

О. В. ЄФІМОВ, Л. І. ТЮТЮНИК, Т. А. ГАРКУША, Т. О. ЄСИПЕНКО, А. В. МОТОВІЛЬНИК

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА ПГВ-1000

У матеріалах статті розглянуто конструкційні характеристики горизонтальних парогенераторів ПГВ-1000 для АЕС із ВВЕР. Парогенератор АЕС, зокрема парогенератор ПГВ-1000, є специфічним теплообмінним агрегатом. Цей агрегат разом з ядерним реактором і паровою турбіною належить до основного обладнання багатоконтурних (двоконтурних) паротурбінних АЕС. У парогенераторі здійснюється виробництво робочої пари з використанням теплоти, що відводиться з активної зони реактора охолоджувальним середовищем і прямує на поверхні теплообміну парогенератора. Парогенератори АЕС, пов'язуючи між собою контури теплоносія та робочої речовини, однаково належать кожному з них. Що Сприймає тепло середовищем у парогенераторі є робоча речовина (вода, пара). Парогенератори АЕС типу ПГВ-1000 з охолоджуваними водою під тиском парогенераторами виробляють суху насичену пару. Вимога підтримання високої чистоти теплоносія зумовлює виконання поверхонь теплообміну таких ПГ з аустенітної нержавіючої сталі з електрополірованими поверхнями. Конструктивні характеристики сучасних горизонтальних парогенераторів типу ПГВ-1000 різних модифікацій забезпечують високі техніко-економічні показники роботи енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000 та високу ремонтпридатність, що дозволяє продовжувати термін експлуатації вітчизняних АЕС.

Ключові слова: горизонтальний парогенератор ПГВ-1000, математична модель, конструкційні характеристики.

A. YEFIMOV, L. TIUTIUNYK, T. HARKUSHA, T. YESIPENKO, A. MOTOVILNIK

MATHEMATICAL MODEL OF THE HORIZONTAL STEAM GENERATOR PGV-1000

The materials of the article consider the design characteristics of horizontal steam generators PGV-1000 for WWER NPPs. The NPP steam generator, in particular the PGV-1000 steam generator, is a specific heat exchange unit. This unit, together with a nuclear reactor and a steam turbine, is one of the main equipment of multi-circuit (double-circuit) steam turbine NPPs. The steam generator produces working steam using heat dissipated from the reactor core by the cooling medium and sent to the heat exchange surface of the steam generator. NPP steam generators, connecting the contours of the coolant and the working substance, equally belong to each of them. The heat-absorbing medium in the steam generator is the working substance (water, steam). PGV-1000 type NPP steam generators with pressurized water reactors produce dry saturated steam. The requirement to maintain high purity of the coolant is due to the heat transfer surfaces of such steam generators made of austenitic stainless steel with electropolished surfaces. The design characteristics of modern horizontal steam generators such as PGV-1000 of various modifications provide high technical and economic performance of NPP units with WWER-1000 and high maintainability, which allows to extend the service life of domestic NPPs.

Key words: horizontal steam generator PGV-1000, mathematical model, design characteristics.

Вступ

Парогенератор АЕС, зокрема парогенератор ПГВ-1000, представляє собою специфічний теплообмінний агрегат. Цей агрегат разом з ядерним реактором і паровою турбіною відноситься до основного устаткування багатоконтурних (двоконтурних) паротурбінних АЕС [1–3]. В парогенераторі здійснюється виробництво робочої пари з використанням теплоти, що відводиться з активної зони реактора охолоджуючим середовищем і що направляється на поверхні теплообміну парогенератора. Парогенератори АЕС, зв'язуючи між собою контури теплоносія і робочої речовини, в рівній мірі належать кожному з них [4]. Теплові, гідравлічні і конструктивні характеристики горизонтального парогенератора АЕС з ПГВ-1000, на номінальному режимі наведені в табл. 1.

Середовищем, що сприймає тепло, в парогенераторі є робоча речовина (вода, пара). Парогенератори АЕС типу ПГВ-1000 з реакторами, що охолоджуються водою під тиском, виробляють суху насичену пару. Вимогу підтримки високої чистоти теплоносія обумовлює виконання поверхонь теплообміну таких ПГ з аустенітної нержавіючої сталі з електрополірованими поверхнями.

Мета роботи

Аналіз конструкційних характеристик горизонтальних парогенераторів ПГВ-1000 для АЕС з ВВЕР.

Загальна частина

Конструктивно парогенератор ПГВ-1000 для АЕС з ВВЕР є однокорпусним двоконтурним теплообмінним апаратом горизонтального розташування з зануреним трубним пучком. Парогенератор складається з корпусу, вхідного і вихідного колекторів U-образного трубного пучка поверхні теплообміну, роздаючого колектора живильної води, вбудованого сепараційного пристрою, паровідвідної системи, системи продувань і дренажу. Циліндрова частина розділена на три обичайки, середня з яких має збільшену товщину, оскільки ослаблена циліндровими вертикальними колекторами, що проходять через неї. Колектори служать для підведення і відведення первинного теплоносія. Поверхня теплообміну складається з двох симетричних частин (лівої і правої), кожна з яких включає в себе половину роздаючого і збираючого колекторів, які зв'язані U-образними трубами. Число труб в кожній частині дорівнює половині загальної кількості труб. Площа для закріплення труб в кожному напів-колекторі дорівнює $\frac{1}{4}$ частки кола діаметром $\pi d_{v.k.}$, де $d_{v.k.}$ – діаметр колектора (рис. 1).

© О. В. Єфімов, Л. І. Тютюник, Т. А. Гаркуша, Т. О. Єсіпенко, А. В. Мотовільник, 2022

Таблиця 1 – Теплові, гідравлічні і конструктивні характеристики горизонтального парогенератора АЕС з ПГВ-1000 на номінальному режимі роботи енергоблока

| Найменування параметра | Чисельне значення параметра |
|---|-----------------------------|
| Теплова потужність, МВт | 750 |
| Паропроодуктивність, кг/с | 408 |
| Тиск пари, що генерується, МПа | 6,27 |
| Температура пари, °С | 278,5 |
| Температура живильної води, °С | 225 |
| Витрата теплоносія, кг/с | 4100 |
| Тиск теплоносія, МПа | 15,7 |
| Температура теплоносія на вході в парогенератор, °С | 320 |
| Температура теплоносія на виході з парогенератора, °С | 289 |
| Середньологаріфмічний температурний напір, °С | 23,1 |
| Коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м ² ·К) | 6370 |
| Середня густина теплового потоку, Вт/м ² | 6370 |
| Площа поверхні, що передає тепло (по зовнішньому діаметру труб), м ² : – розрахункова – фактична | 5096 6115 |
| Середня швидкість теплоносія в трубах, м/с | 4,2 |
| Середня швидкість виходу пари з дзеркала випаровування, м/с | 0,382 |
| Середня швидкість пари на вході до жалюзійного сепаратора, м/с | 0,38 |
| Вологість пари на виході з ПГ, %, не більш | 0,25 |
| Діаметр і товщина стінки труб поверхні, що передає тепло, мм | 16×1,5 |
| Число труб | 11000 |
| Середня довжина, м | 11,1 |
| Загальна довжина, м | 124460 |
| Внутрішній діаметр колектора теплоносія на ділянці завальцовки труб, мм | 834 |
| Внутрішній діаметр колектора живильної води, мм | 270 |
| Довжина колектора живильної води, мм | 9300 |
| Число роздаючих труб | 16 |
| Внутрішній діаметр роздаючих труб, мм | 16 |
| Число рядів в жалюзійних сепараторах | 8 |
| Кут нахилу ряду до горизонту, град | 64 |
| Висота сепаратора над рівнем води, мм | 650 |
| Відстань від осі верхнього ряду труб до зануреного дірчастого листа, мм | 260 |
| Діаметр отворів в зануреному дірчастому щиті, мм | 15 |
| Крок розташувань отворів (по квадрату), мм | 52 |
| Внутрішній діаметр трубопроводу підведення і відведення теплоносія, мм | 870 |
| Внутрішній діаметр трубопроводу підведення живильної води, мм | 382 |
| Внутрішній діаметр трубопроводу відведення свіжої пари, мм | 210 |

Труби поверхні теплообміну компонуються до пакетів (рис. 2), число рядів яких по висоті 2–3. У верхньому ряду розташовується максимальне число пакетів 3–5. Відстань між рядами пакетів і між пакетами у ряді зазвичай дорівнює 2–3 крокам трубних решіток і використовується для розміщення опорних конструкцій поверхні теплообміну і пристрою введення живильної води в парогенератор (для розміщення опускних патрубків живильної води використовується простір між внутрішніми пакетами). Таким чином трубна дошка є напівкруглою. Внаслідок цього U-образна труба включає не тільки дві горизонтальних ділянки, але і дві зігнуті ділянки для радіального входу в коле-

ктор. Для спрощення проводиться умовна заміна колектора плоскою трубною дошкою, розташованою на відстані половини радіуса від центру колектора.

До колекторів включено 11000 труб горизонтального пучка. Внутрішній діаметр труб дорівнює 16 мм, товщина стінок 1,5 мм, середня довжина дорівнює 11,3 м. Труби завальцовані вибухом на всю товщину колектора з подальшим обварюванням. Колектори до корпусу кріпляться через термокомпенсатори. Труби пучка спираються на дистанціонуючі решітки. Для вирівнювання навантаження дзеркала випаровування над пучком розташований занурюваний дірчастий лист.

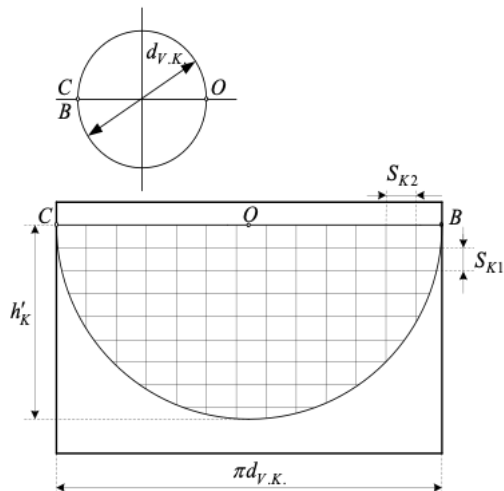


Рис. 1 – Розташування труб ПТ на колекторах ПГ:
 $d_{v.k.}$ – внутрішній діаметр колектора; h_k – відстань між першим і останнім рядами колектора, S_{K1}, S_{K2} – кроки трубної решітки

Живильна вода подається по трубопроводу, введеному в корпус через термокомпенсатор. З трубопроводу живильна вода по чотирьох перфораних відведеннях прямує у вхідну зону поверхні теплообміну. У вхідній зоні має місце більший температурний напір, тому в ній виробляється і більша кількість пари. Напряма саме в цю зону холодної живильної води приводить до зменшення паровмісту за рахунок конденсації частини пари. Така схема підведення живильної води декілька вирівнює паровміст по перерізу водяного об'єму, що приводить до приблизно рівних швидкостей пари на вході в паровий простір. Сепарація пари відбувається в нахилених жалюзійних сепараторах (на парогенераторах, виготовлених після 1992 р. відсутня). Стеля, що приймає пару і представляє собою дірчастий щит, сприяє вирівнюванню швидкостей парових потоків в об'ємі сепарації. Відсепарована рідина по трубах поступає під рівень уздовж стінок корпусу.

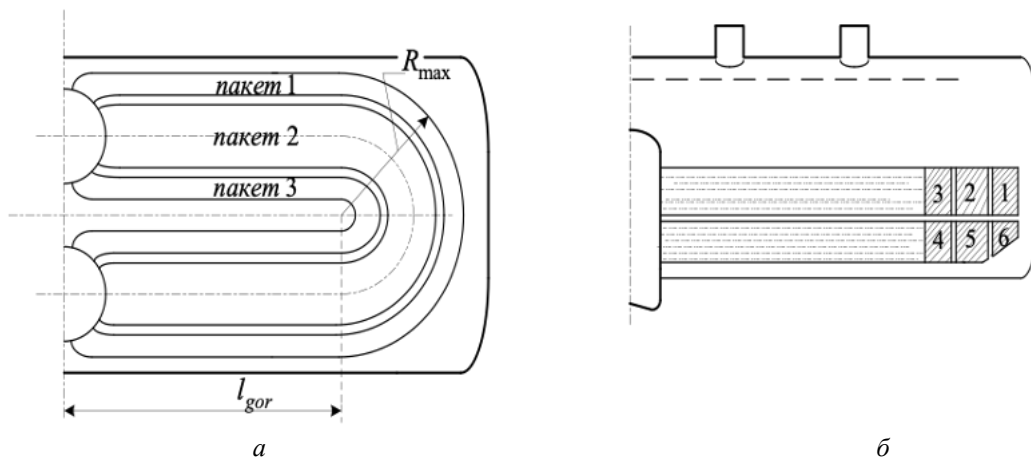


Рис. 2 – Розміщення пакетів труб в ПТ:

l_{gor} – довжина горизонтальної частини труб; R_{max} – радіус труб з найбільшим вигином:
 а – U-образна труба включає дві горизонтальних ділянки і дві зігнуті ділянки для радіального входу в колектор; б – Труби поверхні теплообміну компонується до пакетів (число рядів яких по висоті 2–3, у верхньому ряду розташовується максимальне число пакетів 3–5)

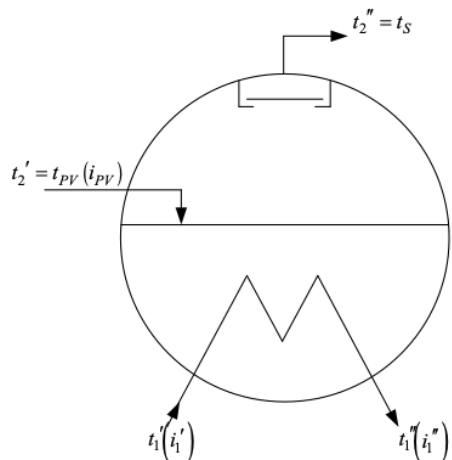


Рис. 3 – Принципова теплова схема горизонтального парогенератора ПГВ-1000

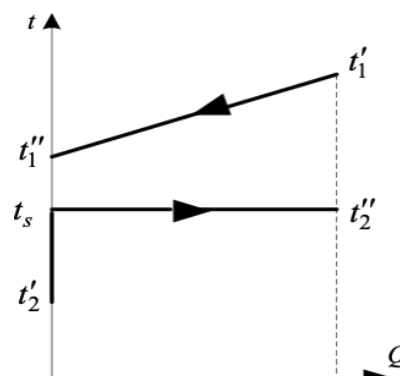


Рис. 4 – $t-Q$ діаграма горизонтального парогенератора ПГВ-1000

Пара відводиться через сім пар розташованих в шаховому порядку паровідвідних патрубків. Для забезпечення необхідної чистоти пари передбачено періодичне і безперервне продування і дренаж, здійснювані через штуцера, розміщені уздовж нижньої утворюючої корпусу.

Реактори ВВЕР не допускають скипання теплоносія в активній зоні, тому температура теплоносія на виході з реактора (на вході в парогенератор) завжди нижче за температуру насичення, відповідну тиску води в контурі теплоносія. Недогрів теплоносія до температури насичення (складає приблизно 25 °С–30 °С) гарантує виключення паротворення навіть в найбільш навантажених каналах реактора. Температурний рівень охолодження реакторів типу ВВЕР невисокий. Діючі реактори мають температуру теплоносія на виході з реактора не вище 325 °С, тому для отримання вищих параметрів пари, що генерується, робота парогенератора здійснюється при малих температурних напорах. Мінімальний температурний напір має місце на виході теплоносія з випарника парогенератора. Його величина складає 10 °С–20 °С. При таких температурних напорах розрахункова величина поверхні теплообміну виявляється достатньо великою. Тому на реактор типу ВВЕР-1000 встановлено чотири парогенератори (чотири циркуляційні петлі), що дозволяє при виході з ладу

устаткування однієї з петель не зупиняти реактор, а лише знижувати його потужність.

Оскільки тиск теплоносія істотно вищий за тиск робочого тіла, вода першого контура прямує по трубній системі в поверхні теплообміну парогенератора, а робоча речовина – у міжтрубний простір. Циркуляція робочої речовини (котельної води) у міжтрубному просторі – природна з попереочним обмиванням труб. Живильна вода подається в опускку ділянку контура природної циркуляції, де змішується з водою, що має температуру насичення, поступає знизу на поверхню, що передає тепло, нагрівається і кипить. Суміш пари з рідиною поступає до сепаратора, де відбувається відділення сухої насиченої пари.

Теплотехнічна схема парогенератора без пароперегрівника і виділеного в окрему ділянку економайзера, та його $t-Q$ діаграма приведені на рис. 3, 4. Живильна вода з температурою t_2' подається в корпус парогенератора, де змішується з котельною водою, поступає вниз випарника і кипить на зовнішній поверхні труб. Підігрів живильної води до $t_2'' = t_s$ (температури насичення робочого тіла) здійснюється у випарнику за рахунок конденсації деякої кількості пари.

Математична модель парогенератора включає такі основні залежності [5–6]:

а) рівняння теплового балансу парогенератора:

$$\begin{cases} Q_{PG} = (D + D_{SN} + D_{PR})(i'_S - i_{PV}) + (D + D_{SN})r, \\ G(i'_1 - i''_1)\eta_{PG} = (D + D_{SN} + D_{PR})(i'_S - i_{PV}) + (D + D_{SN})r, \end{cases} \quad (1)$$

$$Q = kF\Delta t_{sr}, \quad (4)$$

де Q_{PG} – кількість тепла, переданого від теплоносія робочому тілу в ПГ;

G – масова витрата теплоносія;

t_1' і t_1'' – ентальпії теплоносія на вході в ПГ і виході з нього;

η_{PG} – ККД ПГ;

D – паропроодуктивність ПГ;

$D_{PR} = (0,005-0,01)D$ – витрата води на продування ПГ;

$D_{SN} = (0,015-0,03)D$ – витрата пари на власні потреби;

i_{PV} – ентальпія живильної води;

i'_S – ентальпія води при температурі насичення;

r – прихована теплота паротворення.

б) рівняння матеріального балансу робочої речовини:

$$D_{PV} = D_{PR} + D_{SN} + D = D_{PR} + D_{ISP}, \quad (2)$$

де D_{PV} , D_{ISP} – витрати: живильної води, робочої речовини через випарну зону;

в) рівняння матеріального балансу для теплоносія:

$$G_R = 4G, \quad (3)$$

де G_R – витрата теплоносія через реактор;

г) рівняння теплопередачі:

де k – коефіцієнт теплопередачі;

F – площа теплопередачі;

Δt_{sr} – середній температурний напір між теплоносієм і робочою речовиною

Висновки

Конструктивні характеристики сучасних горизонтальних парогенераторів типу ПГВ-1000 різних модифікацій забезпечують високі техніко-економічні показники роботи енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000 та високу ремонтно-пригодність, що дозволяє продовжувати терміни експлуатації вітчизняних АЕС.

Список літератури

1. Кириллов П. Л. Ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы: справочник по теплогидравлическим расчетам / П. Л. Кириллов, Ю. С. Юрьев, В. П. Бобков. – Москва: Энергоатомиздат, 1984. – 296 с.
2. Ганчев Б. Г. Ядерные энергетические установки / Б. Г. Ганчев, Л. Л. Калишевский, Р. С. Демешев. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 629 с.
3. Тепловые и атомные электрические станции: справ. / Под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.

4. Рассохин Н. Г. Парогенераторы, сепараторы и пароприемные устройства АЭС / Н. Г. Рассохин, В. Н. Мельников. – Москва: Энергоатомиздат, 1985. – 80 с.
5. Єфімов О. В. Конструкції, матеріали, процеси і розрах О. В. Єфімов, М. М. Пилипенко. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – 268 с. – ISBN 978-966-2426-00-7.
6. Реактори і парогенератори енергоблоків АЕС: схеми, процеси, матеріали, конструкції, моделі : монографія / О. В. Єфімов, М. М. Пилипенко, Т. В. Потаніна, В. Л. Каверцев, Т. А. Гаркуша ; ред. О. В. Єфімов ; Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків: ТОВ «В справі», 2017. – 420 с. – ISBN 978-617-7305-28-5.
3. Grigorieva V. A. (Ed.), Zorina V. M. (Ed.) (1989), *Тепловые и атомные электрические станции* [Thermal and nuclear power plants], Energoatomizdat, Moscow, 608 p.
4. Rassokhin N. G., Melnikov V. N. (1985), *Parogenerator, separator i paropriemnye ustrojstva AJeS* [Steam generators, separators and steam receiving devices of NPPs], Energoatomizdat, Moscow, 80 p.
5. Yefimov O. V., Pylypenko M. M. (2015), *Konstrukcii, materialy, procesy i rozrahunky reaktoriv i parogeneratoriv AES* [Designs, materials, processes and calculations of reactors and steam generators of nuclear power plants], NTU “KhPI”, Kharkiv, 268 p., ISBN 978-966-2426-00-7.
6. Yefimov O. V. Pylypenko M. M., Potanina T. V., Kavertsev V. L., Harkusha T. A. (2017), *Reaktory i parogeneratorny energoblokov AES: shemy, procesy, materialy, konstrukcii, modeli* [Reactors and steam generators of NPP power units: schemes, processes, materials, structures, models], LLC “In the case”, Kharkiv, 420 p., ISBN 978-617-7305-28-5.

References (transliterated)

1. Kirillov P. L., Yuriev Yu. S., Bobkov V. P. (1984), *Jadernye reaktory, teploobmenniki, parogeneratory: spravochnik po termodinamicheskim raschetam* [Nuclear reactors, heat exchangers, steam generators: a guide to thermohydraulics], Energoatomizdat, Moscow, 296 p.
2. Ganchev B. G., Kalishevsky L. L., Demeshev R. S. (1990), *Jadernye jenergeticheskie ustanovki* [Nuclear power plants], Energoatomizdat, Moscow, 629 p.

Надійшла (received) 08.04.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Єфімов Олександр Вячеславович (Yefimov Olexander) – доктор технічних наук, професор; завідувач кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: AVEfimov22@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3300-7447>.

Тютюнник Лариса Іванівна (Tutiunyk Larysa) – кандидат технічних наук, доцент; доцент кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: lara.tyutyunik@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3128-497X>.

Гаркуша Тетяна Анатоліївна (Harkusha Tetyana) – науковий співробітник кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: Tetyana.Harkusha@khpri.edu.ua.

Єсипенко Тетяна Олексіївна (Yesipenko Tetyana) – науковий співробітник кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: yestat@hmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6513-2088>.

Мотовільник Анастасія Вадимівна (Motovilnik Anastasiia) – аспірантка, кафедра парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: Nastya.motov@gmail.com.