nuclear Power Plants (Woodhead Publishing Series in Energy) 1st Edition, Kindle Edition/Jovica Riznich (Editor). / [Sawston](#): – [Cambridge](#) 2017. – 275 p.

14. M.V. Topolnytskyi Atomic electric stations/M.V. Topolnytskyi. / Lviv: – Beskyd Bit– 2005. – 523 p.

Надійшла (received) 19.09.2023

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Єфімов Олександр Вячеславович (Efimov Aleksandr Vyacheslavovich, Efimov Olexander Vyacheslavovich) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3300-7447>;

e-mail: AVEfimov22@gmail.com

Тютюник Лариса Іванівна (Tyutyunik Larisa Ivanovna, Tiutiunyk Larysa Ivanivna) – кандидат технічних наук, доцент кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3128-497X>;

e-mail: lara.tyutyunik@gmail.com

Гаркуша Тетяна Анатоліївна (Harkusha Tetyana Anatoliivna) – науковий співробітник кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

e-mail: Tetiana.Harkusha@khpi.edu.ua

Сидоркін Ігор Дмитрович (Sydorkin Igor Dmytrovych) – аспірант, кафедра парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

e-mail: Ihor.Sydorkin@ieec.khpi.edu.ua

Васюнін Дмитро Геннадійович (Vasyunin Dmytro Gennadiyovych) – аспірант, кафедра парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;

e-mail: Dmytro.Vasiunin@ieec.khpi.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8546-0660> e-mail: ageicheva@ukr.net