

УДК 620. 92; 537.32

Анатичук Л.І., Поляк В.М.



Анатичук Л.І.

Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки 1, Чернівці, 58029, Чернівці



Поляк В.М.

КОМП'ЮТЕРНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ОТЕС

В роботі розроблено метод комп'ютерного проектування термоелектричних ОТЕС (Ocean thermal energy conversion), який дозволяє провести оптимізацію електростанції по багатьох параметрах і врахувати втрати, які мають місце при роботі ОТЕС. Ефективність методу продемонстровано на прикладі конкретної фізичної моделі ОТЕС. Визначено оптимальні параметри ТЕГ, при яких досягається його максимальна генерована потужність з врахуванням втрат на власні потреби. Розраховано економічні показники термоелектричної ОТЕС потужністю 100 кВт: питомі капіталовкладення – 25 \$/Вт, ціна на електроенергію – 0.15-0.3 \$/кВт·год., що підтверджує економічну доцільність подібних проектів.

Ключові слова: термоелектричний генератор, тепла енергія океану, океанічна електростанція

Method for computer design of thermoelectric OTEC (Ocean thermal energy conversion) plants is developed which allows optimization of electric power plant in many parameters and take into account the losses in OTEC operation. The efficiency of the method is demonstrated by an example of a concrete physical model of OTEC. Optimal parameters of TEG are defined, whereby its maximum generated power is achieved with regard to losses for in-house needs. Economic parameters of a 100 kW thermoelectric OTEC are calculated: relative capital investments are 25\$/W, the cost of electric energy is 0.15-0.3 \$/kW·h, which confirms the economic viability of such projects.

Key words: thermoelectric generator, Ocean thermal energy, Ocean power station

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Є загальновідомою актуальність створення ефективних відновлювальних джерел електрики. Серед них все більший інтерес викликають джерела, у яких використовується низькопотенціальне тепло завдяки його величезній кількості, наприклад, промислові теплові відходи, відходи від теплових електростанцій та інше. Однак найбільш масштабним серед низькопотенціальне джерел тепла є світовий океан, у якому перепади температури між його поверхнею та на глибинах 1–2 км досягають 20-25°. Створення перетворювачів енергії океану в електричну – ОТЕС (Ocean thermal energy conversion) – може істотно сприяти розв'язанню проблеми забезпечення людства електрикою. Фактично це перетворювачі енергії сонця, однак ОТЕС може працювати цілодобово, що створює низку принципових переваг. Така приваблива можливість спонукає до розробки електростанцій, що працюють на цьому теплі.

Для реалізації такої можливості ведуться розробки ОТЕС з використанням теплових машин [1]. Їх ККД може досягти 3%. Такий відносно низький ККД не може стати принциповою перешкодою на шляху до використання ОТЕС, оскільки доцільність їх створення залежить в першу чергу не від ККД, а від його економічних показників. У [2, 3] було встановлено, що ОТЕС на основі теплових машин можуть бути конкурентоспроможними сонячним електростанціям з потужностями більших 10 МВт. За менших потужностей питомі капіталовкладення зростають. Тому малопотужні ОТЕС економічно недоцільні. Створення ОТЕС великої потужності також є проблематичним через значні інвестиції з недостатньо визначеними ризиками.

Цього недоліку позбавлені термоелектричні ОТЕС, оскільки вони майже нечутливі до масштабного фактора, що зумовлює підвищений до них інтерес.

У 1980–1982 рр. в Японії компанією Kawasaki Heavy Industries було вперше виготовлено термоелектричний генератор (ТЕГ) для ОТЕС [4]. Ним експериментально підтверджено можливість отримання електричної енергії за малих перепадів температури. У генераторі було використано звичайні модулі охолодження. Результатів оптимізації модулів та ТЕГ не наведено.

У роботі [5] описано результати теоретичних і експериментальних досліджень конструкції ТЕГ для малих перепадів температур, в тому числі і для океанічного перепаду. Оптимізація здійснювалася з метою досягнення максимального ККД. Розрахунки робилися без врахування втрат на перекачку холодної води з глибини океану та гарячої води з поверхні океану до ТЕГ.

У роботах [1, 6, 7] наведено результати оптимізації термоелектричної ОТЕС для досягнення максимальної потужності. Зроблено розрахунок питомих капіталовкладень для ОТЕС потужністю 400 МВт, встановлено, що вони близькі до капіталовкладень ОТЕС, що містять теплову машину. Останнє є переконливим підтвердженням доцільності використання термоелектричних генераторів в ОТЕС з малими потужностями. При цьому враховано витрати електричної енергії на перекачку холодної води з глибини океану, та не враховано такі втрати від перекачки теплої води з поверхні океану.

У роботі [8] зроблено розрахунок термоелектричного ОТЕС потужністю 100 кВт. Отримано вартість електричної енергії майже 0.15 \$/кВт·год, що підтверджує доцільність використання термоелектричного ОТЕС понижених потужностей.

Однак проектування таких ОТЕС досить громіздке через необхідність оптимізації низки елементів їх конструкції. Наведені вище результати отримано шляхом прямих математичних розрахунків, які стають все менш продуктивними зі збільшенням кількості змінних за якими здійснюється оптимізація ОТЕС. Тому для дальшого прогресу з цього напрямку є важливим перехід до комп'ютерного моделювання термоелектричних ОТЕС. Нижче наводяться основні підходи з таким моделюванням та результати комп'ютерного проектування для конкретної фізичної моделі ОТЕС.

Фізична модель термоелектричної ОТЕС

Загальну модель термоелектричної ОТЕС потужністю $W_{отес}$ наведено на рис.1.А. Вона складається з термоелектричного генератора (ТЕГ) 1 та трубопроводів для гарячої 2, змішаної 3 та холодної 4 води, довжини яких L_1 , L_2 та L_3 , з глибинами опускання H_1 , H_2 і H_3 відповідно. Зовнішня поверхня трубопроводу для холодної води теплоізолювана. Вода трубами

прокачується двома насосами: 5 – потужністю W_{hp} для гарячої води, 6 – потужністю W_{cp} для холодної води. Модель ТЕГ наведено на рис.1.В. Вона складається з рядів термоелектричних модулів 7, які розміщені між гарячими 8 і холодними 9 теплообмінниками у вигляді труб зовні прямокутної форми. Причому, в сусідніх теплообмінниках протікає вода з однаковою температурою. Гаряча та холодна вода потрапляє до теплообмінників через вхідні колектори 10 і 11, витікає з теплообмінників через колектори 12 і 13.

Модель ТЕГ зручно описати тотожними блок-секціями 14. Вони складаються з одного модуля, який розміщений між гарячим і холодним теплообмінниками. Кожен ряд ТЕГ містить N блок-секцій. ТЕГ складається з n рядів.

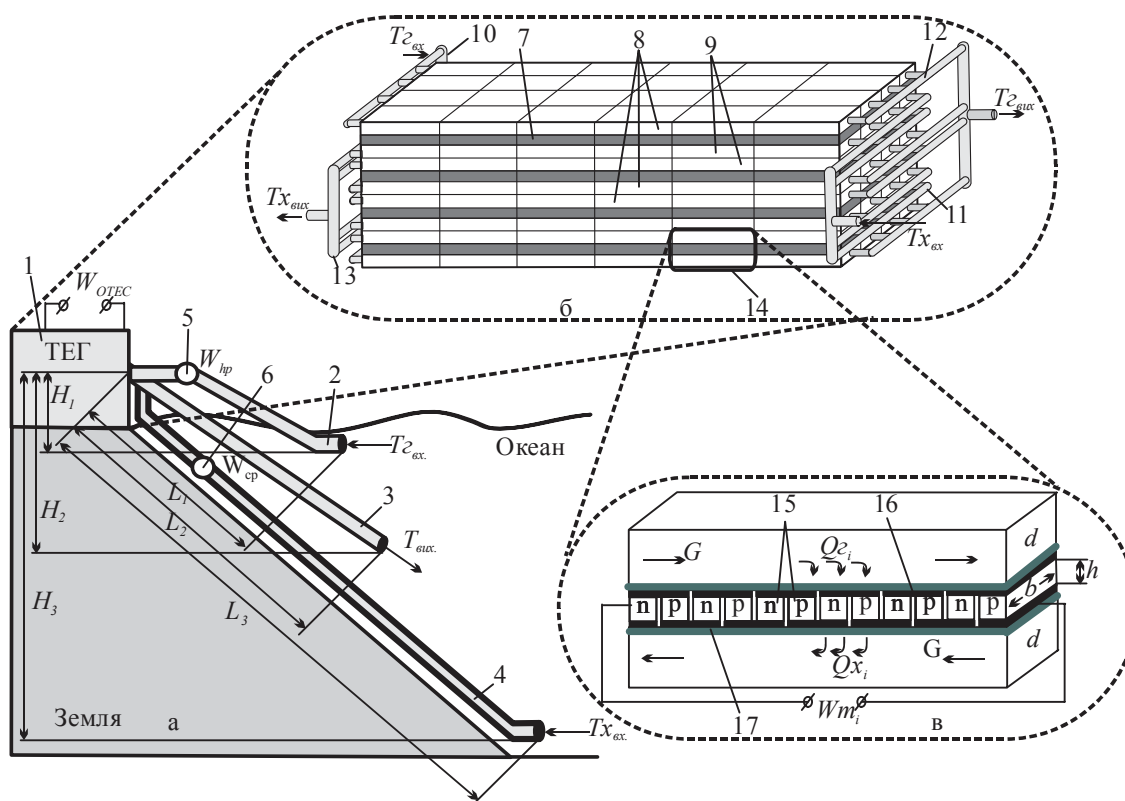


Рис. 1. Фізична модель термоелектричної ОТЕС: а) – термоелектрична ОТЕС; б) – ТЕГ; в) – блок-секція ТЕГ.

На рис.1.С наведено модель блок-секції ТЕГ. У ній термоелектричний модуль складається з віток n - та p -типу 15 висотою h , довжиною a і шириною b , комутаційних пластин 16 та електроізолюючих керамічних пластини 17. Внутрішня форма теплообмінників визначається ефективним діаметром d . Модулем генерується потужність Wm_i , яка дорівнює різниці між тепловою потужністю, що надійшла до модуля від гарячого теплоносія Q_{e_i} , і тепловою потужністю, яка віддана холодному теплоносію Q_{x_i} .

На потужність ТЕГ впливають такі параметри:

- довжини трубопроводів L_1 , L_2 та L_3 ;
- глибини опускання трубопроводів H_1 , H_2 і H_3 ;
- діаметр трубопроводів D ;
- температура вхідної гарячої води $T_{г.вх.}$;
- температури вхідної холодної води $T_{х.вх.}$;

- кількість рядів ТЕГ n ;
- кількість блок-секцій в одному ряді N ;
- довжина блок-секції l ;
- коефіцієнти місцевого опору ξ на входах і виходах з труб та на колекторах;
- ККД насосів η ;
- витрата теплоносіїв в одному ряді G ;
- ефективний діаметр каналів теплообмінника d ;
- товщина стінки теплообмінника x ;
- висота віток термоелектричного модуля h ;
- ширина віток термоелектричного модуля b ;
- довжина віток термоелектричного модуля a ;
- відстань між вітками l_i ;
- товщина комутаційних пластин h_1 ;
- товщина керамічних пластин h_2 .

Параметрами, які треба оптимізувати в такій моделі, є G, d, h, b, N . Всі інші параметри під час оптимізації задаються як вихідні дані. Маючи оптимальні значення параметрів, можна визначити кількість рядів ТЕГ n , необхідних для побудови електростанції заданої потужності.

Математичний опис моделі

Для опису потоків тепла та електрики скористаємось законами збереження енергії

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0 \quad (1)$$

та електричного заряду

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0, \quad (2)$$

де

$$\vec{E} = \vec{q} + U\vec{j} \quad (3)$$

$$\vec{q} = \kappa \nabla T + \alpha T \vec{j} \quad (4)$$

$$\vec{j} = -\sigma \nabla U - \sigma \alpha \nabla T. \quad (5)$$

Тут \vec{E} – густина потоку енергії, \vec{q} – густина теплового потоку, \vec{j} – густина електричного струму, U – електричний потенціал, T – температура, α, σ, κ – коефіцієнти термоЕРС, електропровідності та теплопровідності.

Враховуючи (3) - (5), можна отримати

$$\vec{E} = -(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \nabla T - (\alpha \sigma T + U \sigma) \nabla U. \quad (6)$$

Тоді закони збереження (1), (2) набувають вигляду:

$$-\nabla [(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \nabla T] - \nabla [(\alpha \sigma T + U \sigma) \nabla U] = 0, \quad (7)$$

$$-\nabla(\sigma \alpha \nabla T) - \nabla(\sigma \nabla U) = 0. \quad (8)$$

Цими нелінійними диференціальними рівняннями другого порядку у частинних похідних (7) і (8) визначаються розподіли температури T та потенціалу U в термоелементах.

Рівняння, що описує процес переносу тепла в стінках теплообмінників у стаціонарному випадку, записується таким чином:

$$\nabla(-k_1 \cdot \nabla T_1) = Q_1, \quad (9)$$

де k_1 – коефіцієнт теплопровідності стінок теплообмінника, ∇T_1 – градієнт температури, Q_1 – тепловий потік.

Процеси тепло-масообміну теплоносіїв у каналах теплообмінників у стаціонарному випадку описується рівняннями [9]

$$-\Delta p - f_D \frac{\rho}{2d_h} v |\vec{v}| + \vec{F} = 0 \quad (10)$$

$$\nabla(A\rho\vec{v}) = 0 \quad (11)$$

$$\rho A C_p \vec{v} \cdot \nabla T_2 = \nabla \cdot A k_2 \nabla T_2 + f_D \frac{\rho A}{d_h} |\vec{v}|^3 + Q_2 + Q_{wall}, \quad (12)$$

де p – тиск, ρ – густина теплоносія, A – поперечний переріз труби, \vec{F} – сума всіх сил, C_p – теплоємність теплоносія, T_2 – температура, \vec{v} – вектор швидкості, k_2 – теплопровідність теплоносія, f_D – коефіцієнт Дарсі, $d = \frac{4A}{Z}$ – ефективний діаметр, Z – периметр стінки труби, Q_2 – тепло, що виділяється за рахунок в'язкого тертя [Вт/м] (з одиниці довжини теплообмінника), Q_{wall} – тепловий потік, що надходить від теплоносія до стінок труби [Вт/м].

$$Q_{wall} = h \cdot Z \cdot (T_1 - T_2), \quad (13)$$

де h – коефіцієнт тепловіддачі, який визначається з рівняння

$$h = \frac{Nu \cdot k_2}{d}. \quad (14)$$

Для визначення числа Нуссельта використовується рівняння Gnielinski ($3000 < Re < 6 \cdot 10^6$, $0.5 < Pr < 2000$)

$$Nu = \frac{\left(\frac{f_d}{8}\right)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7\left(\frac{f_d}{8}\right)^{\frac{1}{2}}\left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)}, \quad (15)$$

де число Прандтля $Pr = \frac{C_p \mu}{k_2}$, μ – динамічна в'язкість, $Re = \frac{\rho v d}{\mu}$ – число Рейнольдса.

Для визначення коефіцієнта Дарсі f_D використаємо рівняння Churchill для усього спектра числа Рейнольдса та усіх значень e/d (e – шорсткість поверхні стінки)

$$f_D = 8 \left[\frac{8}{Re}^{12} + (A + B)^{-1.5} \right]^{1/12}, \quad (16)$$

де

$$A = \left[-2.457 \cdot \ln \left(\left(\frac{7}{Re} \right)^{0.9} + 0.27(e/d) \right) \right]^{16}, \quad B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16}.$$

Розв'язуючи рівняння (7) – (12) ми отримуємо розподіл температур, електричного потенціалу (для термоелементів), швидкостей та тиску (для теплоносія).

Цільовою функцією під час оптимізації блок-секції є вихідна потужність (потужність модуля з урахуванням втрат на прокачування теплоносіїв у теплообмінниках), яка обчислюється за формулою:

$$W_i = Wm_i - Wn_{hot} - Wn_{cold}, \quad (17)$$

де

$$Wm_i = \left(\frac{\Delta U}{R + r} \right)^2 R \quad (18)$$

$$Wn_{hot} = \frac{G \cdot \Delta p_h}{\eta} \quad (19)$$

$$Wn_{cold} = \frac{G \cdot \Delta p_c}{\eta}. \quad (20)$$

Тут Wn_{hot} , Wn_{cold} – потужності, що затрачуються на прокачування гарячого та холодного теплоносіїв відповідно, ΔU – різниця потенціалів між крайніми комутаціями блок-секцій, R – опір електричного навантаження, r – опір термоелементів, Δp_h , Δp_c – гідравлічний опір гарячого і холодного теплообмінників (перепад тисків в трубі), η – ККД насоса.

Коефіцієнт корисної дії модуля можна розрахувати за формулою

$$\eta_m = \frac{Wm_i}{Q_{\varepsilon_i}}. \quad (21)$$

Потужність усіх модулів у ряді та вихідна потужність одного ряду ТЕГ визначається за формулами

$$Wm = \sum_{i=1}^N Wm_i \quad (22)$$

$$W = \sum_{i=1}^N W_i. \quad (23)$$

Після оптимізації геометричних розмірів блок-секції, визначення потужності та ККД оптимальної блок-секції можна визначити кількість рядів ТЕГ n , яка необхідна для побудови електростанції потужністю W_{otec} . Для цього скористаємось рівнянням

$$W_{otec} = n \cdot N \cdot Wm_i - W_{hp}(n) - W_{cp}(n). \quad (24)$$

ККД електростанції визначається за формулою

$$\eta_{OTEC} = \frac{W_{otec}}{n \cdot N \cdot Q_{\varepsilon_i}}. \quad (25)$$

Потужність, яку споживають насоси, можна визначити згідно формул

$$W_{hp}(n) = W_h(n) + \frac{1}{2} W_{exit}(n) + n \cdot N \cdot Wn_{hot} \quad (26)$$

$$W_{cp}(n) = W_c(n) + \frac{1}{2} W_{exit}(n) + n \cdot N \cdot Wn_{cold}. \quad (27)$$

Потужність, яку необхідно затратити для прокачування води трубопроводами, в загальному випадку обчислюється за формулою [10]

$$W_{c,h,exit}(n) = \frac{1}{\eta} \left[(\rho_1 - \rho_2) G_v(n) g H + \left(\lambda \frac{L}{D} + \xi \right) \cdot \frac{\rho G_v^3(n)}{2S^2} \right], \quad (28)$$

де G_v – витрата води у всіх рядах ТЕГ (у випадку труби для змішаної води вона в 2 рази більша), ρ – середня густина води, ρ_1, ρ_2 – густини холодної і гарячої води відповідно, g – прискорення вільного падіння, H – висота, на яку треба підняти рідину, $\lambda = \frac{0.316}{\sqrt[4]{Re}}$ – коефіцієнт гідравлічного тертя, D – діаметр труби, L – довжина труби, ξ – коефіцієнт місцевого опору (враховує місцеві опори на входах і виходах з труб та на колекторах 10 – 13), S – площа поперечного перерізу труби, $Re = \frac{4\rho G_v}{\mu \pi D}$ – число Рейнольдса.

Комп'ютерна модель блок-секції ТЕГ

Проектування термоелектричної електростанції складається з двох частин:

- 1) оптимізації одного ряду блок-секцій ТЕГ;
- 2) розрахунку термоелектричної електростанції.

Для розв'язку першої частини задачі доцільно використовувати метод кінцевих елементів, який може бути реалізований у програмному середовищі Comsol Multiphysics. Цей метод дає можливість розв'язати диференціальні рівняння (6) – (12) для різних значень параметрів (G, d, h, b, N) ТЕГ. Серед цих параметрів можна вибрати такі, за яких функція вихідної потужності ТЕГ (17) досягатиме максимального значення.

Розглянемо побудову комп'ютерної моделі блок-секції ТЕГ на прикладі ТЕГ з теплообмінниками круглої форми всередині. Вибір такої форми теплообмінників обумовлений тим, що вони мають на 15% менший гідравлічний опір, ніж теплообмінники прямокутної форми. Це визначено за допомогою комп'ютерного моделювання в Comsol двох труб однакової довжини і поперечного перерізу. Результати наведено на рис. 2.

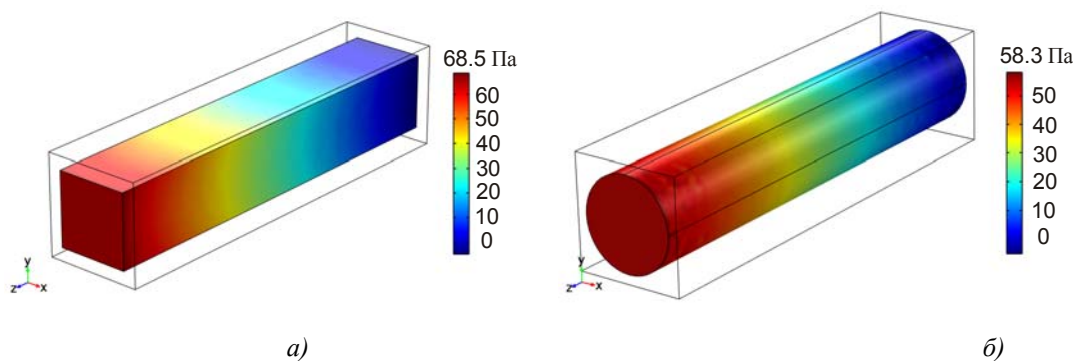


Рис. 2. Перепад тиску в трубі прямокутної А та круглої В форми всередині.

На рис. 3 зображено геометрію та сітку кінцевих елементів, побудовані в Comsol, для моделювання термоелектричної блок-секції. Вихідні дані:

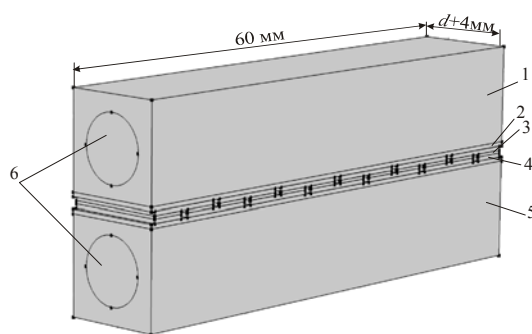
- довжина блок-секції $l = 60$ мм;
- ККД насосів $\eta = 80$ %;
- товщина стінки теплообмінника $x = 2$ мм;
- довжина віток термоелектричного модуля $a = 4$ мм;
- відстань між вітками $l_1 = 1$ мм;
- товщина комутаційних пластин $h_1 = 0.5$ мм;

- товщина керамічних пластин $h_2 = 0.5$ мм;

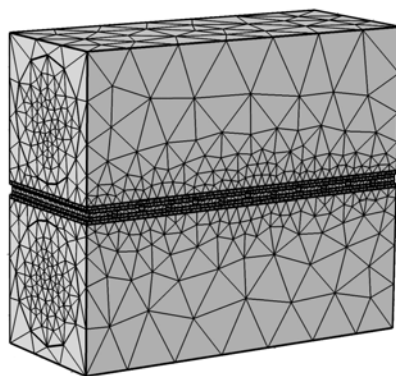
Матеріал теплообмінників – алюміній. Матеріал комутацій – мідь. Модель враховує контактний та комутаційний опір термоелементів. Контактний опір дорівнює 10^{-5} Ом·см². Щоб врахувати температурну залежність α , σ , κ термоелектричного матеріалу *Bi-Te* *n*-типу та *p*-типу, їх задано у вигляді поліномів, які отримані з експериментальних даних. Вихідна потужність розраховувалася у режимі узгодженого навантаження ($R = r$).

Діапазон зміни параметрів для моделювання :

- діаметр каналу $d = 2..140$ мм;
- висота вітки $h = 0,04..10$ мм;
- ширина вітки $b = 12..200$ мм;
- витрата теплоносіїв $G = 1..2000$ мл/с;
- кількість блок-секцій $N=1..400$ шт.



а)



б)

Рис.3. Геометрія А та сітка В, побудовані в Comsol для блок-секції ТЕГ:

1 – гарячий теплообмінник; 2 – керамічна пластина; 3 – термоелектричний матеріал;
4 – комутаційна пластина; 5 – холодний теплообмінник; 6 – канали діаметром d з теплоносієм.

Початкові умови для моделювання:

- температура гарячої води на вході $T_h = 29$ °С;
- температура холодної води на вході $T_c = 4$ °С;
- витрата теплоносіїв на входах в канали G ;
- тиск на виходах з каналів $P = 0$ Па;
- електричний потенціал на першій комутації $U = 0$;
- на всіх інших границях накладені умови теплової та електричної ізоляції.

Результати комп'ютерного моделювання.

На рис. 4 зображено типові розподіли температури та електричного потенціалу в блок-секції.

На рис. 5, 6 зображено серію залежностей вихідної потужності (17) від висоти віток h за оптимального d , витрати теплоносія G за оптимальної h та діаметру каналу d за оптимальної h ($b = 12$ мм).

На рис. 7 зображено результати оптимізації за кількістю блок-секцій в одному ряді.

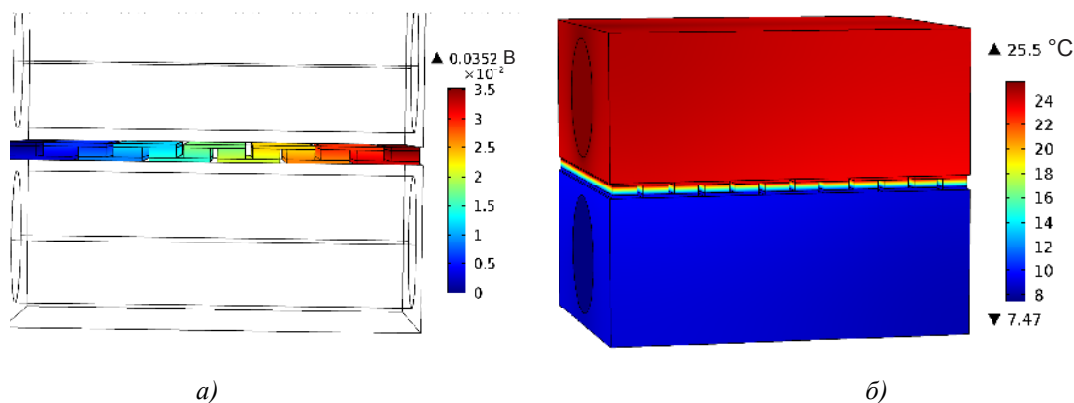


Рис. 4. Типовий розподіл температур а) та електричного потенціалу б) в блок-секції.

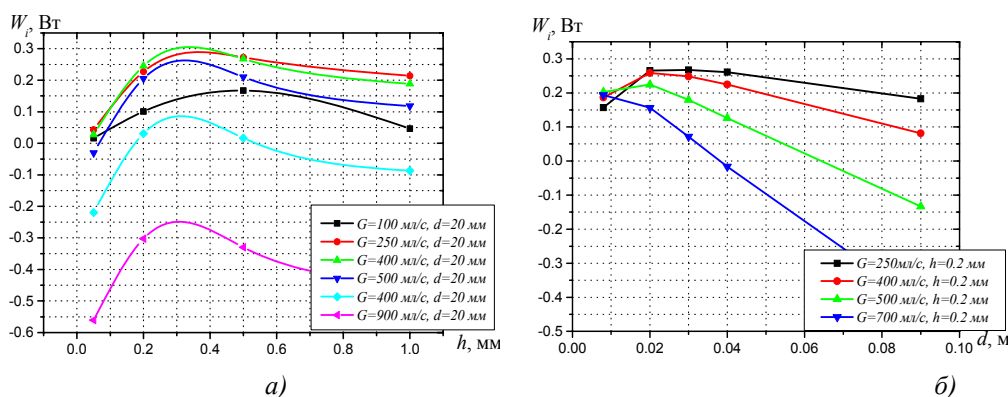


Рис. 5. а) залежність вихідної потужності (17) від висоти віток h за оптимального d , б) залежність вихідної потужності від витрати теплоносія G за оптимальної h .

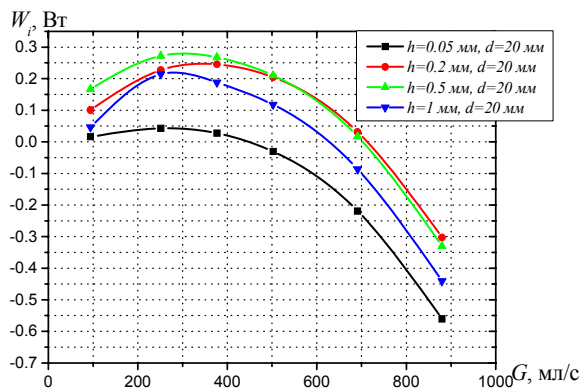


Рис. 6. Залежність вихідної потужності від діаметра каналу d за оптимальної h .

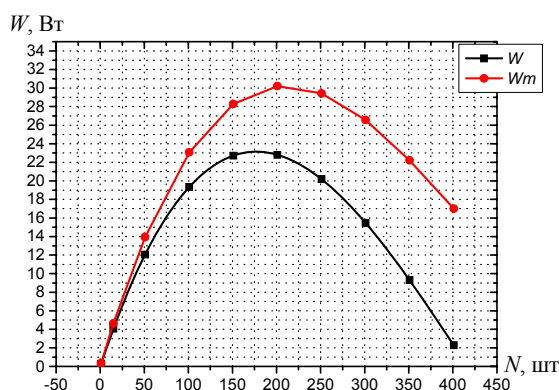


Рис. 7. Залежність потужності всіх модулів (22) та вихідної потужності (23) від кількості блок-секцій в одному ряді.

З графіків бачимо такі оптимуми:

- висота вітки $h_{opt}^* = 0.35$ мм;
- витрата теплоносіїв $G_{opt} = 300$ мл/с;
- діаметр каналу $d_{opt} = 20$ мм;
- кількість блок-секцій в одному ряді $N = 175$ шт.

Ці результати отримані для термоелемента з шириною вітки $b = 12$ мм. Для того, щоб підвищити потужність за рахунок збільшення площі контакту теплообмінника з модулем та зменшення впливу контактного опору, треба збільшити ширину і висоту вітки пропорційно так, щоб термоелектричний матеріал повністю заповнював простір між теплообмінниками. З дальшим збільшенням ширини вітки необхідно відповідно збільшувати ширину теплообмінника. Моделювання показало, що оптимум досягається за ширини вітки $b_{opt} = 50$ мм та відповідної висоти $h_{opt} = 1.5$ мм (рис.8).

У результаті розрахунку моделі з остаточними оптимальними параметрами $h_{opt} = 1.5$ мм, $b_{opt} = 50$ мм, $G_{opt} = 300$ мл/с, $d_{opt} = 20$ мм, $N = 175$ шт отримано такі енергетичні характеристики одного ряду блок-секцій:

- вихідна потужність $W_{max} = 42$ Вт;
- потужність модулів $Wm_{max} = 49$ Вт;
- напруга $U_N = 2.8$ В;
- струм $I = 17.5$ А;
- ККД генератора $\eta_{тер} = 0.76$ %;
- ККД модулів $\eta_m = 0.88$ %.

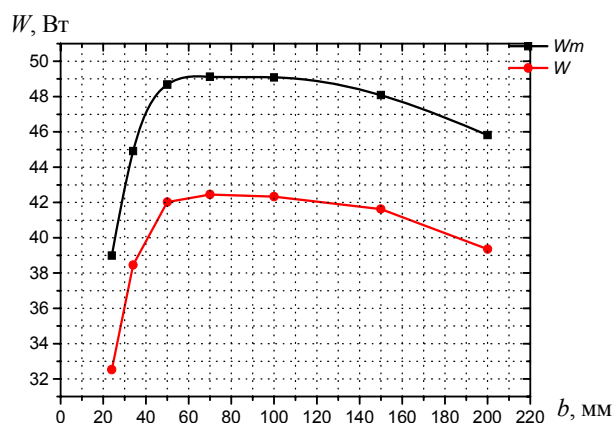


Рис.8. Залежність потужності всіх модулів (22) та вихідної потужності (23) від ширини вітки.

Розрахунок термоелектричної електростанції

Другий етап проектування електростанції полягає в розрахунку втрат потужності на прокачування води по трубопроводах та розрахунку кількості рядів ТЕГ, необхідної для досягнення потрібної потужності електростанції $W_{отес}$. Для цього треба розв'язати рівняння (27), що легко зробити в програмі Mathcad.

Розглянемо, для прикладу, електростанцію потужністю $W_{отес} = 100$ кВт електричної енергії. Один ряд модулів з урахуванням втрат потужності на прокачування теплоносія генерує 42 Вт електроенергії з витратою води 2×300 мл/с. Необхідно використати n рядів ТЕГ. Кожен насос повинен забезпечити витрату $G_v = n \cdot 300 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$.

Вихідні дані для обчислень:

- довжини трубопроводів $L_1 = 2000$ м, $L_2 = 200$ м, $L_3 = 20$ м;
- глибини опускання трубопроводів $H_1 = 1000$ м, $H_2 = 100$ м, $H_3 = 10$ м;
- коефіцієнти місцевого опору на входах в труби $\xi_{ex} = 0.5$, виходах з труб $\xi_{вих} = 1$, на згинах $\xi_z = 0.7$, на вхідних колекторах $\xi_{к.вх} = 1.2$, на вихідних колекторах $\xi_{к.вх} = 0.8$;
- діаметр трубопроводів $D = 2 \dots 10$ м.

На рис. 9 наведено результати розрахунку кількості рядів та втрат потужності на прокачування води по трубопроводах для електростанції потужністю $W_{отес} = 100$ кВт. З графіка видно, що за діаметрів, менших $D = 3$ м, втрати потужності на прокачування води та кількість рядів ТЕГ значно зростають. Встановлення трубопроводів з більшими діаметрами ускладнює через збільшення механічних навантажень на трубу та її вартості.

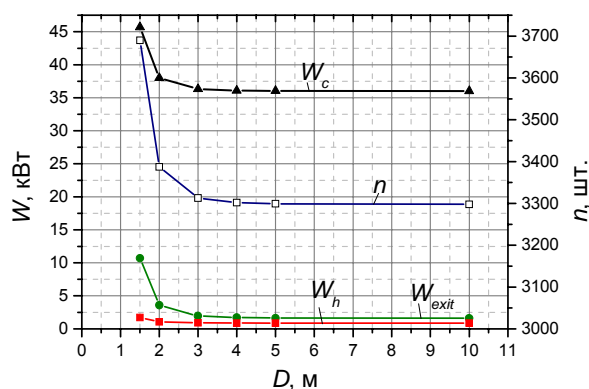


Рис. 9. Залежність кількості рядів ТЕГ та втрат потужності на прокачування води по трубопроводах від діаметра трубопроводів.

Зробивши обчислення для $D = 3$ м, отримаємо, що необхідна кількість рядів модулів становить $n=3313$; потужності, які треба затратити на прокачування $W_e = 36.31$ кВт, $W_h = 1$ кВт та $W_{exit} = 1.94$ кВт; потужність, яка генерується термоелектричними модулями – 162.3 кВт; потужність, яка споживається на прокачування теплоносіїв в каналах ТЕГ – 23.1 кВт; ККД електростанції – 0.54%.

Не складно порахувати, що з вартістю термоелектричного модуля 3\$ (за умов масового виробництва), вартістю матеріалу теплообмінника 2.5 \$/кг, вартістю трубопроводів 60 \$/м, насосів 0.45 \$/Вт, інвертора 0.1 \$/Вт та інших витрат 10% [2] питомі капіталовкладення в таку установку становитимуть до 25 \$/Вт. Для порівняння такі ж питомі капіталовкладення вкладають у теплові машини потужністю 6 МВт [2]. Ціна на електроенергію, з витратами на обслуговування 10% становить 0.15 – 0.3 \$/кВт·год. Таким чином, термоелектричні ОТЕС можуть мати перевагу над

тепловими машинами в області низьких потужностей, оскільки вони менш чутливі до масштабного фактора.

Крім того, питома вартість сонячних електростанцій з усіма елементами їх конструкції коливається від 3 \$/Вт до 6 \$/Вт [11]. Якщо врахувати, що коефіцієнт використання потужності упродовж доби в сонячних електростанціях 20% [12], а в ОТЕС – 100%, то можна вести мову про можливість конкуренції цих технологій.

Висновки

1. Розроблено метод проектування термоелектричних ОТЕС.
2. Визначено оптимальні параметри одного ряду блок-секцій ТЕГ, за яких досягається максимальна генерована потужність $W_{\max} = 42$ Вт з урахуванням втрат на власні потреби: висота вітки $h_{\text{opt}} = 1.5$ мм, ширина вітки $b_{\text{opt}} = 50$ мм, витрата теплоносія $G_{\text{opt}} = 300$ мл/с, діаметр каналу теплообмінника $d_{\text{opt}} = 20$ мм, кількість блок-секцій в одному ряду ТЕГ $N = 175$ шт.
3. Здійснено розрахунок електростанції потужністю 100 кВт, визначено, що питомі капіталовкладення в установку будуть становити 25 \$/Вт, а ціна на електроенергію 0.15 – 0.3 \$/кВт·год.

Література

1. Benson D.K., Jayadev T.S., Thermoelectric energy conversion // Proc.3-rd Int. Conf. Thermoel. Convers. Arlington, Tex.,1980, N.Y.,1980.– P.27-56.
2. Luis A. Vega, Ph.D., Economics of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC): An Update // Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 3–6 May 2010.
2. Лобунець Ю.М., Термоелектрика і океан / Ю.М. Лобунець // Термоелектрика.- 2014, №3.- с. 82 – 86.
3. Кин-ичи Уемура, История развития термоэлектричества в Японии // Термоэлектричество.-2002. 5. Matsuura K., Rowe D.M., Koumoto K., Min G. Tsuyoshi A., Design optimization for a large scale, low temperature thermoelectric generator // Proc. Of the 11 Int. Conf. onThermoel. 1992, USA, Texas, Arlington.– P.10-16.
4. Bohn, Benson, Jayadev. Thermoelectric OTEC. // Journal of Solar Energy Engineering.-1980.-vol. 102.- p. 119-127.
5. J. Henderson. Analysis of a heat exchanger - thermoelectric generator system. // 14th intersociety energy conversion engineering conference, Boston. - 1979.
6. Лобунець Ю.М., Оцінка характеристик ОТЕС з термоелектричним перетворювачем енергії / Ю.М. Лобунець // Термоелектрика. – 2013. – №1.– с. 62 – 67.
7. Michael V. Lurie. Modeling of Oil Product and Gas Pipeline Transportation, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008, p. 214
8. Вильнер Я.М. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Я.М. Вильнер // Высшая школа, 1976, 411 с.
9. International Renewable Energy Agency. Renewable energy technologies: cost analysis series. 2012 p., 46 с.
10. Economics of Renewable Energy Plants/
11. <http://www.greenrhinoenergy.com/renewable/context/economics.php>

Надійшла до редакції 17.04.2015