УДК 536.244:621.438

ЯДЕРНА ЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА З ГЕЛІЄВИМ РЕАКТОРОМ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ВОДНЮ

А. О. Іванова[1, a], Т. В. Доник[1,2]

[1] *Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Фізико-технічний інститут*

[2] *Інститут технічної теплофізики НАН України*

Анотація

Виконано розрахунок теплового балансу парогенератора ядерної енергетичної установки ГТ-МГР-ВЕП з тепловою потужністю 300 МВт для виробництва водню. Розглянуто спрощену схему парогенератора та алготитм розрахунку методом теплового балансу. Проведено аналіз залежності паровиробництва парогенератора від температур на виході з випаровувача та на вході в парогенератор.

Ключові слова: водень, виробництво водню, принципова схема, парогенератор, розрахункова схема, залежність.

Вступ

Вагомою проблемою в енергетиці, на сьогодні, є зв'язок між виробленням енергії та викидами парникових газів. За 87 % глобальних викидів парникових газів відповідає виробництво електричної енергії. Також існує проблема транспортування електроенергії у важкодоступні регіони [1].

Рішенням цих проблем може стати виробництво водню. Водень — енергоносій, що можна використовувати як для зберігання, так і для переміщення (доставки) енергії, що вироблена з інших джерел. Також, це чисте паливо, що при згорянні виробляє лише воду. Він привабливий для використання в багатьох сферах (наприклад: для автомобілів, будинків) [2].

Водень — найпоширеніший елемент у Всесвіті. Він наявний у воді, у вуглеводнях та інших органічних сполуках. Основна проблема — це його ефективне вилучення із цих сполук [3]. Існує багато різних сполук з воднем (наприклад H_2O, CH_4 та багато інших) та шляхів його отримання. Найбільш перспективною технологією вироблення водню є високотемпературний електроліз води, де вода розкладається на водень та кисень, при пропусканні електричного струму. А частина енергії, що потрібна для розщеплення води, йде на нагрів пару до 800°C, що робить процес більш ефективним. Цей метод екологічно чистий, звичайно якщо первинна енергія не забруднює середовище. Для виробництва водню за допомогою високотемпературного електролізу пару можна використовувати модульні ядерні енергетичні установки з гелевим реактором четвертого покоління, а саме ГТ-МГР, в яких високотемпературне тепло (потрібна температура нагріву теплоносія вище 850°C) від реактору буде передаватися через теплообмінник до пару та перегрівати його. Далі перегрітий пар відводиться за допомогою трубопроводів в установку високотемпературного електролізу в якій водяний пар розкладається на H_2 та O_2 [4].

1. Ядерна енергетична установка з гелієвим реактором четвертого покоління для виробництва водню методом високотемпературного електролізу пари

Енергетична установка ГТ-МГР-ВЕП — один із варіантів розробок для енерготехнічного призначення, а саме виробництва електроенергії та водню методом високотемпературного електролізу пару. Передбачається застосування уніфікованого газотурбінного блоку перетворення енергії (БПЕ) для отримання електроенергії. На рис. 1 показана принципова схема ГТ-МГР-ВЕП для виробництва електроенергії та водню. Одна із магістралей теплообміну включає ре-

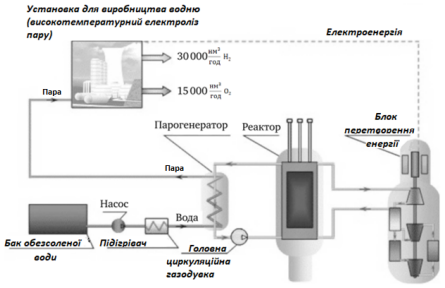

Рис. 1. Принципова схема ГТ-МГР-ВЕП [5]

актор, парогенератор та головну циркуляційну газодувку. Друга — реактор і блок перетворення енергії. Тобто приблизно 10 % теплової енергії з активної зони реактора передається в парогенераторний блок для вироблення водню. Блок перетворення енергії перетворює теплову енергію в механічну енергію, а

[a] alona20004676@gmail.com

механічну в електричну. Робоче тіло в даному випадку — гелій. Газотурбінна установка працює за складним циклом Брайтона [5].

В парогенераторі відбувається перегрів пару до потрібних температур для подальшого виробництва водню в установці високотемпературного електролізу.

2. Особливості конструкції парогенератора ГТ-МГР ВЕП

Парогенератор — це теплообмінний апарат (або їх сукупність). В парогенераторі відбувається виробництво робочого пару з використанням тепла, що відводиться з активної зони реактора за допомогою напрямленого в поверхності нагріву парогенератора охолоджуючого середовища. В загальному випадку парогенератор складається з елементів для підігрівання (водяний економайзер), для виробництва пару (випаровувач) та для перегрівання (пароперегрівач) [6].

Завдяки високим температурам теплоносія (гелію) на виході, можливе виробництво пару високих параметрів, що далі передається в установку для виробництва водню. Парогенератор складається із оболонки і маленьких трубок, що можуть мати різне розташування.

Парогенератори для гелієвих реакторних установок, на сьогодні, — це корпус первинного контуру з пакетом труб, діаметром $2 \div 4$ см, як вторинний контур. Теплообмін між теплоносієм та поверхнею нагріву відбувається за рахунок конвекції з низьким коефіцієнтом тепловіддачі. Із цього слідує, що для парогенераторів високого одиничного виробництва потрібні поверхні нагріву великих площ, тому потрібно застосовувати міри для інтенсифікації теплообміну від теплоносія до стінки поверхні нагріву. Прямим шляхом є збільшення швидкості руху теплоносія, але в реакторному контурі застосовуються тільки абсолютно чисті гази і приємливі швидкості визначаються тільки техніко-економічними чинниками на допустимі витрати на перекачку. Тому часто використовується другий спосіб, а саме оребрення труб в пакетах вторинного контуру [6].

Парогенератори, що отримують тепло від газового теплоносія помірних тисків, повинні вироблятись з рухом робочого тіла по трубках і рухом газу в міжтрубному просторі (водотрубна конструкція). Рух теплоносія в міжтрубному просторі поверхні нагріву робить більш простим об'єднання всіх елементів парогенератора в одному корпусі [6]. Характерним в парогенераторі є перенос тепла від гарячого теплоносія всередину корпусу первинного контуру до холодного теплоносія, що прокачується через трубний пакет всередині корпусу.

Схема і конструкція парогенератора повинні забезпечити високі техніко-економічні показники. При проектуванні парогенератора бувають задані вид та параметри теплоносія і робочого тіла на вході і виході. Тому особливе значення для отримання оптимальних показників парогенератора має правильний вибір його конструкційної схеми, матеріалів, розмірів елементів поверхностей теплообміну, швидкостей теплоносія і робочого тіла. Тож необхідно застосовувати міри для зниження втрат в навколишнє середовище [6].

3. Розрахунок теплового балансу парогенератора

Основою для детального моделювання процесів теплообміну з фазовим переходом, що протікають в парогенераторі, є розрахунок теплового балансу парогенератора. Метод теплових балансів дозволяє нам визначити паропродуктивність парогенератора і витрати води через парогенератор. На рис. 2 показана розрахункова схема парогенератора.

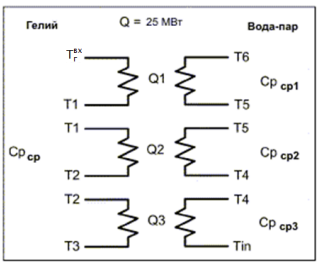

Рис. 2. Розрахункова схема парогенератора

Вторинний контур розрахункової моделі парогенератора включає в себе три секції. Нижня секція (T_{in} та T_4) складається з пристрою для подачі води та економайзера, для підігріву води до температури початку кипіння. Друга секція (T_4 та T_5) — початок та кінець випарника. Третя (T_5 та T_6) — це трубний пучок, розташований на виході з парогенератора над біметалічною пластиною. Третя секція відповідає за остаточний перегрів пару, щоб досягти потрібної температури для методу вироблення водню електролізом пару.

Вихідні дані для розрахунку теплового балансу парогенератора були вибрані з урахуванням світових тенденцій в проектуванні парогенераторів ГТ-МГР та з урахуванням особливостей реального проекту:

- Теплова потужність парогенератора — 25 МВт;
- Температура води на вході в парогенератор — 200°C;
- Температура пару на виході з парогенератора — 800°C;
- Тиск води на вході в парогенератор — $4,75$ МПа;
- Температура фазового переходу води на лінії насичення при $P = P_{\text{вх}}$ — 255°C;
- Температура пару на виході з випаровувача — 450°C;
- Температура гелію на вході в парогенератор — 850°C;
- Тиск гелію на вході в парогенератор — $4,74$ МПа;
- Кількість труб в трубному пучку — 50;
- Довжина однієї труби — 50 м.

Далі побудований алгоритм для розрахунку парогенератора. Спочатку для процесу $in - 4$ розра-

ховуються різниця температур (ΔT_3) та теплова потужність (Q_3). Для процесу $4-5$ розраховуються різниця температур (ΔT_2), теплова потужність (Q_2), різниця між повною тепловою потужністю та Q_3 (ΔQ) та різниця теплових потужностей в пучках труб та на виході з парогенератора (Q_1). Для процесу $5-6$: температура пару на виході з парогенератора (T_6).

Наступним кроком, треба розрахувати ітераційний цикл для $G_в$ та отримати витрату води через парогенератор для отримання пару зі температурою T_6. Також розраховується різниця температур для гелію на вході в парогенератор та виході з нього ($\Delta T_г$) та витрата гелію ($G_г$).

Але для рішення даної задачі потрібно аналітично описати залежність питомої теплоємності води (водяного пару) від температури і тиску в робочому діапазоні тисків для парогенератора, що розраховується. Апроксимація діаграми виконана в діапазоні температур $T = 0 \div 800°C$ та в діапазоні тисків $P = 0,1 \div 7,0$ МПа (рис. 3)

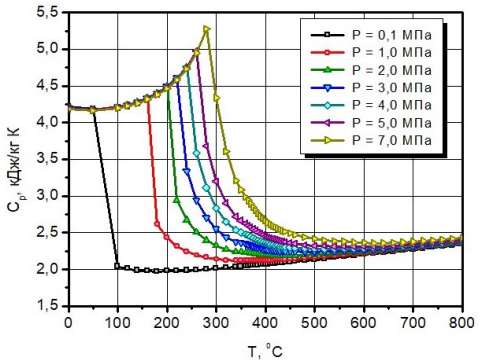

Рис. 3. Залежність питомої теплоємності води (водяного пару) при постійному тиску від температури і тиску

На рис. 4 представлена залежність паровиробництва парогенератора ($G_г$) від температури на виході із випаровувача (T_5), діапазон зміни температури води на вході в парогенератор $T_{in} = 200 \div 240°C$. З даної залежності можна зробити висновок, що в діапазоні $T_5 = 450 \div 475°C$ потрібна для отримання заданої температури на виході із парогенератора витрата води зростає з ростом T_5, а при $T_5 > 475°C$ — практично не змінюється. Таку поведінку даної залежності пояснює факт, що при заданому тиску води на вході в парогенератор в інтервалі температур від точки початку кипіння ($225°C$) і до $T_5 \approx 450 \div 475°C$ вода знаходиться одночасно в двох фазових станах (рідкий та газоподібний), і тому при заданій температурі пару на виході із парогенератора для перегріву пару в пароперегрівнику потрібно затратити більше енергії.

Також з рис. 4 можна побачити, що чим більша температура води на вході в парогенератор, то тим більше буде паровиробництво парогенератора. Тобто з ростом температури води на вході в парогенератор від $200°C$ до $240°C$ паровиробництво парогенератора виросте на 10%. А з ростом температури на виході з випаровувача від $300°C$ до $500°C$ паровиробництво парогенератора зросте на 10%.

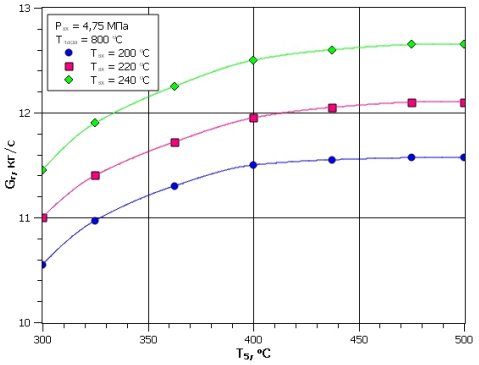

Рис. 4. Залежність паровиробництва парогенератора від температури на виході із випаровувача (T_5) при різних значеннях температури води на вході в парогенератор

Висновки

В роботі було розглянуто розрахунок теплового балансу парогенератора та визначені залежності паровиробництва парогенератора ($G_г$) від температури на виході в випаровувача (T_5):

1) при рості T_5 в діапазоні від $450°C$ до $475°C$: $G_г$—росте;
2) при рості T_5 в діапазоні від $475°C$ до $500°C$: $G_г$—майже не змінюється.

Також було визначено, що $G_г$ зростає:

1) на $\sim 10\%$ з збільшенням температури води на вході в парогенератор від $200°C$ до $240°C$;
2) на $\sim 10\%$ з ростом температури на виході з випаровувача від $300°C$ до $500°C$.

Перелік використаних джерел

1. Roser M. The world's energy problem // Our World in Data. — 2020.
2. ENERGY.GO. Hydrogen Fuel Basics. — online; accessed: `https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-fuel-basics`.
3. AFDS. Hydrogen Basics. — online; accessed: `https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_basics.html`.
4. Столяревский А. Я. Производство альтернативного топлива на основе ядерных энергоисточников [Электронный ресурс онлайн] // Ж. Рос. хим. обва им. Д.И. Менделеева. — 2008. — № 5. — Режим доступа: `http://www.chem.msu.su/rus/jvho/2008-6/73.pdf`.
5. Радченко Р. В., Мокрушин А. С., В. Тюльпа В. Общая энергетика: водород в энергетике (учебное пособие). — М., 2018. — 230 с.
6. Электрические сети. Парогенераторные установки атомных електростанций — характеристики т требования к парогенераторам. — Режим доступа: `https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/parogeneratornye-ustanovki-atomnyh-elektrostanciy-4.html`.