

О. В. ЄФІМОВ, В. Л. КАВЕРЦЕВ, П. В. ЛІФШИЦЬ

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ НА МІЦНІСТЬ КРИШОК, ДНИЩ, ВУЗЛІВ ТА ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ ПАРОГЕНЕРАТОРІВ ДВОКОНТУРНИХ АЕС З РЕАКТОРАМИ ВВЕР-1000

Метою даної статті є представлення послідовності виконання розрахунку на міцність кришок, днищ, вузлів та елементів конструкції парогенераторів двоконтурних АЕС з реакторами ВВЕР-1000. Проведення стислого аналізу існуючих видів розрахунків вузлів та елементів конструкції парогенераторів АЕС на міцність і надійність Проаналізовано залежність вибору методу розрахунку на міцність від характеру зовнішніх навантажень на елементи та вузли парогенераторів та деформаційну здатність їх конструкційних матеріалів.

Ключові слова: парогенератор, надлишковий тиск, товщина стінки, кришки, днища, вузли, елементи, трубопроводи

O. EFIMOV, V. KAVERTSEV, P. LIFSHYTS

METHODS OF THE STRENGTH COMPUTATION FOR THE COVERS, BOTTOMS, ASSEMBLIES AND ELEMENTS OF THE STRUCTURE OF STEAM GENERATORS USED BY THE TWO-LOOP NUCLEAR POWER PLANTS WITH ВВЕР-1000 REACTORS

This scientific paper gives a review of the available methods and approaches used for the strength computation of the covers, bottoms, assemblies and elements of the structures of steam generators of the two-loop NPPs with ВВЕР-1000 reactors. For most assemblies and elements of the structures of steam generators of NPPs, the main strains arising in them are the consequences of the uniform internal and external pressures. However, in many cases the assemblies and elements of the structures of steam generators of NPPs can also be exposed to additional loads (weight loads, efforts and moments that result from nonhomogeneous thermal expansion of different parts of steam generator, etc.). The values of the strains caused by additional loads can sometimes exceed the value of the main strain. These can be decreased by the arrangement of additional supports or compensators or by changing the structure configuration. Sometimes, it is reasonable to increase the wall thickness of the calculated elements of the structures in order to reduce the strains caused by additional loads. Before getting to the strength computations for the assemblies and elements of the structures of steam generators we need to define first the character of the external loads on them (constant or cyclic load) and the deformability of their structural materials (ductile material, brittle material or limited plasticity material) and then to select the method for their strength computation. To provide a reliable operation of the steam generators of NPPs it is important to provide appropriate strength characteristics for all its assemblies and elements. These elements include process pipelines that are connected to the steam generator structure. These represent a spatially branched pipeline systems of a different technological purpose whose structures are supported by special fastening elements (the supports of different types, spring suspenders, etc.). The strength computations done for such systems include static and cyclic strength computations, seismic action computations, etc.

Key words: steam generator, excess pressure, wall thickness, cover, bottom, assemblies, elements and the pipelines.

Вступ

З метою забезпечення надійної і безпечної експлуатації парогенераторів АЕС їх конструкції повинні тривалий час витримувати напруги, що виникають в окремих вузлах і елементах в результаті тиску потоків теплоносіїв і робочих речовин та їх мас, а також напруги, що виникають в результаті термічних деформацій матеріалів вузлів і елементів. При проектуванні парогенераторів АЕС спочатку вибираються конструкційні матеріали, а потім, на основі розрахунків на міцність різних видів, визначаються форми і розміри вузлів і елементів, які забезпечують надійну і безпечну експлуатацію парогенераторів.

Мета роботи

Метою даної статті є проведення аналізу існуючих методів та підходів щодо послідовності виконання розрахунку на міцність кришок, днищ, вузлів та елементів конструкції парогенераторів двоконтурних АЕС з реакторами ВВЕР-1000. Визначення напрямків щодо вибору методу розрахунку на міцність елементів конструкції парогенератора в залежності від характеру навантажень.

Викладення основного матеріалу

Відомо, що більшість вузлів і елементів конструкції парогенераторів АЕС в процесі експлуатації знаходяться, як правило, під дією постійних зовнішніх навантажень на них і виготовляються з пластичних матеріалів. Кількість змін температурних режимів експлуатації за термін служби парогенераторів, визначувана, в основному, кількістю пусків і зупинок енергоблоків АЕС, відносно невелика. Це дозволяє для більшості вузлів і елементів конструкції парогенераторів АЕС об'єктивніше оцінювати їх характеристики міцності за допомогою методу розрахунку на міцність за граничними навантаженнями, що, у свою чергу, сприяє зменшенню витрати конструкційних матеріалів на їх виготовлення. Однак метод розрахунку на міцність за граничними навантаженнями не можна застосовувати для тих вузлів і елементів конструкції парогенераторів АЕС, зовнішнє навантаження на яких носить циклічний характер, а також для розрахунку на міцність вузлів і елементів, виготовлених з крихких матеріалів, руйнування яких настає без помітної пластичної деформації. Такі вузли і елементи конструкції парогенераторів АЕС розраховуються на міцність за методом граничних напруг. В цьому випадку, якщо для

© О. В. Єфімов, В. Л. Каверцев, П. В. Ліфшиць, 2022

вузлів або елементів конструкцій парогенераторів небезпечні втрата їх стійкості або сильне спотворення їх форми, за граничну величину напруги, за якою вибирається допустима напруга, приймається межа текучості; якщо для них небезпечно тільки руйнування, то за граничну величину напруги береться межа міцності [1]–[4].

На даний час існують такі основні види розрахунків вузлів і елементів конструкцій парогенераторів АЕС на міцність і надійність:

- розрахунок на міцність вузлів і елементів конструкцій з метою визначення граничних (максимальних) напруг або навантажень і порівняння їх з тими, що допускаються;

- розрахунок на стійкість вузлів і елементів конструкцій під дією стискуючих навантажень;

- розрахунок на жорсткість і компенсуючу здатність вузлів і елементів конструкцій з метою визначення максимальних деформацій в деталях, порівняння їх з тими, що допускаються, і вибору необхідних компенсаційних пристроїв;

- розрахунок термічної напруги і деформацій у вузлах і елементах з метою оцінки їх впливу на надійність і працездатність конструкцій;

- розрахунок на вібрацію трубних систем поверхонь теплообміну з метою визначення максимальних амплітуд коливань трубок і їх впливу на вібраційні характеристики трубок (власні частоти коливань) і на надійність конструкцій поверхонь теплообміну в цілому.

Розрахунки на міцність вузлів і елементів конструкцій парогенераторів АЕС в процесі проектування підрозділяються на прямі (конструктивні) і перевірочні [3]. При прямих розрахунках визначається товщина стінок вузлів і елементів конструкцій, висота їх фланців та інші так звані міцні розміри. Перевірочні розрахунки проводяться для визначення значень робочих навантажень, що допускаються, приведеної напруги або ж деформацій конструкцій, основні конструктивні розміри яких вже задані.

Для більшості вузлів і елементів конструкцій парогенераторів АЕС основні напруги, що виникають в них, є наслідком рівномірного внутрішнього або зовнішнього тиску. Проте у ряді випадків, вузли і елементи конструкцій парогенераторів АЕС можуть зазнавати ще і дії додаткових навантажень (вагові навантаження, зусилля і моменти, що виникають через неоднакове теплове розширення різних частин парогенератора, та інші). Напруги, викликані додатковими навантаженнями, можуть іноді перевищувати за величиною основну напругу. Їх можна знизити установкою додаткових опор чи то компенсаторів або зміною конфігурацій конструкцій. Іноді для зниження напруги від додаткових навантажень доцільно збільшувати товщину стінок елементів конструкцій, що розраховуються.

Перш ніж приступати до розрахунку на міцність вузлів і елементів конструкцій парогенераторів АЕС, необхідно спочатку визначити характер зовнішніх навантажень на них (постійне або циклічне навантаження) і деформаційну здатність їх конструкційних матеріалів (пластичний матеріал, крихкий матеріал або з обмеженою пластичністю), а потім вибрати метод їх розрахунку на міцність.

Існують два методи розрахунку на міцність: за граничними (максимальними) напругами і за граничними (максимальними) навантаженнями. З розрахунку на міцність за граничними напругами межею несучої здатності вузлів і елементів конструкцій є досягнення будь-яким перерізом якої-небудь їх деталі межі текучості, тобто початку пластичної деформації. У розрахунку за граничними навантаженнями за небезпечно береться напруга, що викликає загальну пластичну деформацію всього навантаженого вузла або елемента конструкції. Величина максимально допустимої сили при розрахунку за граничними навантаженнями завжди більша від такої при розрахунку за граничними напругами.

Більшість вузлів і елементів конструкцій парогенераторів АЕС в процесі експлуатації знаходяться, як правило, під дією постійних зовнішніх навантажень на них і виготовляються з пластичних матеріалів. Кількість змін температурних режимів експлуатації за термін служби парогенераторів, визначувана, в основному, кількістю пусків і зупинок енергоблоків АЕС, відносно невелика. Це дозволяє для більшості вузлів і елементів конструкцій парогенераторів АЕС об'єктивніше оцінювати їх міцнісні характеристики за допомогою методу розрахунку на міцність за граничними навантаженнями, що, у свою чергу, сприяє зменшенню витрати конструкційних матеріалів на їх виготовлення [1]–[4].

Проте метод розрахунку на міцність за граничними навантаженнями не можна застосовувати для тих вузлів і елементів конструкцій парогенераторів АЕС, зовнішнє навантаження на яких носить циклічний характер, а також для розрахунку на міцність вузлів і елементів, виготовлених з крихких матеріалів, руйнування яких настає без помітної пластичної деформації. Такі вузли і елементи конструкцій парогенераторів АЕС розраховуються на міцність за методом граничних напруг. В цьому випадку, якщо для вузлів або елементів конструкцій парогенераторів небезпечні втрата їх стійкості або сильне спотворення їх форми, за граничну величину напруги, за якою вибирається допустима напруга, приймається межа текучості; якщо для них небезпечно тільки руйнування, то за граничну величину напруги береться межа міцності.

Розрахунок на міцність вузлів і елементів конструкцій парогенераторів АЕС виконується в такій послідовності.

1 Уточнюються конструктивні розміри і форми вузлів і елементів конструкцій парогенераторів, що підлягають розрахунку на міцність.

2 На підставі теплового і гідравлічного розрахунків вузлів і елементів конструкцій парогенераторів визначається вид, характер і величини основного і додаткового навантажень, а також значення робочих температур.

3 Відповідно до умов роботи вузлів і елементів конструкцій парогенераторів, що розраховуються, вибираються конструкційні матеріали на основі аналізу їх характеристик: міцнісних і корозійних властивостей, термоміцності (жароміцності) та інших.

4 Складаються схеми розрахунків для вузлів і елементів конструкцій парогенераторів, що розраховуються, з урахуванням діючих навантажень, температур і тисків робочих речовин.

5 Для вибраних конструкційних матеріалів вузлів і елементів конструкцій парогенераторів визначаються значення їх фізичних і пружних постійних, міцнісних характеристик і інших, необхідних для розрахунків величин.

6 Визначаються основні допустимі напруги, виходячи з властивостей вибраних конструкційних матеріалів і умов роботи вузлів і елементів конструкцій парогенераторів, що розраховуються.

7 Визначаються значення коефіцієнтів міцності зварних швів вузлів і елементів парогенераторів, що розраховуються, залежно від конструкцій з'єднання їх деталей і способів зварювання.

8 Вибирається метод розрахунку на міцність вузлів і елементів конструкцій парогенераторів залежно від властивостей їх матеріалів і характеру зовнішніх навантажень на них.

9 Визначаються розрахункові значення міцних розмірів деталей вузлів і елементів конструкцій парогенераторів.

10 Визначаються різні коефіцієнти запасу міцності і поправки до розрахункових значень міцних розмірів деталей вузлів і елементів конструкцій парогенераторів (наприклад, величина надбавки на корозію матеріалу, величина допуску на виготовлення та інші) і обчислюються дійсні міцні розміри деталей вузлів і елементів.

11 У разі потреби обчислюється максимально допустиме значення пробного гідравлічного тиску.

12 Округляються (у більшу сторону) дійсні міцні розміри деталей вузлів і елементів конструкцій парогенераторів до стандартних величин, прийнятих в технології їх виготовлення.

13 Визначаються величина і характер додаткових зовнішніх навантажень на вузли і елементи конструкцій парогенераторів і обчислюються додаткові напруги. При необхідності рекомендуються конструктивні заходи, що знижують цю напругу до допустимих значень.

Допустимі значення напруги при розрахунку на міцність вузлів і елементів конструкцій парогенераторів визначаються за формулою

$$\sigma_{\text{доп}} = \eta \sigma_{\text{доп}}^*, \quad (1)$$

де $\sigma_{\text{доп}}^*$ – номінальна допустима напруга для даного конструкційного матеріалу, МПа;

η – поправковий коефіцієнт для забезпечення запасу міцності, що враховує конструктивні особливості і умови експлуатації вузлів і елементів конструкцій парогенераторів, що розраховуються, і застосований метод розрахунку на міцність.

Номінальна допустима напруга для конструкційних матеріалів $\sigma_{\text{доп}}^*$ залежно від їх розрахункової температури визначається як найменше значення з таких величин:

$$\sigma_{\text{доп}}^* \leq \frac{\sigma_{\text{T}}^f}{n_{\text{T}}}; \quad \sigma_{\text{доп}}^* \leq \frac{\sigma_{\text{B}}^f}{n_{\text{B}}}; \quad \sigma_{\text{доп}}^* \leq \frac{\sigma_{\text{T.M}}^f}{n_{\text{T.M}}}, \quad (2)$$

де σ_{T}^f – умовна межа текучості при розтягуванні при розрахунковій температурі, МПа;

σ_{B}^f – межа міцності при розтягуванні при розрахунковій температурі, МПа;

$\sigma_{\text{T.M}}^f$ – умовна межа тривалої міцності при розтягуванні при розрахунковій температурі, МПа;

n_{T} , n_{B} , $n_{\text{T.M}}$ – відповідно коефіцієнти запасу міцності щодо межі текучості, межі міцності і межі тривалої міцності. Межа тривалої міцності для вуглецевих сталей враховується при їх розрахунковій температурі, що дорівнює або вище 420 °С; для низьколегованих сталей – при їх розрахунковій температурі, що дорівнює або вище 470 °С; для аустенітних нержавіючих сталей – при їх розрахунковій температурі, що дорівнює або вище 550 °С [1], [4], [5].

Для додаткового контролю (особливо при використанні нових конструкційних матеріалів при високих температурах) необхідно зіставляти отримане із співвідношень (2) значення $\sigma_{\text{доп}}^*$ з умовною межею повзучості матеріалу, виходячи з умови

$$\sigma_{\text{доп}}^* \leq \sigma_{\text{п}}. \quad (3)$$

Вибір коефіцієнтів запасу міцності n_{T} , n_{B} , $n_{\text{T.M}}$ визначається багатьма чинниками, зокрема, ступенем відповідальності і призначенням вузлів і елементів конструкцій парогенераторів, умовами їх роботи, терміном служби і іншими. У більшості випадків коефіцієнти запасу міцності знаходяться в таких діапазонах: $n_{\text{T}} = 1,5-1,65$; $n_{\text{B}} = 2,6-3,0$; $n_{\text{T.M}} = 1,5-2,0$.

Форми кришок і днищ вузлів і елементів парогенераторів АЕС у вигляді посудин, що знаходяться під дією внутрішнього надлишкового тиску P , бувають різними: еліптичними, сферичними, коробчастими, конічними, плоскими (рис. 1). Найпоширенішими з них є еліптичні днища (рис. 1а), з яких найміцнішими є ті, форми перерізу яких утворюються половиною еліпса з великою віссю, що

дорівнює діаметру корпусу посудини $D = 2R$, і з малою віссю, що дорівнює $2h$, де h – висота опуклої частини днища [1], [4], [5].

Сферичні днища (рис. 1б) мають найменшу розрахункову товщину за інших рівних умов. Такі днища найчастіше виготовляються шляхом зварювання штампованих сферичних сегментів і секторів, оскільки вони важко штампуються цілком.

Номинальна товщина δ опуклих глухих днищ або днищ, що мають неукріплені отвори еліптичної і сферичної форм для посудин, що знаходяться під дією внутрішнього надлишкового тиску P , визначаються за формулою

$$\delta \geq \frac{P_p d_{\text{вн}}}{400 Z \sigma_{\text{доп}}^* - P_p} \frac{d_{\text{вн}}}{2h} + C, \quad (4)$$

де $P_p = 1,125P$;

$h \geq 0,2d_{\text{вн}}$ – висота опуклої частини днища.

У формулі (4) коефіцієнт Z набуває значень або розраховується за формулами (5)–(7).

Для глухих днищ і днищ з повністю укріпленними отворами $Z = 1$.

Для днищ з неукріпленими отворами, що мають максимальний діаметр d :

$$Z = 1 \text{ при } \frac{d}{\sqrt{d_{\text{вн}}(\delta - C)}} < 0,4; \quad (5)$$

$$Z = \frac{2}{1,25 \frac{d}{\sqrt{d_{\text{вн}}(\delta - C)}} + 1,5} \text{ при } 0,4 \leq \frac{d}{\sqrt{d_{\text{вн}}(\delta - C)}} \leq 2; \quad (6)$$

$$Z = \frac{2}{\frac{d}{\sqrt{d_{\text{вн}}(\delta - C)}} + 2} \text{ при } \frac{d}{\sqrt{d_{\text{вн}}(\delta - C)}} > 2. \quad (7)$$

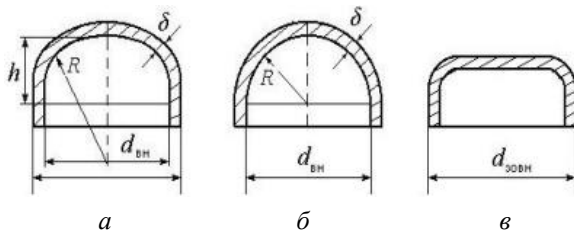


Рис.1 – Форми кришок і днищ вузлів і елементів парогенераторів АЕС:
а – еліптична; б – сферична; в – коробчаста

Для отворів овальної форми як d приймається розмір їх найбільшої осі.

При $h > 0,3d_{\text{вн}}$ напруги в днищах менші, ніж в циліндричній частині посудин, що знаходяться

під дією внутрішнього надлишкового тиску. Тому саме в днищах часто проєктуються люки і лази. Днища з укріпленними отворами розраховуються як глухі. Відштамповані борти отворів для лазу укріпленнями не вважаються. За наявності в днищах двох і більше отворів відстань між цими отворами має бути не менша від величини діаметра меншого отвору. Допустимі напруги $\sigma_{\text{доп}}^*$ для литих сталевих опуклих днищ еліптичної форми, номинальна товщина яких розраховується за формулою (4), вибираються в 1,4 разу меншими, ніж для штампованих днищ [1], [4], [5].

Найбільші допустимі (граничні) діаметри неукріплених отворів в опуклих днищах $d_{\text{гран}}$ визначаються за такими формулами:

$$\left. \begin{aligned} d_{\text{гран}} &= 0,4\sqrt{d_{\text{вн}}(\delta - C)} \text{ при } Z_0 = 1; \\ d_{\text{гран}} &= 1,2\left(\frac{4}{3Z_0} - 1\right)\sqrt{d_{\text{вн}}(\delta - C)} \text{ при } 0,5 \leq Z_0 < 1,0; \\ d_{\text{гран}} &= 2\left(\frac{1}{Z_0} - 1\right)\sqrt{d_{\text{вн}}(\delta - C)} \text{ при } Z_0 < 0,5. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Коефіцієнт Z_0 , що входить у формули (8), визначається як

$$Z_0 = \frac{P_p \left[d_{\text{вн}} + \frac{2h}{d_{\text{вн}}}(\delta - C) \right]}{400 \frac{2h}{d_{\text{вн}}}(\delta - C) \sigma_{\text{доп}}^*}. \quad (9)$$

Розрахунок товщини плоских приварних днищ δ_1 (рис. 2) без центрального отвору або з

отвором розміром $d \leq 0,6d_{\text{вн}}$ виконується за формулою

$$\delta_1 = \frac{0,93\delta}{1 - 0,43 \frac{d}{d_{\text{вн}}}} \sqrt{\frac{0,19P_p}{\sigma_{\text{доп}}^* 100} \left(\frac{d_{\text{вн}}}{\delta} \right)^2} - 1 + C, \quad (10)$$

де δ – товщина стінки корпусу посудини, мм;
 d – діаметр отвору в днищі, мм; решта позначень ті ж, що і для еліптичних днищ.

Товщину плоских днищ, конструкції яких показані на рис. 2 і рис. 3, також можна приблизно розрахувати за формулою

$$\delta = D \sqrt{\frac{KP_p}{100\sigma_{\text{доп}}}} + C, \quad (11)$$

де D – розрахунковий діаметр днища, мм;
 K – коефіцієнт, що характеризує конструкцію днища.

Значення коефіцієнта K приймаються такими:

– для плоских приварних днищ і днищ, що прикріплюються до корпусу посудини по різі, він дорівнює 0,75 (рис. 2а);

– для плоских зварюваних днищ – 0,5 (рис. 2б);

– для днищ, що прикріплюються до корпусу посудини болтами при суцільній прокладці, – 0,16 (рис. 3а);

– для плоских штампованих приварних днищ з відбортовкою з радіусом кривизни між стінкою і площиною не менше трьох товщин днища – 0,25 (рис. 3б);

– для днищ-заглушок, жорстко затиснутих між двома фланцями, – 0,19 (рис. 3г).

Як уже зазначалося, важливим для забезпечення надійної роботи парогенераторів АЕС є забезпечення необхідних характеристик міцності всіх його вузлів і елементів. У тому числі й елементів, що знаходяться «за межами» конструкції парогенератора. До таких елементів належать технологічні трубопроводи, які приєднуються до конструкції парогенератора. Вони являють собою просторово розгалужені трубопровідні системи з різним технологічним призначенням, конструкції яких підтримуються спеціальними елементами кріплення (опори різних типів, пружинні підвіски та інші.). Розрахунки на міцність таких систем включають: розрахунки на статичну та циклічну міцність; розрахунки на сейсмічні дії тощо [4]–[6].

Як і для всіх елементів і конструкцій парогенератора, в розрахунки на міцність трубопроводів закладаються номінальні параметри та номінальні товщини стінок труб і фасонних елементів з урахуванням їх терміну експлуатації.

В результаті проведення розрахунку на міцність трубопроводів повинні бути забезпечені надійність конфігурації технологічних трубопроводів та їх опорно-підвісної системи при виконанні низки умов: загальна кількість циклів навантаження трубопроводів повинна відповідати розрахунковими параметрами за проектний термін експлуатації; механічні характеристики матеріалів та витончення прямих труб та деталей повинні бути в межах допустимих значень, які були закладені у розрахунок.

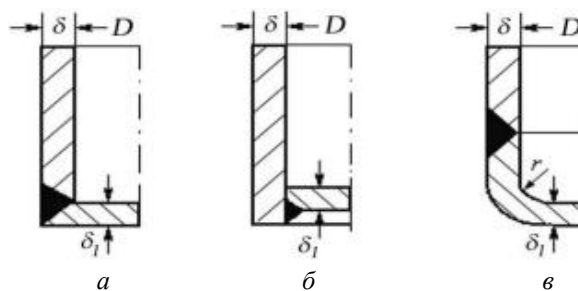


Рис. 2 – Способи приварювання плоских кришок і днищ до корпусів посудин і значення коефіцієнта K для них:

$a - K = 0,75$; $б - K = 0,5$;

$в - r = 2,53$, $\delta \leq \delta_1$, $K = 0,85$

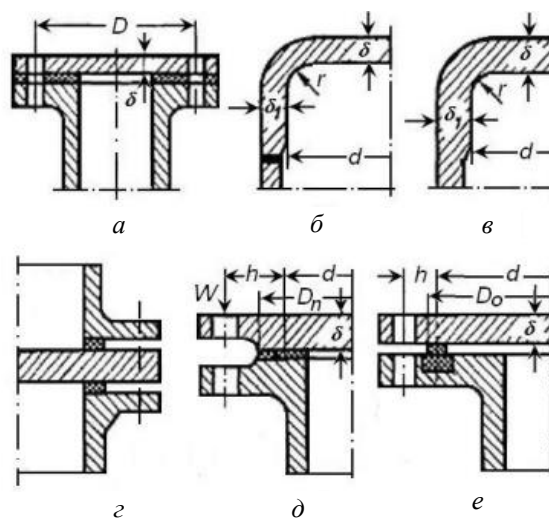


Рис. 3 – Способи з'єднання плоских днищ з корпусом посудини: a – на болтах при суцільній прокладці; $б$ – приварне; $в$ – виконане разом з обичайкою; $г$ – днище-заглушка, затиснуте між фланцями; $д$ – на болтах з прокладкою до болтів e – на болтах з жорсткою прокладкою

Крім того, в обов'язковому порядку повинні бути враховані концентрації напруги в сполучних з парогенератором зварних швах. Трубопровідні системи повинні задовольняти умови статичної міцності при розстановці та типі опор, які вказуються в проєкті на їх аксонометричних схемах та виконаному трасуванні трубопроводів. При цьому необхідно враховувати такі параметри: внутрішній тиск у трубопроводі; загальна робоча маса; додаткові навантаження (ізоляція тощо); зусилля від реакцій опор та трубопроводів; температурні впливи.

Висновки

Для забезпечення надійної і безпечної експлуатації парогенераторів АЕС в процесі їх проєктування необхідно проводити розрахунки на міцність вузлів та елементів їх конструкції.

Для виконання розрахунку на міцність вузлів і елементів конструкцій парогенераторів АЕС, необхідно спочатку визначити характер зовнішніх навантажень на них і деформаційну здатність їх конструкційних матеріалів.

Для більшості вузлів і елементів конструкцій парогенераторів АЕС об'єктивніше оцінювати їх міцнісні характеристики за допомогою методу розрахунку на міцність за граничними навантаженнями, що, у свою чергу, сприяє зменшенню витрати конструкційних матеріалів на їх виготовлення.

Метод розрахунку на міцність за граничними навантаженнями не можна застосовувати для тих вузлів і елементів конструкцій парогенераторів АЕС, зовнішнє навантаження на яких носить циклічний характер.

Форми кришок і днищ вузлів і елементів парогенераторів АЕС у вигляді посудин, що знаходяться під дією внутрішнього надлишкового тиску бувають різними. Але, найпоширенішими з умов міцності є еліптичні днища.

За вдяки вибору оптимальних співвідношень геометричних характеристик, напруги в днищах менші, ніж в циліндричній частині посудин, що знаходяться під дією внутрішнього надлишкового тиску. Тому саме в днищах часто проектується люки і лази.

Днища з укріпленими отворами розраховуються як глухі. Відштамповані борти отворів для лазу укріпленнями не вважаються. За наявності в днищах двох і більше отворів відстань між цими отворами має бути не менша від величини діаметра меншого отвору.

В результаті проведення розрахунку на міцність трубопроводів, які з'єднуються з парогенератором, повинні бути забезпечена надійність конфігурації технологічних трубопроводів та їх опорно-підвісної системи.

Як і для всіх елементів і конструкцій парогенератора, в розрахунку на міцність трубопроводів закладаються номінальні параметри та номінальні товщини стінок труб і фасонних елементів з урахуванням їх терміну експлуатації.

Список літератури

1. Єфімов О. В. Конструкції, матеріали, процеси і розрахунки реакторів і парогенераторів АЕС / О. В. Єфімов, М. М. Пилипенко. – Харків : НТУ «ХП», – 2009. – 307 с.

2. Верхівкер Г. П. Основи розрахунку та конструювання ядерних енергетичних реакторів / Г. П. Верхівкер, В. П. Кравченко. – Одеса: ТЕС. – 2009. – 409 с.
3. Єфімов О. В. 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. – Харків : В справі, 2017. 420 с.
4. Yefimov O. Materials and decision support systems in the nuclear power industry : monography / O. Yefimov, M. Pylypenko, T. Potanina, V. Kavertsev, T. Yesypenko, T. Harkusha, T. Berkutova. – Riga: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2020. – 144 p. – ISBN 978-6200570673.
5. Пилипенко М. М. Рафінування тугоплавких рідкісних металів IV групи періодичної системи елементів / М. М. Пилипенко // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія: фізична «Ядра, частинки, поля». – 2009. – № 859. – Вип. 2. – С. 44–50. – ISSN 2221-7754 (print).
6. Колобов Г. О. Рафинирование тугоплавких редких металлов IV группы периодической системы элементов / Г. О. Колобов, В. В. Павлов, А. В. Карпенко, О. Г. Колобова // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2015. – № 1. – С. 89–95. – ISSN 1607-6885.

References (transliterated)

1. Yefimov O. V., Pilipenko M. M. (2009), *Konstrukcii', materialy, procesy i rozrahunky reaktoriv i parogeneratoriv AES* [Structures, Materials, Processes and Computations for the NPP Reactors and Steam Generators], NTU “KhPP”, Kharkov, 307 p.
2. Verhivker G. P., Kravchenko V. P. (2009), *Osnovy rozrahunku ta konstruiuvannja jadernykh energetychnykh reaktoriv* [Basics of the Computation and Design of Nuclear Power Reactors], TES, Odessa, 109 p.
3. Yefimov O. V., Pilipenko M. M., Potanina T. V., Kavertsev V. L., Garkusha T. A. (2017), *Reaktory i parogeneratory energoblokov AES: shemy, procesy, materialy, konstrukcii', modeli : monografija* [Reactors and steam generators of NPP power units: schemes, processes, materials, constructions, models], LLC “In the case”, Kharkov, 420 p.
4. Yefimov O., Pylypenko M., Potanina T., Kavertsev V., Yesypenko T., Harkusha T., Berkutova T. (2020), *Materials and decision support systems in the nuclear power industry : monography*, LAP LAMBERT Academic Publishing, Riga, 144 p., ISBN 978-6200570673.
5. Pilipenko N. N. (2009), “Konstrukcionnye materialy dlja jelementov oborudovaniya jadero-jenergeticheskikh ustanovok [Construction Materials for the Elements of Equipment of Nuclear-Power Plants]”, *The Journal of Kharkiv National University. Physical series: Nuclei, Particles, Fields*, No. 859, Iss. 2, pp. 44–50, ISSN 2221-7754 (print).
6. Kolobov G., Pavlov V., Karpenko A., Kolobova A. (2015), “Rafinirovanie tugoplavkikh redkikh metallov IV gruppy periodicheskoy sistemy jelementov [Refining refractory rare metals of group IV of the periodic table]”, *Innovative Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*, No 1, pp. 89–95, ISSN 1607-6885.

Надійшла (received) 12.12.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Єфімов Олександр Вячеславович (Efimov 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>.

Каверцев Валерій Леонідович (Kavertsev Valerii) – кандидат технічних наук, доцент кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: kaverseff@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9472-1658>.

Ліфшиць Петро Володимирович (Lifshyts Petro) – аспірант кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: lifshyts.p@gmail.com.