**УДК** 621.181.6

**МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ТЕПЛОВОГО РОЗРАХУНКУ ПРЯМОТОЧНОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА ДЛЯ аес МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ**

**В.П. Кравченко, Сяолун Чжоу**

***Одеський національний політехнічний університет, Одеса, Україна***

***E-mail:*** [***kravchenko@opu.ua***](mailto:kravchenko@opu.ua)***, тел. 050-390-17-92;***

У зв’язку з великим інтересом у всьому світі до АЕС малої потужності запропоновано приділяти достатню увагу проектуванню відповідного устаткування, що може зробити Україну з її великим потенціалом виробника постачальником таких АЕС. В роботі розглянуто методику теплового розрахунку прямоточного парогенератора зі змієвиковою поверхнею нагріву та перегрівом пара. В результаті аналізу та співставлення результатів було вибрано формули для розрахунку шести різних умов теплообміну: поперекового обтікання пакету змієвиків теплоносієм та п’яти ділянок теплообміну при русі робочого тіла в трубці. Наведено результати розрахунку поверхні теплообміну для парогенератору потужністю 45 МВт. Отримані результати добре корелюються з даними розрахунку комп’ютерним кодом ASPEN-TECH.

**ВСТУП**

Про актуальність технології малих модульних реакторів (SMR) говорить вже той факт, що тільки у 2020 року проводиться кілька міжнародних конференцій світового рівня [1,2]. Це свідчить про великий інтерес до технології SMR і її широких перспективах. Найбільш готовою до застосування на сьогоднішній момент є технологія фірми NuScale, яка описана в звіті МАГАТЕ [3].

Великий досвід проектування, виготовлення і експлуатації ЯЕУ малої потужності накопичений в криголамному і підводному флоті. Реакторна установка (РУ) КЛТ-40 (корабельна криголамного типу) потужністю 150 МВт (теп.) встановлена на сучасних ліхтеровозі «Севморпуть», криголамах «Таймир» і «Вайгач», а також на плавучій АЕС «Академік Ломоносов» [4].

Сьогоднішні перспективи атомної енергетики України зв'язуються з РУ SMR-160, яка проектується американською фірмою Holtec International [5]. Україна зі своїм потужним виробничим потенціалом енергомашинобудування могла б зайняти гідне місце в світі по виробництву відповідного обладнання для SMR, необхідних для використання як в нашій країні, так і для експорту за кордон.

Одним з основних елементів обладнання ЯЕУ є парогенератор (ПГ), розрахунок якого і є об'єктом розгляду в даній статті. Слід зазначити, що в згаданих проектах розглядаються варіанти з природною і примусовою циркуляцією. Незалежно від можливих варіантів конструкції обов'язковим розділом при проектуванні ПГ є його тепловий розрахунок.

Ціллю статті є відпрацювання методики теплового розрахунку та розрахунок парогенератора потужністю 45 МВт.

Для подальшого розглядання прийнято ЯЕУ тепловою потужністю 180 МВт, за прототип якої береться ЯЕУ КЛТ-40С [6].

1. **Описання конструкції парогенератору**

Парогенератор прямоточного типу: живильна вода поступає в теплообмінні трубки (ТОТ) (змійовики), на виході яких отримується перегрітий пар. Основні характеристики парогенератора:

• рух робочих середовищ - протитечійний;

• теплоносій (ТН) 1-го контуру (вода під тиском) рухається в міжтрубному просторі зверху вниз. Тобто має місце поперекове обтікання трубок під нахилом;

• теплоносій 2 контуру (живильна вода - пароводяна суміш - перегріта пара) рухається всередині труб знизу вверх по криволінійній траєкторії;

Теплообмінна поверхня складається з циліндричних рядів змієвиків. У кожному ряді (шарі) розташовується різна кількість трубок. Кількість трубок у шару визначається з умови рівності довжини трубок в різних рядах. Основні параметрі теплоносіїв наведені в таблиці.

Основні параметри теплоносіїв в ПГ

|  |  |
| --- | --- |
| Теплова потужність, МВт | 45 |
| Витрата пара, т/год | 62,1 |
| Параметри пара: Р,МПа  t,°C | 3  275 |
| Температура живильної води, °C | 65 |
| Температура ТН, °C: на вході  на виході | 297, 8  270 |
| Тиск ТН на вході, МПа | 15 |

Теплообмінні трубки виготовляються з титанового сплаву ПТ-7М.

1. **Методика теплового розрахунку прямоточного парогенератора** [7,8,9,10]

Конструктивний розрахунок при заданих (прийнятих) характеристиках визначає кількість ТОТ, зовнішні габарити. Необхідними характеристиками зазвичай є: діаметр і кроки між ТОТ, а також швидкість на вході в трубки. При використанні змієвикової поверхні з циліндричних шарів цього недостатньо. Число шарів визначається швидкістю теплоносія в міжтрубному просторі або, навпаки, задавшись числом рядів циліндричних змійовиків можна отримати швидкість теплоносія в міжтрубному просторі. Таким чином, змієвикова поверхня нагріву для визначеності вимагає на один незалежний параметр більше, ніж звичайні теплообмінники [6].

Площа теплообмінної поверхні розраховується для п'яти ділянок, на яких різні умови теплообміну для робочого тіла:

- Економайзер (ЕД): 1. Конвективний теплообмін ЕД1;

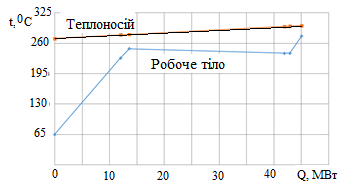
2. Поверхневе кипіння ЕД2.

- Випарник (ВД): 3. Розвинуте кипіння ВД1;

4. Погіршений теплообмін ВД2.

- Пароперегрівник (ПД): 5. Перегріву пару.

Першим етапом теплового розрахунку є побудування t,Q - діаграми ПГ, визначення потужності, яка передавається на ЕД, ВД та ПД (Рис. 1).



*Рис. 1. t,Q – діаграма парогенератору*

Границя між першою і другою зонами економайзерної ділянки визначається з умови: температура внутрішньої поверхні стінки дорівнює температурі кипіння. Для визначення частки теплоти, переданої на ЕД1 необхідно розрахувати температури на внутрішній поверхні стінки на вході і виході економайзерної ділянки .та . Для цього в цих точках слід розрахувати коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія до стінки, коефіцієнт тепловіддачі від стінки робочому тілу, коефіцієнт теплопровідності при середній температурі стінки, коефіцієнт теплопередачі, тепловий потік. Звідси теплова потужність першої економайзерної ділянки визначиться як:

де – теплова потужність економайзеру.

Коефіцієнт тепловіддачі (КТВ) від стінки до живильної води, що рухається в трубах, визначається за формулою [8]:

αрт.ЕД1. = 0,023∙ (𝜆/dвн) ∙ Re0,8 ∙ Pr0,4 (μf/μcт )0,11. (1)

де 𝜆 –коефіцієнт теплопровідності води, Вт/(м К);

dвн∙- внутрішній діаметр ТОТ, м;

Re, Pr – числа Рейнольдса та Прандтля,

μf, μcт  - коефіцієнти динамічної в’язкості води при середній температурі на ЕД1 и при температурі внутрішньої поверхні стінки.

Рух у змієвику підвищує КТВ, що враховується коефіцієнтом:

К=1+3,5 dвн/Dзм, (2)

де Dзм – діаметр навивання змієвика.

Як видно, для визначення КТВ слід попередньо прийняти температуру внутрішньої поверхні стінки. Тепловіддача від теплоносія до стінки при поперечному обтіканні змійовиків для всіх ділянок визначається однаково [9]:

αТН = 0,02 𝜆/dн\* Re0,84 \* Pr0,36. (3)

Кут атаки φ, який відрізняється від 90º враховується множенням на коефіцієнт:

К= 1-0,54cos2φ. (4)

Швидкість теплоносія в міжтрубному просторі визначається як найбільша в самому меншому перетині.

Далі слід прийняти середню температуру стінки, визначити по ній коефіцієнт теплопровідності стінки (для ПТ-7М), Вт/(м К):

𝜆ст= 0,002∙tст+14,873 , (5)

визначити коефіцієнт теплопередачи:

(5)

та в результаті визначити тепловий потік, Вт/(м2 К):

(6)

де – середньо логарифмічний температурний напір.

За відомим тепловим потоком і КТВ від стінки до робочого тіла і від теплоносія до стінки уточняються температури стінки на внутрішній і зовнішній поверхнях:

(7)

. (8)

При великій різниці прийнятих раніше і отриманих значень температурами стінки перезадаються і розрахунок повторюється.

Після розрахунку теплової потужності першої та другої економайзерних ділянок аналогічно попередньому розрахунку проводиться розрахунок першої економайзерної ділянки ЕД1. Площа теплообміну:

. (9)

При визначенні висоти поверхні теплообміну необхідно врахувати, що коефіцієнт теплопровідності визначено по середньому діаметру трубок.

На ЕД2 має місце кипіння недогрітої до температури насичення води [8]:

, (10)

де

(11)

q – питомий тепловий потік, Вт/м2;

визначається за виразом (1),

) – недогрів рідини до температури насичення.

Алгоритм розрахунку на другій економайзерній ділянці ЕД2 аналогічний попередньому за винятком того, що приймати треба тепловий потік q. Для визначення теплопровідності стінки на цій ділянці також доводиться приймати середню температуру стінки. Після цього обчислюються КТВ від теплоносія, коефіцієнт теплопередачі, тепловий потік і температура стінки на обох поверхнях ТОТ. Розрахунок вважається закінченим, якщо прийняті і отримані значення теплового потоку і температур стінки достатньо близькі.

Границя між третьою та четвертою ділянками визначається за формулою для розрахунку Хгр (паровміст) на випарній ділянці. У точці Хгр зона розвиненого кипіння переходить в зону погіршеного теплообміну [8]:

(13)

де Р – тиск, бар,

- густина насиченої води, кг/м3;

– швидкість води в трубв при умові, що вона буде насиченою, м/с;

.- внутрішній діаметр трубки, м.

На ВД1 розвинуте кипіння в каналах [8]:

, (14)

де ,

- коефіцієнт тепловіддачі при течії однофазної рідини, визначається за швидкістю циркуляції 𝜔0:

(15)

(16)

(17)

*Ct* = (μf/μcт )0,11 , (18)

визначається за (11),

(19)

x – середній паровміст на ділянці.

Коефіцієнт теплопередачі на цій ділянці визначався як середнє арифметичне на вході і виході ділянки.

Зона погіршеного кипіння ВД2 розраховувалася відповідно до [8]:

(20)

(21)

(22).

Ділянка перегріву пара (ПД). При течії газів в криволінійних каналах пропонується [8]:

(23)

1. **Результати розрахунку**

Згідно представленої методики був проведений розрахунок прямоточного парогенератора з вихідними даними, наведеними раніше (таблиця).

Основні результати розрахунку прямоточного парогенератора зі змієвиковою теплообмінною поверхнею

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Показник | ЕД1 | ЕД2 | ВД1 | ВД2 | ПД |
| Q, кВт | 12015 | 1587 | 23672 | 5641 | 2129 |
| q, кВт/м2 | 31,2 | 178,3 | 180,3 | 102,3 | 69,74 |
| αтн, кВт/(м2 К) | 40,84 | 41,96 | 41,59 | 42,16 | 42,31 |
| αрт, кВт/(м2 К) | 6,34 | 39,3 | 93,0 | 7,70 | 3,045 |
| , °С | 228,9 | 256 | 264,5 | 272,5 | 287,5 |
| Швидкість ТН, м/с | 4,08 | 4,12 | 4,197 | 4,31 | 4,32 |
| Швидкість РТ, м/с | 0,607 | 0,685 | - | - | 38,5 |
| k, кВт/(м2 К) | 2,676 | 4,156 | 4,249 | 1,838 | 1,845 |
| Δtлог, °С | 116,6 | 42,9 | 40,7 | 55,5 | 37,8 |
| F, м2 | 36,1 | 13,05 | 186,7 | 55,3 | 30,54 |
| Висота, м | 0,349 | 0,126 | 1,804 | 0,534 | 0,295 |

З наведених даних видно, що при русі теплоносія зі зниженням його температури коефіцієнт тепловіддачі поступово знижується. Коефіцієнт тепловіддачі робочого тіла істотно менше коефіцієнта тепловіддачі від теплоносія на всіх ділянках теплообміну. Внаслідок цього температура стінки близька до температури теплоносія. Суттєве значення має термічний опір стінки. На економайзерній ділянці він навіть більше, ніж термічний опір тепловіддачі робочого тіла. Це свідчить про доцільність пошуку матеріалу для теплообмінних трубок з більшим коефіцієнтом теплопровідності і кращими характеристиками міцності.

Отримані в результаті розрахунку габаритні розміри парогенератора мають збіг з даними розрахунку за допомогою комп'ютерного коду ASPEN-TECH.

**Висновки**

1. Розроблено алгоритм і програма розрахунку прямоточного парогенератора для АЕС малої потужності зі змієвиковою поверхнею нагріву. Дана програма може бути використана для оптимізації параметрів при проектуванні парогенераторів аналогічної конструкції.

2. Проведений розрахунок показав хороший збіг отриманих значень габаритних розмірів парогенератора з даними розрахунку комп'ютерного коду АSPEN-TECH.

**Список використаної літератури**

1. **Annual International SMR and Advanced Reactor Summit** <https://www.nuclearenergyinsider.com/international-smr-advanced-reactor/brochure-thank-you.php> (дата звернення 21.02.2020)
2. International Conference on Generation IV and Small Reactor<http://g4sr.org/> (дата звернення 21.02.2020)
3. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. <https://aris.iaea.org/Publications/SMR-Book_2018.pdf> (дата звернення 21.02.2020)
4. Реакторная установка КЛТ-40 <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%9B%D0%A2-40> (Дата звернення 21.02.2020).
5. Уникальные возможности Украины для внедрения технологий SMR-160 <http://www.energoatom.com.ua/files/file/smr_160_for_naek_industry_forum_rus.pdf> (Дата звернення 21.02.2020).
6. V.P. Kravchenko , R.M. Sereda , Zhou Xiaolong , Yu.I. Visotskii , А.Н. Rybakov. Choice of basic construction parameters of steam generators for NPP of low power. ВОПРОСЫ АТОМНОЙ HАУКИ и ТЕХНИКИ журнал ННЦ ХФТИ. 2019. №5 с. 62-68
7. Судовые ядерные паропроизводящие установки / Д.Ф. Романов, М.А. Лебедев, С.С. Саваренский, Н.П. Шаманов. –Л.: Судостроение, 1967. - 404 с.
8. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) /П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.
9. РД 24.035.05-89. Методические указания. Тепловой и гидравлический расчет теплообменного оборудования АЭС. <http://docs.cntd.ru/document/1200085786> (Дата звернення 21.02.2020).
10. Михеев М.А., Михеева И.М. Краткий курс теплопередачи. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 208 с.