

С.В. Швачич, В.В. Буличов, К.В. Тернова

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ В КОНТУРІ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Анотація. Актуальність роботи обумовлена виснаженням запасів традиційних видів палива та зростанням навантаження на біосферу за рахунок викидів при спалюванні вугілля, нафти та газу. Рішення цих проблем можна знайти у розвитку ядерної енергетики. Тому метою даної роботи є оптимізація процесів теплообміну в другому контурі атомної електростанції. В роботі розглянуто заходи щодо оптимізації процесів теплообміну в тепловій схемі другого контуру АЕС для підвищення енергетичних показників. А саме, запропоновано реагент, який видаляє солі жорсткості на стінках теплообмінного обладнання. В ході роботи вирішена задача щодо оптимізації руху теплоносіїв в проміжних теплообмінниках для підвищення енергоефективності енергетичного обладнання.

Ключові слова: атомна електростанція, ядерна енергетика, теплообмін, реагент, реактор, енергоефективність.

Вступ. В сучасному світі енергетика є основою розвитку базових галузей промисловості, що визначають процес виробництва. Тому все гостріше постає питання про виснаження запасів традиційних видів палива та можливості зростання навантаження на біосферу за рахунок викидів при спалюванні вугілля, нафти та газу. Рішенням цих питань може стати розвиток ядерної енергетики.

Перевагами ядерної енергетики над енергетикою інших видів є велика теплотворна здатність ядерного палива (у 2 мільйони разів більше ніж нафти і в 3 мільйони разів більше ніж вугілля), кращі економічні показники, менше забруднення довкілля. До того ж відпадає потреба використовувати кисень, якого на енергетичні потреби спалюється в 5 разів більше, ніж його споживають всі живі істоти. Крім того запаси ядерного пального (якщо їх повністю використати) приблизно в 20 разів перевищують запаси органічного палива всіх видів [1].

Основа ядерної енергетики – атомні електростанції, які забезпечують близько 6% світового виробництва енергії та 13-14% електроенергії. За даними МАГАТЕ в 2013 році у світі працювало 437 промислових ядерних реакторів,

розташованих на території 31 країни. Також було збудовано понад 150 суден з ядерними енергетичними установками [1].

Якщо коротко сформулювати в чому полягають переваги ядерної енергетики, то отримаємо наступне:

1) велика енергоємність використовуваного палива (1 кілограм урану, збагачений до 4 %, при повному використанні виділяє енергію еквівалентну спалюванню приблизно 100 тонн високоякісного кам'яного вугілля або 60 тонн нафти) [2];

2) можливість повторного використання палива (після регенерації в реакторах на швидких нейтронах). Розщеплений матеріал U_{235} може бути використаний знову. З розвитком технології реакторів на швидких нейтронах в перспективі дає можливість переходу на замкнений паливний цикл, що означає повну відсутність відходів;

3) ядерна енергетика не сприяє створенню парникового ефекту. Щорічно атомні станції в Європі дозволяють уникнути емісії 700 мільйонів тонн CO_2 . Таким чином, інтенсивний розвиток ядерної енергетики можливо вважати одним з методів боротьби з глобальним потеплінням. На даний момент по всьому світі працює понад 436 енергоблоків різної потужності та типів.

Зазначимо також, що рівень розвитку реакторобудування повною мірою залежить від вивчення гідродинаміки та теплообміну теплоносіїв в елементах активної зони ядерних реакторів. Необхідність знання процесів теплообміну і гідродинаміки визначається тим, що ядерні реактори являють собою енергетично напружені теплові машини, в яких зазначені процеси проявляються в досить складній формі.

З одного боку, істотні запаси за параметрами теплоносія, що обмежують потужність і ККД атомних енергетичних установок (АЕУ) неприпустимі. З іншого боку, перевищення локальних температур в активній зоні понад допустимі норми викликає вихід реактора з ладу. Причини аварії ядерних реакторів пов'язані в основному з гідравлічними або тепломеханічними ефектами. Тому необхідно вміти з достатнім ступенем точності визначати локальні характеристики теплових процесів в активній зоні ядерних реакторів. Успішна експлуатація ядерних реакторів багато в чому визначається повнотою і надійністю теплофізичного обґрунтування.

За об'єкт дослідження в даній роботі пропонується взяти другий контур третього енергоблоку Рівненської електростанції.

Метою даної роботи є оптимізація процесів теплообміну в другому контурі атомної електростанції.

Методом дослідження є обчислювальний експеримент.

Проаналізувавши енергоефективні заходи, які представлені в науково-технічній літературі, щодо підвищення енергоефективності енергетичних контурів АЕС, можна виділити наступні методи:

- повторне використання низько-потенційної теплоти;
- заміна діючого ізолятора з'єднуючого трубопроводу;
- встановлення потужніших турбін та електрогенераторів;
- зниження тиску в першому контурі енергоблоку;
- збільшення глибини вигоряння ядерного палива;
- збільшення встановленої потужності модернізацією енергетичного обладнання;
- зниження контрольованих відборів пару на теплофікаційні потреби станції;
- повторне використання теплоти, відібраної на конденсаторних установках, в зимній період часу, для власних потреб станції;
- хімічна промивка трубопроводу та обладнання;
- зменшення кількості ремонтів та строків простою обладнання;
- зменшення енергозатрат на власні потреби станції.

На Рівненській атомній електростанції (РАЕС) експлуатують чотири енергоблоки з реакторами ВВЕР: перший та другий енергоблоки мають в своєму складі реактори ВВЕР-440, третій та четвертий – ВВЕР-1000.

Третій енергоблок РАЕС має двоконтурну компоновку. Перший контур складається з реакторної установки та чотирьох кілець теплообміну. Кожне кільце складається з головного циркуляційного трубопроводу (ГЦТ), парогенератору ПГВ-1000М, запірної автоматичної арматури та головки циркуляційного насосу. Другий контур має в своєму складі турбоагрегат (який складається з парової турбіни та електрогенератору), конденсаторну установку, 2 підігрівачі високого тиску (ПВТ), деаераторну установку. Для розробки заходів щодо підвищення енергоефективності другого контуру РАЕС було складено та розраховано його тепловий баланс.

Рівняння теплового балансу має наступний вигляд:

$$Q_{\text{яр}} = Q_{\text{заг.ПГ}} + Q_{\text{тр.1к}} + Q_{\text{тр.2к}} + Q_{\text{кд}} + Q_{\text{п.в.}} + Q_{\text{виг}} + Q_{\text{нд}} \quad (1)$$

$Q_{\text{яр}}$ – кількість теплоти, яку виробляє ядерний реактор, МВт;

$Q_{заг.ПГ}$ – кількість теплоти, яку споживають парогенератори, МВт;

$Q_{тр.1к}$, $Q_{тр.2к}$ – кількість теплоти, яка втрачається з трубопроводу першого та другого контуру, МВт;

$Q_{кд}$ – кількість теплоти, яка віддається в конденсаторній установці, МВт;

$Q_{п.в.}$ – кількість повторно використаної теплоти, МВт;

$Q_{виг}$ – кількість теплоти, яка вигорає в ядерному реакторі, МВт;

$Q_{нд}$ – теплота недогріву, МВт.

Результати розрахунків теплового балансу показали, що з системи нерівномірним чином втрачається тепла енергія з поверхонь трубопроводу першого та другого контурів, а саме 5,73 МВт та 1,41 МВт. З цими тепловими витратами можливо боротися шляхом заміни ізоляції на більш нові, досконалі види. Окрім того, в ядерному реакторі відбувається розпад важких ізотопів урану, в наслідок цього, з системи втрачається 21,12 МВт теплової енергії, цей показник ніяким чином неможливо знизити, так як після розщеплення атому урану реакція ділення припиняється, тобто відбувається вигорання ядерного палива. В систему повертається 139,56 МВт теплової енергії за рахунок теплових насосів, а ця кількість енергії є повторно використаною, іде на нагрів теплоносія в підігрівачах високого та низького тиску. Також в системі втрачається 82,72 МВт теплової енергії на термічний недогрів робочого тіла другого контуру. Це відбувається завдяки відкладанню солей жорсткості на теплообмінних стінках теплообмінного обладнання контуру. Маса відкладень сягає 1082,4 кг, в середньому на внутрішніх стінках теплообмінників осідає 2,3 мм відкладень, які перешкоджають процесам теплообміну.

Більш того, на основі звітів таких компаній, як ВАТ «Инжиниринговая компания ЗИОМАР» та ВАТ «Машиностроительный завод ЗиО-Подольск» стало відомо, що в період паливної компанії строком 18 місяців в системі другого контуру та стінках теплоенергетичного обладнання відкладається від 0,6 до 1,6 тонн міднозалізоокисів. Ця маса відкладень погіршує процеси теплообміну в усіх теплових агрегатах, збільшує гідравлічний опір системи, в наслідок чого, збільшується кількість поточних ремонтів.

Додавання реагенту PuroTech113 в робоче тіло другого контуру дало можливість позбавити систему від відкладення в ній солей жорсткості, так як даний реагент «зв'язує» вільні іони кальцію та магнію. В свою чергу на стінках теплообмінного обладнання більш не відкладається накип, що дає змогу в повній мі-

рі передавати необхідну кількість тепла. Повторний розрахунок теплового балансу показав, що ККД блоку завдяки цьому збільшується на 3%.

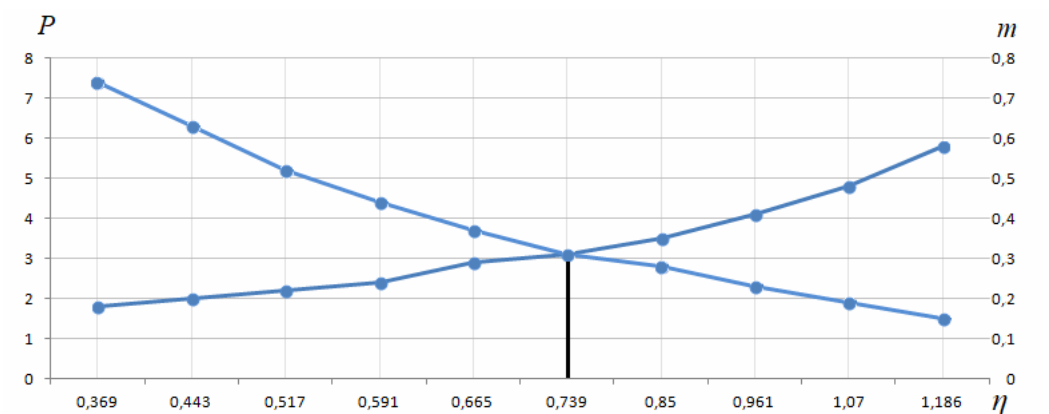
Як відомо, різноманітні теплообмінні апарати використовуються на сучасних електростанціях. Призначення теплообмінників – підвищити тепловий ККД електростанції. Теплообмінники значно покращують економічні та експлуатаційні характеристики електростанцій. Теплообмінники несуть важливу функцію на АЕС. Проміжні теплообмінники (ПТО) є додатковою ланкою при передачі теплоти від реактора до парогенератора або на технологічне виробництво. Наявність ПТО обумовлена необхідністю забезпечити додатковий, практично майже нездоланий бар'єр, який попереджає радіоактивне забруднення генеруючого парою або технологічним продуктом, а також виключити забруднення і наслідки потрапляння пари або технологічного продукту в перший контур. При цьому передача тепла від теплоносія першого контуру повинна здійснюватися з мінімальним зниженням температурного циклу. Крім того, ПТО повинні забезпечувати досить ефективну передачу залишкового тепла реактора при планових і аварійних зупинках АЕС.

Виходячи з цього була сформульована та вирішена задача оптимізації руху теплоносія в проміжному теплообміннику. Критерієм оптимальності був вибраний коефіцієнт ефективності теплообмінника η . Ефективність теплообмінника в загальному випадку є функцією режимних параметрів, схеми взаємного руху теплоносіїв і особливостей гідродинаміки і теплообміну реальних теплообмінників. Коефіцієнт ефективності теплообмінника може бути представлений наступною залежністю [3]:

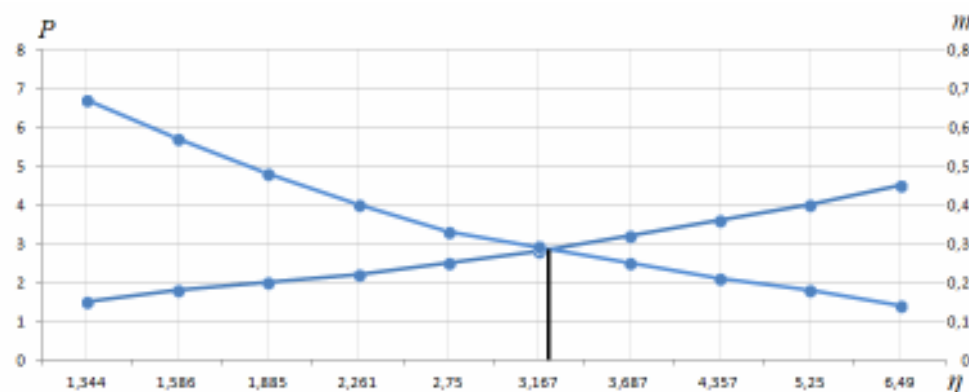
$$\eta = f(p_T, m), \quad (2)$$

p_T, m – оптимізуючі параметри, де $p_T = K \cdot F / C_p G_{HG}$ – параметр теплопередачі; $m = G_{ГЩ} / G_{HG}$ – відношення водяних еквівалентів, G – масові витрати теплоносія, кг/с.

Результати вирішення задачі оптимізації представлені на рис 1.



а)



б)

Рисунок 2 – Схема руху – а) прямоток, б) протиток

Висновки. Розглянуті шляхи оптимізації процесів теплообміну в теплової схемі другого контуру АЕС, що дозволяють підвищити енергетичних показники. Показано, що запропонований реагент видаляє солі жорсткості на стінках теплообмінного обладнання. В ході роботи вирішена задача щодо оптимізації руху теплоносіїв в проміжних теплообмінниках для підвищення енергоефективності енергетичного обладнання.

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Левин В. Е. Ядерная физика и ядерные реакторы. 4-е изд. — М.: Атомиздат, 1979.
2. Просто о сложном. Ривненская АЭС в энергетике Украины. – Ровно, 2019. – 253 с.
3. Методические указания по теме «Тепловой и гидравлический расчет теплообмінного оборудования АЭС». РД 24.03.05. – 89. – Л. НПО ЦКТИ, 1991. – 209 с.

REFERENCES

1. Levin V. E. Yadernaya fizika i yadernyye reaktoryi. 4-e izd. — M.: Atomizdat, 1979.
2. Prosto o slozhnom. Rivnenskaya AES v energetike Ukrainyi. — Rovno, 2019. — 253 p.
3. Metodicheskie ukazaniya po teme «Teplovoiy i gidravlicheskiy raschet teploobmennogo oborudovaniya AES». RD 24.03.05. — 89. — L. NPO TsKTI, 1991. — 209 p.

Received 12.03.2021.

Accepted 15.03.2021.

Оптимизация процессов теплообмена

в контуре атомной электростанции с целью его повышения

Актуальность работы обусловлена истощением запасов традиционных видов топлива и ростом нагрузки на биосферу за счет выбросов при сжигании угля, нефти и газа. Для решения этих проблем является развитие ядерной энергетики. Поэтому целью данной работы является оптимизация процессов теплообмена во втором контуре атомной электростанции. В работе рассмотрены меры по оптимизации процессов теплообмена в тепловой схеме второго контура АЭС для повышения энергетических показателей. В частности, предложен реагент, который удаляет соли жесткости на стенках теплообменного оборудования. В ходе работы решена задача по оптимизации движения теплоносителей в промежуточных теплообменниках для повышения энергоэффективности энергетического оборудования.

Optimization of heat transfer processes in the circuit of a nuclear power plant in order to increase it

The urgency of the work is due to the depletion of traditional fuel reserves and increasing the load on the biosphere because of emissions from burning coal, oil and gas. The solution of these problems are the development of nuclear energy. The advantages of nuclear energy are analyzed, namely: high calorific value of nuclear fuel, better economic indicators, less environmental pollution. The purpose of this work is to optimize the heat transfer processes in the secondary circuit of a nuclear power plant.

It is proposed to take the second circuit of the third power unit of the Rivne nuclear power plant as the object of research. The need for knowledge of heat transfer processes and hydrodynamics is determined by the fact that nuclear reactors are energy-intensive thermal machines, in which these processes are manifested in a rather complex form. Therefore, measures to optimize heat transfer processes in the thermal circuit of the second circuit of the NPP in order to increase energy performance are considered. In order to remove from the system the hardness salts that settle on the walls of the equipment and impair the heat transfer processes, a reagent has been selected to bind the hardness salts. The addition of the PuroTech113 reagent to the working circuit of the secondary circuit made it possible to free the system from the deposition of hardness salts in it, as this reagent "binds" free calcium and magnesium ions. In turn, scale is no longer deposited on the walls of the heat exchange equipment, which allows to fully transferring the required amount of heat. Recalculation of the thermal balance showed that the efficiency of the unit is increased by 3%.

The efficiency coefficient of the heat exchanger was chosen as the criterion of optimality. The efficiency of the heat exchanger in the general case is a function of the mode parameters, the scheme of mutual movement of heat carriers and features of hydrodynamics and heat transfer of real heat exchangers. The problem of optimizing the movement of heat carriers in intermediate heat exchangers is solved in paper.

Швачич Світлана Василівна – доцент кафедри енергетики Українського державного хіміко-технологічного університету, кандидат фізико-математичних наук, доцент.

Буличов Володимир Вікторович – доцент кафедри енергетики українського державного хіміко-технологічного університету, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник.

Тернова Катерина Віталіївна – науковий співробітник Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України, кандидат технічних наук.

Швачич Светлана Васильевна – доцент кафедры энергетики Украинского государственного химико-технологического университета, кандидат физико-математических наук, доцент.

Бульчев Владимир Викторович – доцент кафедры энергетики Украинского государственного химико-технологического университета, кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Терновая Екатерина Витальевна – научный сотрудник Института технической механики НАН Украины и ГКА Украины, кандидат технических наук.

Shvachich Svetlana Vasilyevna - Associate Professor of Energy Department of the Ukrainian State University of Chemical Technology, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor.

Bulychev Vladimir Viktorovich - Associate Professor of Energy Department of the Ukrainian State University of Chemical Technology, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher.

Ternova Kateryna Vitaliyivna - Research Fellow, Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, candidate of technical sciences.