

Міністерство енергетики та вугільної промисловості України

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «НАЦІОНАЛЬНА АТОМНА
ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧА КОМПАНІЯ «ЕНЕРГОАТОМ»

РОЗРОБКА І ВПРОВАДЖЕННЯ КОНДЕНСАТОРІВ ПАРОВИХ ТУРБІН
АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАЦІЙ

ШАВЛАКОВ Олександр Володимирович – перший віце-президент – технічний директор Державного підприємства «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом».

ФЕОФЕНТОВ Микола Олексійович – головний інженер Відокремленого підрозділу «Южно -Українська АЕС».

ПАНЧЕНКО Олександр Вікторович – заступник головного фахівця турбоустановок Відокремленого підрозділу «Запорізька АЕС».

КАСАТКІН Олег Георгійович – доктор технічних наук, провідний науковий співробітник Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України.

УСС Олександр Миколайович – заступник головного конструктора – начальник конструкторського відділу теплообмінних апаратів Публічного акціонерного товариства «Турбоатом».

ПАЦЮК Сергій Трохимович – заступник генерального директора Публічного акціонерного товариства «Турбоатом».

ВАВІЛОВ Олександр Васильович – головний зварник Публічного акціонерного товариства «Турбоатом».

ХАРЛАМПІДІ Дионіс Харлампійович – доктор технічних наук, провідний науковий співробітник Інституту проблем машинобудування Національної академії наук України.

РЕФЕРАТ

Київ - 2018

Актуальність роботи.

Стратегія розвитку атомної енергетики України, яка забезпечує стійкість систем енергопостачання на тривалу перспективу і гнучкість реакції на безперервні зміни технологічної та економічної обстановки, є найважливішим фактором науково-технічного прогресу, стану і розвитку енергетики, що лежить в основі будь-якого виробничого процесу. Все це сприяє підвищенню ролі атомної енергетики в енергозабезпеченні економіки країни.

За виробництвом електроенергії на АЕС Україна входить в десятку, а за вкладом отриманої електроенергії в загальному обсязі електроенергії – в п'ятірку країн світу.

Згідно з Енергетичною стратегією України на період до 2035 р. споживання електроенергії в Україні у 2035 р. має зрости з 163,7 (2015 р.) до 195 млрд. КВт·год. при її виробленні на АЕС в обсязі 94 млрд. КВт·год., що складе близько 50 % від всього передбачуваного вироблення електроенергії.

На Україні діють 4-ри атомні електростанції з 15-ю енергоблоками:

– Запорізька АЕС з 6-ма енергоблоками типу ВВЕР-1000 загальною встановленою електричною потужністю 6000 МВт, яка є найбільшою в Європі;

– Южно-Українська АЕС з 3-ма енергоблоками типу ВВЕР-1000 загальною встановленою електричною потужністю 3000 МВт;

– Рівненська АЕС з 2-ма енергоблоками типу ВВЕР-1000 і з 2-ма енергоблоками типу ВВЕР-440 загальною встановленою електричною потужністю 2880 МВт;

– Хмельницька АЕС з 2-ма енергоблоками типу ВВЕР-1000 загальною встановленою електричною потужністю 2000 МВт і з 2-ма знаходяться на консервації енергоблоків типу ВВЕР-1000.

У 2018 року 10 енергоблоків матимуть термін експлуатації більше 30 років, а ще для 2-х енергоблоків цей термін закінчиться в 2019 році.

Для виконання вимог щодо забезпечення економіки України електроенергією до 2035 р. необхідно не тільки провести реновацію діючих АЕС з модернізацією обладнання, а й доцільно добудувати «заморожені» енергоблоки № 3 і № 4 Хмельницької АЕС, що дозволить підвищити вироблення електроенергії в країні.

Будівництво нових енергоблоків АЕС є досить витратним і тривалим проектом. У той же час модернізація наявних потужностей, будучи менш масштабним проектом, може проходити поступово, вимагає менших коштів, дозволяє скористатися наявною інфраструктурою і не викликає додаткових питань про доцільність експлуатації АЕС з боку громадськості.

Значний приріст електричної потужності на АЕС може бути досягнуто модернізацією допоміжного теплообмінного обладнання турбоустановок – конденсаторів парових турбін. В Україні таке обладнання виробляє підприємство – ПАТ «Турбоатом», що дозволяє зменшити імпорتنу залежність необхідних проектів з модернізації.

Конденсаційні пристрої паротурбінних установок значною мірою визначають надійну і економічну роботу енергоблоків АЕС. У деяких випадках порушення в їх роботі призводять до вимушеного зниження електричної потужності енергоблоку і погіршення надійності, а також до істотного недовиробітку електроенергії.

Основною причиною, що визначає необхідність модернізації конденсаторів, є пошкодження металу ділянок охолоджуючих труб, яке викликано ерозією-корозією під впливом турбулентного потоку охолоджуючої води, що насичена киснем, а також з вмістом твердих частинок та інших домішок, що призводить до порушення водяної щільності трубних систем, виносу міді в цикл турбоустановки і, в кінцевому підсумку, до втрати електричної потужності турбоустановки, скорочення ресурсу і погіршення експлуатаційної надійності допоміжного обладнання і парогенераторів, що, в кінцевому рахунку, різко погіршує показники роботи АЕС. На рис. 1. показано дефекти трубних систем в період експлуатації на конденсаторах АЕС.

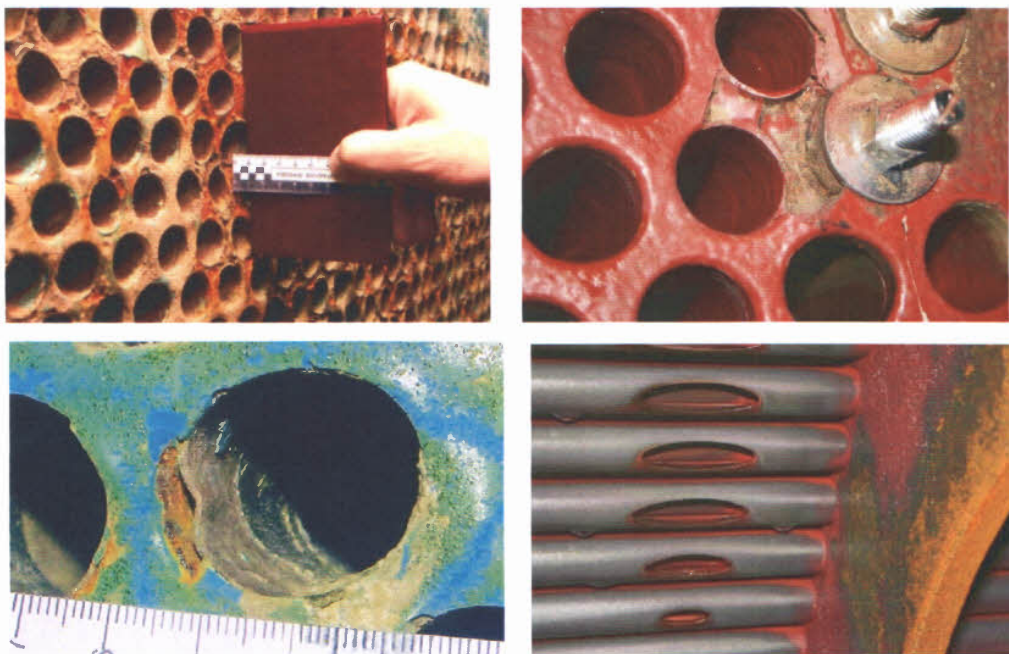


Рисунок 1 – Дефекти трубних систем в період експлуатації на конденсаторах АЕС

Крім того, трубні системи існуючих конденсаторів виготовлено з матеріалів, що містять мідь. Це є головним джерелом надходження сполук міді в цикл турбоустановки і, як наслідок, в парогенератори. Мідь і її окиси, що накопичуються в елементах конструкції парогенераторів, призводять до корозійного пошкодження металу внаслідок утворення контактної пари в середовищі електроліту, при цьому процеси дентінга і пітінга значно прискорюються в присутності сполук хлорид-іонів і сульфат-іонів. Виключення з обладнання другого контуру матеріалів, що містять мідь, і повна відсутність протікання води в конденсаторах є пріоритетними і

головними завданнями для забезпечення надійної та безпечної роботи обладнання турбоустановки і, в кінцевому підсумку, поліпшення показників роботи енергоблоків АЕС.

Концепцію модернізації конструкції конденсатора можна сформулювати в наступному:

- забезпечення вакуумної і водяної щільності конденсатора і вимог, пов'язаних з деаерацією конденсату;
- забезпечення розрахункового значення тиску відпрацьованої пари турбіни в процесі її експлуатації;
- надійність роботи в стаціонарних, змінних і перехідних режимах експлуатації;
- забезпечення заданого терміну експлуатації.

Метою представленої роботи є розробка науково-технічних основ створення та впровадження вискоелективних і надійних конструкцій конденсаторів нового покоління «блочно-модульного» виконання (К-38080 і К-57530), які перевершують зарубіжні аналоги за техніко-економічними показниками і можуть бути використані при модернізації обладнання на діючих і при будівництві нових АЕС.

Для досягнення означеної мети необхідно вирішити цілу низку задач. Зокрема:

- виконати аналіз працездатності існуючих конденсаторів турбоустановок потужністю 1000 МВт;
- виконати комплексне дослідження ефективності турбоустановок та оцінити вплив характеристик конденсатора на економічність роботи парової турбіни;
- розробити конструкцію конденсаторів нового покоління «блочно-модульного» виконання;
- провести динамічний аналіз системи «турбіна – конденсатор – фундамент»;
- навести технологічні вимоги виготовлення конденсаторів «блочно-модульного» виконання та розробити рекомендації щодо їх подальшої експлуатації.

Об'єктом дослідження є конденсаційні установки парових турбін К-1000-60/1500 і К-1000-60/1500-2 та інших, що підлягають модернізації.

Предмет дослідження – оптимізація нової конструкції конденсаторів «блочно-модульного» виконання з турбними системами із корозійно-стійких матеріалів.

Методи дослідження. Під час дослідження було застосовано методи математичного моделювання, вирішення прямих задач математичної фізики та спряжених задач теплообміну, методи сучасної прикладної термодинаміки та термoeкономічної оптимізації.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. На базі сучасних методів прикладної термодинаміки створено методологію системно-структурного аналізу для розв'язання задач

підвищення якості інженерних рішень щодо вдосконалення обладнання енергоперетворюючих установок та проведення їх термoeкономічної оптимізації.

2. Вперше створено комплексну методологію розрахунку тепло-гідравлічних характеристик конденсаторів нового покоління «блочно-модульного» виконання з врахуванням вимог забезпечення вібраційної надійності, конструктивної міцності та економічності роботи обладнання турбоустановки при збереженні його масо-габаритних характеристик, а також архітектурно-планувальних рішень машинного залу.

Практична значимість одержаних результатів:

1. Створено конструкцію окремих модулів повної заводської готовності з набраними охолоджуючими трубами, що дозволило спроектувати конденсатор нового покоління в «блочно-модульному» виконанні, який забезпечує високі техніко-економічні показники в широкому діапазоні режиму роботи з подальшим приростом електричної потужності турбоустановки на затискачах генератора за рахунок поглиблення розрахункового тиску пари.

2. В конструкції конденсатора застосовано охолоджуючі труби і зовнішні дошки з корозійно-стійких матеріалів, що підвищує надійність, працездатність, безпеку і збільшує термін служби.

3. Конструкція конденсатору дозволяє забезпечити відведення з трубного пучка пароповітряної суміші, що не сконденсувалася, та повну конденсацію пари, що надходить з циліндрів низького тиску турбіни.

Науково-технічні результати.

Представлену роботу присвячено створенню конденсаторів нового покоління «блочно-модульного» виконання для турбоустановок потужністю 1000 МВт, які відповідають сучасним вимогам з енергоефективності та надійності як для модернізації діючих АЕС, так і для будівництва нових.

Використовуючи науковий підхід в області сучасної прикладної термодинаміки і теплотехніки при оптимізації конструктивних елементів, а також досвід проектування й експлуатації конденсаторів, колективом авторів була відпрацьована методика і створена унікальна конструкція конденсаторів «блочно-модульного» виконання, які можуть працювати в різних кліматичних умовах і при різних умовах експлуатації енергоблоків АЕС потужністю 1000 МВт, включаючи підвищення теплової потужності реакторної установки енергоблоків до 107 %.

При виконанні роботи авторами на базі сучасних методів прикладної термодинаміки створено методологію системно-структурного аналізу для розв'язання задач підвищення якості інженерних рішень щодо вдосконалення обладнання енергоперетворюючих установок. Запропонована авторами методологія дозволила оцінити вплив на ефективність енергетичної установки всіх основних джерел незворотності, знайти розподіл і характер складових ексергетичних втрат в установці, визначити відносну ексергетичну вагу кожного елемента в системі, встановити характеристику зв'язків між втратами в елементах. Викладений в рамках методології термoeкономічний

підхід надав можливість розглянути всі зміни, що відбуваються з ексергетичним потоком з моменту введення в систему і до отримання кінцевого продукту з урахуванням ціни кожного внутрішнього потоку. Це дозволило визначити вартість ексергетичних втрат для заданої структури технологічної схеми енергоустановки і виконати її термoeкономичну оптимізацію, за результатами якої знайдено геометричні параметри трубної системи конденсатора, що відповідають мінімуму зведених витрат.

Запропоноване авторами компоновання конденсаторів раніше не застосовувалося в конструкціях існуючих конденсаторів, не має аналогів у світовій практиці проектування. Нове «модульне» компоновання трубного пучка (рис. 2) з урахуванням вимог по зварюванню модулів між собою на монтажі має оптимальну теплову ефективність і оптимальні габарити по поверхні теплообміну.

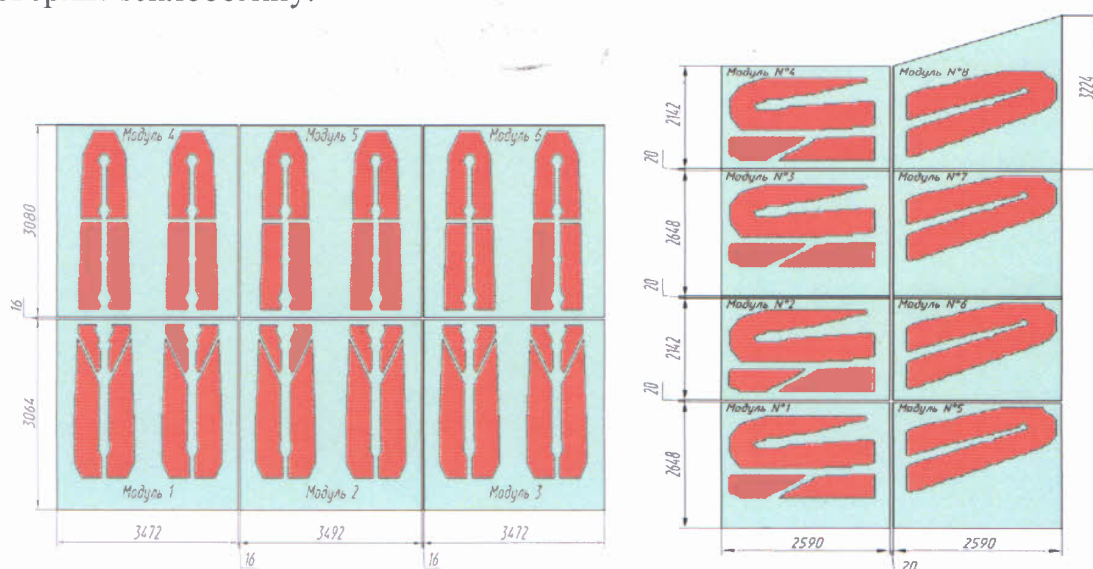
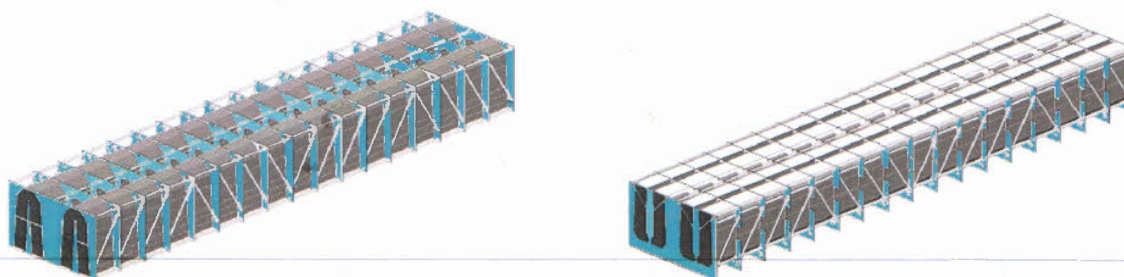


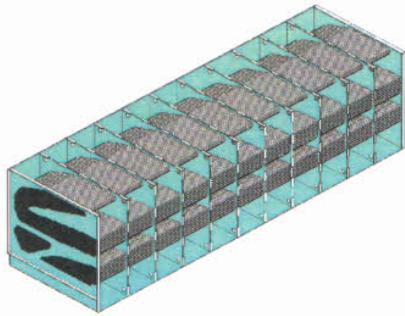
Рисунок 2 – «Модульне» компоновання трубного пучка конденсаторів К-38080 і К-57530

Застосування такого компоновання трубного пучка дозволило спроектувати конденсатор в «блочно-модульному» виконанні (рис. 5), що забезпечило виготовлення «блоків-модулів» повної заводської готовності (рис. 3, 4), їх транспортування і зручність виконання монтажних робіт на АЕС.

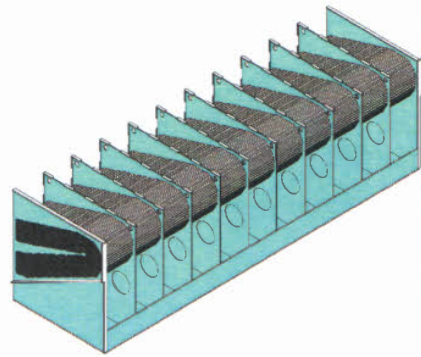


Модуль №№ 4,5,6 верхньої частини корпусу Модуль №№ 1,2,3 нижньої частини корпусу

Рисунок 3 – Модулі корпусу конденсатора К-38080 т.у. К-1000-60/1500-2

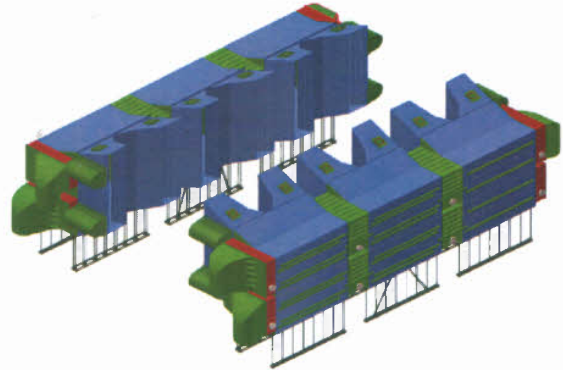
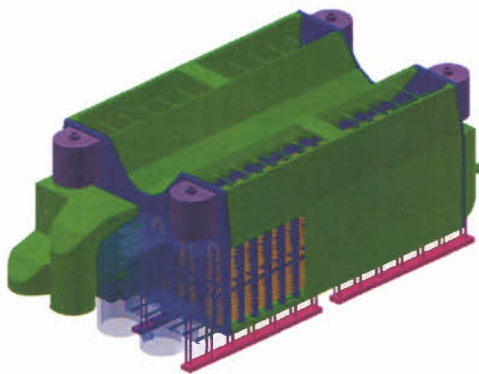


Модуль корпусу №№ 1, 2, 3, 4



Модуль корпусу №№ 5, 6, 7, 8

Рисунок 4 – Модулі корпусу конденсатора К-57530 т.у. К-1000-50/1500



Конденсатор К-38080 т.у. К-1000-60/1500-2 Конденсатор К-57530 т.у. К-1000-60/1500

Рисунок 5 – Конденсатори «блочно-модульного» виконання

Суттєвою перевагою цієї розробки є установка конденсаторів на існуючі стрижневі опори фундаменту зі збереженням будівельних конструкцій і без зміни компоувальних рішень по машинному залу (рис. 6).

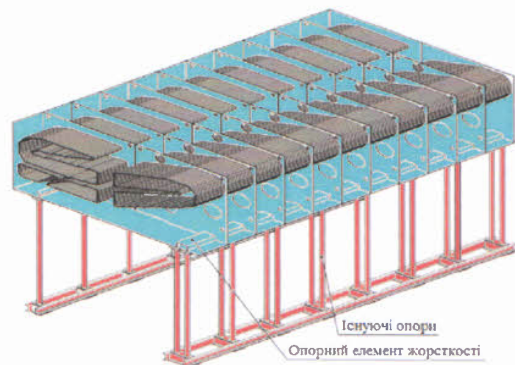
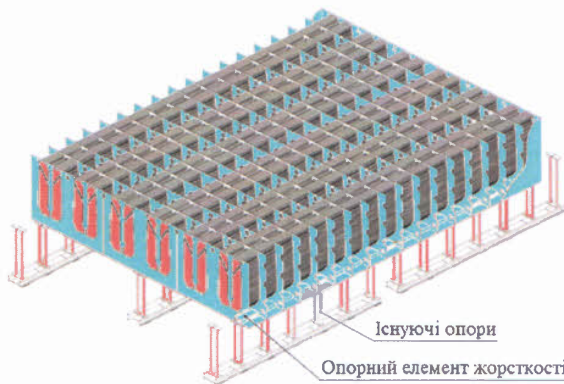


Рис. 6 – Установка конденсаторів К-38080 і К-57530 на існуючі стрижневі опори фундаменту

Досвід використання розробленої конструкції конденсаторів «блочно-модульного» виконання дозволяє приєднати їх до ряду сучасного обладнання з високими техніко-економічними показниками. Виключення з обладнання другого контуру матеріалів, що містять мідь, і повна відсутність протікання охолоджуючої води в конденсаторах забезпечують надійну та безпечну роботу обладнання турбоустановки.

До конструктивних заходів, за допомогою яких досягається висока герметичність, відносяться, в першу чергу, застосування охолоджуючих труб і зовнішніх дошок з матеріалів, стійких проти ерозійних і корозійних впливів з боку води і пари, запобігання механічних пошкоджень охолоджуючих труб при їх вібрації і підвищення щільності їх кріплення.

Установка труб охолоджуючих в модулях конденсаторів по типу «лук» (рис. 7) виконується вперше за технологією підприємства-виробника (розробника конструкції) – ПАТ «Турбоатом», є технічною новизною конструкції і технології, та не застосовувалася раніше в аналогічних конструкціях конденсаторів, розроблених ПАТ «Турбоатом», а також не застосовується в конденсаторах зарубіжних конструкцій. Установка труб охолоджуючих таким способом дозволяє знизити термічні напруги в місцях з'єднання «труба – дошка зовнішня», а також знизити в елементах конденсатора температурні і компенсаційні напруги за рахунок оптимального співвідношення жорсткісних характеристик сполучених елементів конструкції і виключити стояночну корозію в трубах. Все це враховується при оцінці міцності елементів конструкції у визначенні розмахів наведених напруг (σ_{RV}) і компенсаційних напруг, а також при визначенні амплітуди наведених напруг (σ_{aF}) і компенсаційних напруг з урахуванням концентрації напружень. Тобто, установка труб охолоджуючих по типу «лук» забезпечує статичну і циклічну міцність в елементах конструкції.

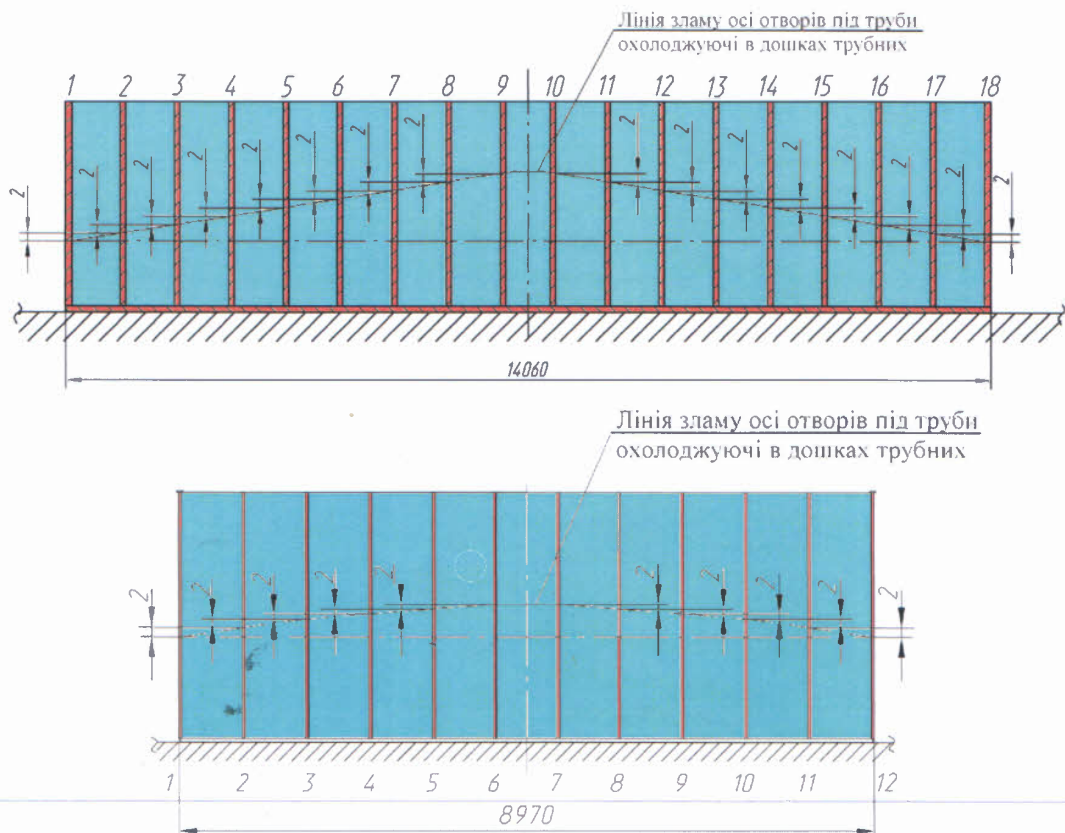


Рис. 7 – Установка труб охолоджуючих в модулях конденсаторів К-38080 і К-57530 по типу «лук»

При проектуванні конденсаторів нового покоління «блочно-модульного» виконання авторами роботи були розроблені методи і підходи до комплексної оцінки їх конструктивної міцності, засновані на досвіді проектування, виробництва, експлуатації та випробувань конденсаторів парових турбін великої потужності теплових і атомних станцій. Розроблено єдиний підхід щодо програмного забезпечення та методики розрахунку конденсаторів турбоустановки К-1000-60/1500 з конденсаторами бокового розташування і турбоустановки К-1000-60/1500-2 з конденсаторами підвального розташування.

При розрахунку використано метод кінцевих елементів, який дозволяє представити суцільне тіло у вигляді сукупності окремих кінцевих елементів, що взаємодіють між собою в кінцевому числі вузлових точок, до яких прикладаються деякі фіктивні зусилля взаємодії, що характеризують дію розподілених внутрішніх напружень, які прикладені уздовж реальних кордонів стикування суміжних елементів. В результаті розрахунку визначено напружено-деформований стан елементів конденсатора «блочно-модульного» виконання і перехідних патрубків турбоустановки під дією силових і температурних факторів і визначено максимально можливі напруження в елементах даної зварної конструкції. При створенні конструкції конденсаторів «блочно-модульного» виконання з урахуванням високих вимог до якості проектування і виготовлення, що пред'являються до даного устаткування, використовуються сучасні технології та способи контролю, які підвищують експлуатаційні характеристики конденсаторів.

Технологічність конструкції вузлів конденсатора при виготовленні та монтажі підтверджується технологією виготовлення, а геометрична сумісність модулів конденсатора один з одним при виготовленні і монтажі забезпечується поетапною контрольною збіркою модулів без охолоджуючих труб і з ними. Повна збірка вузлів конденсаторів виконується згідно з інструкцією по монтажу конденсаторів і здійснюється на монтажі під технічним керівництвом ПАТ«Турбоатом». Розроблена технологія монтажу є унікальною, раніше не застосовувалася при монтажі конденсаторів на АЕС України та за кордоном і не має аналогів при виконанні монтажних робіт.

Системний підхід при використанні наукових досягнень і нових розробок дозволив досягти підвищення економічності турбоустановок АЕС за рахунок впровадження ефективних конденсаторів, які працюють у складі турбоустановок потужністю 1000 МВт, що в результаті забезпечує надійність і безпеку енергоблоків в цілому.

Обсяг впровадження роботи та досягнутий ефект.

Ефективність нових конденсаторів було підтверджено експлуатацією їх на енергоблоках потужністю 1000 МВт АЕС України і за кордоном.

Фактичний приріст електричної потужності на затискачах генератора з новими конденсаторами «блочно-модульного» виконання склав:

- 16,5 ... 19,0 МВт на енергоблоці № 2 ВП «Южно-Українська АЕС» турбоустановки К-1000-60/1500 (лист ВП «Южно-Українська АЕС», № 68-25/13120 від 03.07.2017р., протокол № 32 від 01.06.2017р.);

- 10,0 МВт на енергоблоці № 3 ВП «Запорізька АЕС» турбоустановки К-1000-60/1500-2 (ВП «Запорізька АЕС», Технічне рішення № 03.ТО.SD.ТР. 86-18 від 26.01.2018р.);





- 7,60 МВт на енергоблоці № 1 «Балаковська АЕС», турбоустановки К-1000-60/1500-2 (Звіт «Нарада начальників цехів, 14.02.2013р.» з урахуванням експрес-оцінки ефективності конденсаторів);





- 6,80 МВт на енергоблоці № 1 «Калінінська АЕС» турбоустановки К-1000-60/1500 (Звіт про проведення теплових випробувань конденсатора парової турбіни К-1000-60/1500 після заміни, № 01.МЗ.43.1.48.ОТ.Т.24 від 06.06.2014р.).

Сумарний економічний ефект від впровадження конденсаторів нового покоління в «блочно-модульному» виконанні в складі турбоустановок потужністю 1000 МВт становить 2 628 140 тис. грн. Отримані результати по приростам електричної потужності турбоустановок не тільки покривають витрати власних потреб енергоблоків, а й заощаджують паливо на вироблення одного кВт·год., тому що підвищення потужності веде до зниження питомої витрати теплоти бруто/нетто.

Створення конструкції конденсаторів для заміни фізично зношених (існуючих) конденсаторів турбоустановок потужністю 1000 МВт на діючих АЕС України, проектування і будівництво нових АЕС, характеристики яких відповідають сучасним вимогам, є своєчасним кроком, необхідним для забезпечення енергобезпеки України, виконання Енергетичної стратегії країни і дає можливість роботи обладнання АЕС спільно з енергосистемами європейських країн.

Кількість публікацій: 86, у т.ч. 2 монографії, 84 статті (4 – в міжнародних виданнях). За базою даних Scopus загальне число посилань на публікації авторів складає 2, h-індекс – 1; відповідно до бази даних Google Scholar загальна кількість посилань – 78, h-індекс – 6. Новизну та конкурентоспроможність технічних рішень захищено 0 патентами.


О.В. Шавлаков

М.О. Феофентов

О.В. Панченко

О.Г. Касаткін


О.М. Усс

С.Т. Пацюк

О.В. Вавілов

Д.Х. Харлампіді