

УДК 620. 92; 537.32



Анатычук Л.И.

Анатычук Л.И., Поляк В.М.

Институт термоэлектричества НАН и МОН
Украины, ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина



Поляк В.М.

КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОТЕС

В работе разработан метод компьютерного проектирования термоэлектрических ОТЕС (Ocean thermal energy conversion), который позволяет провести оптимизацию электростанции по многим параметрам и учесть потери, которые имеют место при работе ОТЕС. Эффективность метода продемонстрировано на примере конкретной физической модели ОТЕС. Определены оптимальные параметры ТЭГ при которых достигается его максимальная генерированная мощность с учетом потерь на собственные нужды. Рассчитаны экономические показатели термоэлектрической ОТЕС мощностью 100 кВт: удельные капиталовложения – 25 \$/Вт, цена на электроэнергию – 0.15 – 0.3 \$/кВт·час, что подтверждает экономическую целесообразность подобных проектов.

Ключевые слова: термоэлектрический генератор, тепловая энергия океана, океаническая электростанция

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

Введение

Общая характеристика проблемы. Общеизвестно, что актуальным является создание эффективных возобновляемых источников электричества. Среди них все больший интерес вызывают источники, в которых используется низкопотенциальное тепло, вследствие его огромного количества, например, промышленные тепловые отходы, отходы от тепловых электростанций и прочее. Однако, наиболее масштабным, среди низкопотенциальных источников тепла, является мировой океан в котором перепады температуры достигают 20 – 25 °С между его поверхностью и слоями на глубине 1-2 км. Создание преобразователей энергии океана в электрическую – ОТЕС (Ocean thermal energy conversion) – может существенным образом содействовать решению проблемы обеспечения человечества электричеством. Фактически это преобразователи энергии солнца, однако ОТЕС может работать круглые сутки, что создает ряд принципиальных преимуществ. Такая привлекательная возможность побуждает к разработке электростанций, работающих на этом тепле.

Для реализации такой возможности ведутся разработки ОТЕС с использованием тепловых машин [1]. Их КПД может достигать 3%. Такой относительно низкий КПД не может стать принципиальным препятствием на пути к использованию ОТЕС, поскольку целесообразность их создания зависит, в первую очередь, не от КПД, а от его экономических показателей. В [2, 3] было установлено, что ОТЕС на основе тепловых машин могут конкурировать с солнечными электростанциями при мощностях больше 10 МВт. При меньших мощностях удельные капиталовложения возрастают. Поэтому маломощные ОТЕС экономически не целесообразны. Создание ОТЕС большой мощности также проблематично из-за значительных инвестиций при недостаточно определенных рисках.

Этого недостатка лишены термоэлектрические ОТЕС, поскольку они почти нечувствительны к масштабному фактору, чем и обусловлен повышенный к ним интерес.

В 1980 – 1982 гг. в Японии компанией Kawasaki Heavy Industries был впервые изготовлен термоэлектрический генератор (ТЭГ) для ОТЕС [4]. Им экспериментально подтверждена возможность получения электрической энергии при малых перепадах температуры. В генераторе были использованы обычные модули охлаждения. Результаты оптимизации модулей и ТЭГа не приведены.

В работе [5] описаны результаты теоретических и экспериментальных исследований конструкции ТЭГ для малых перепадов температур, в том числе и для океанического перепада. Оптимизация проводилась с целью достижения максимального КПД. Расчеты проводились без учета потерь на перекачку холодной воды с глубины океана и горячей воды с поверхности океана к ТЭГ.

В работах [1, 6, 7] приведены результаты оптимизации термоэлектрической ОТЕС для достижения максимальной мощности. Сделаны расчеты удельных капиталовложений для ОТЕС мощностью 400 МВт, установлено, что они близки к капиталовложениям ОТЕС, содержащих тепловую машину. Последнее является убедительным подтверждением целесообразности использования термоэлектрических генераторов в ОТЕС при малых мощностях. При этом учтены затраты электрической энергии на перекачку холодной воды с глубины океана и не учтены потери от перекачки теплой воды с поверхности океана.

В работе [8] проведены расчеты термоэлектрического ОТЕС мощностью 100 кВт. Получена стоимость электрической энергии около 0.15 \$/кВт·час, что подтверждает целесообразность использования термоэлектрического ОТЕС сниженных мощностей.

Однако проектирование таких ОТЕС довольно громоздкое из-за необходимости оптимизации ряда элементов их конструкции. Приведенные выше результаты получены путем прямых математических расчетов, которые становятся все менее продуктивными при увеличении количества переменных, по которым осуществляется оптимизация ОТЕС. Поэтому для дальнейшего прогресса этого направления важным является переход к компьютерному моделированию термоэлектрических ОТЕС. Ниже приводятся основные подходы при таком моделировании и результаты компьютерного проектирования для конкретной физической модели ОТЕС.

Физическая модель термоэлектрической ОТЕС

Общая модель термоэлектрической ОТЕС мощностью $W_{ОТЕС}$ приведена на рис. 1, а. Она состоит из термоэлектрического генератора (ТЭГ) 1 и трубопроводов для горячей 2, смешанной 3 и холодной 4 воды, длина которых L_1 , L_2 и L_3 соответственно, с глубинами опускания H_1 , H_2 и

H_3 соответственно. Внешняя поверхность трубопровода для холодной воды теплоизолирована. Вода по трубам прокачивается двумя насосами: 5 – мощностью W_{hp} для горячей воды, 6 – мощностью W_{cp} для холодной воды. Модель ТЭГ приведена на рис.1, б. Она состоит из рядов термоэлектрических модулей 7, размещенных между горячими 8 и холодными 9 теплообменниками в виде труб, прямоугольной формы извне. Причем в соседних теплообменниках протекает вода с одинаковой температурой. Горячая и холодная вода попадает к теплообменникам через входные коллекторы 10 и 11, вытекает из теплообменников через коллекторы 12 и 13.

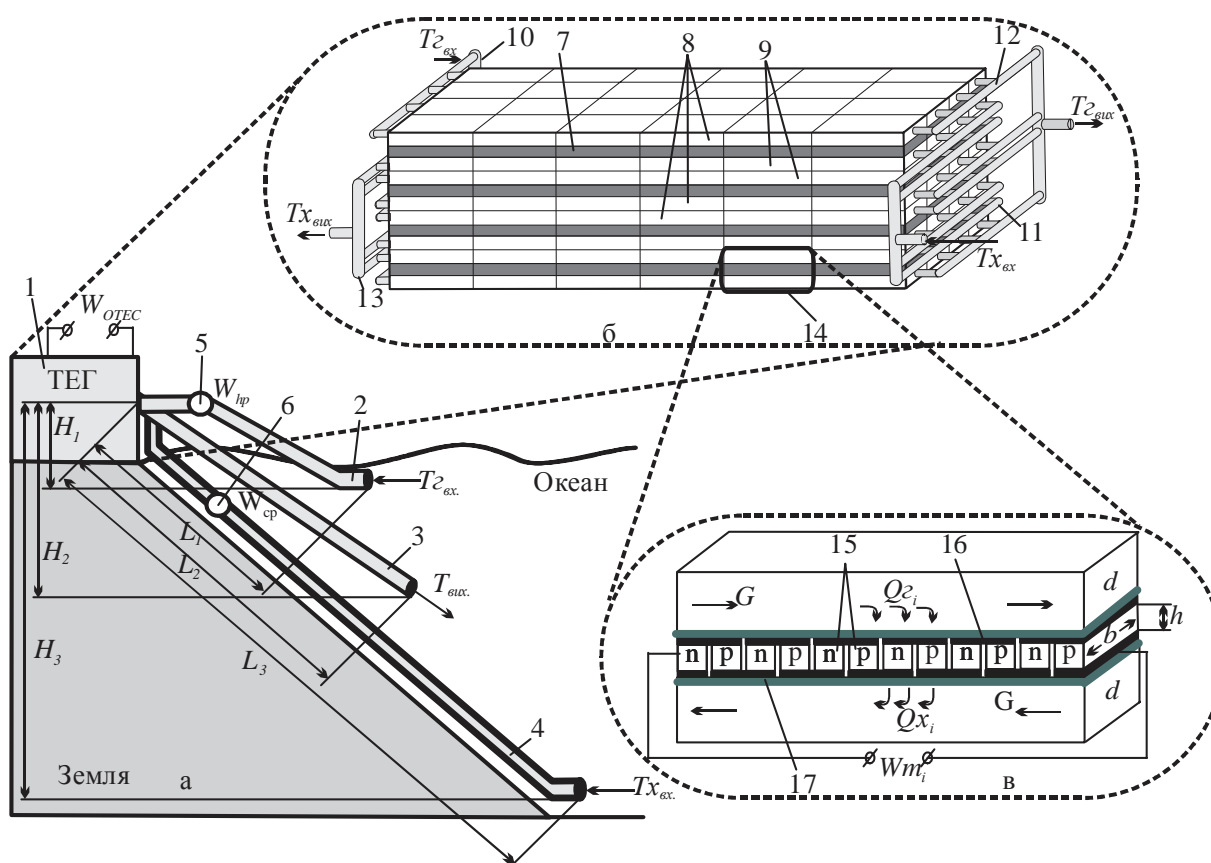


Рис. 1. Физическая модель термоэлектрической ОТЕС: А – термоэлектрическая ОТЕС; В – ТЭГ; С – блок-секция ТЭГ.

Модель ТЭГ удобно описать тождественными блок-секциями 14. Они состоят из одного модуля, размещенного между горячим и холодным теплообменниками. Каждый ряд ТЭГ содержит N блок-секций. ТЭГ составляется из n рядов.

На рис. 1, в приведена модель блок-секции ТЭГ. В ней термоэлектрический модуль составляется из вевей n - и p -типа 15, высотой h , длиной a и шириной b , коммутационных пластин 16 и электроизолирующей керамической пластины 17. Внутренняя форма теплообменников определяется эффективным диаметром d . Модулем генерируется мощность Wm_i , которая равна разности между тепловой мощностью, поступившей к модулю от горячего теплоносителя Q_{z_i} , и тепловой мощностью, отданной холодному теплоносителю Q_{x_i} .

На мощность ТЭГ влияют следующие параметры:

- длина трубопроводов L_1, L_2 и L_3 ;

- глубина опускания трубопроводов H_1, H_2 и H_3 ;
- диаметр трубопроводов D ;
- температура входной горячей воды $T_{г.вх.}$;
- температура входной холодной воды $T_{х.вх.}$;
- количество рядов ТЭГ n ;
- количество блок-секций в одном ряду N ;
- длина блок-секции l ;
- коэффициенты местного сопротивления ξ на входах и выходах из труб и на коллекторах;
- КПД насосов η ;
- затрата теплоносителей в одном ряду G ;
- эффективный диаметр каналов теплообменника d ;
- толщина стенки теплообменника x ;
- высота ветвей термоэлектрического модуля h ;
- ширина ветвей термоэлектрического модуля b ;
- длина ветвей термоэлектрического модуля a ;
- расстояние между ветвями l_1 ;
- толщина коммутационных пластин h_1 ;
- толщина керамических пластин h_2 .

Параметрами, подлежащими оптимизации в такой модели, являются G, d, h, b, N . Остальные параметры во время оптимизации задаются как исходные данные. Имея оптимальные значения параметров, можно определить количество рядов ТЭГ n , которое необходимо для построения электростанции заданной мощности.

Математическое описание модели.

Для описания потоков тепла и электричества воспользуемся законами сохранения энергии

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

и электрического заряда

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

где

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

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

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

Здесь \vec{E} – плотность потока энергии, \vec{q} – плотность теплового потока, \vec{j} – плотность электрического тока, U – электрический потенциал, T – температура, α, σ, κ – коэффициенты термоЭДС, электропроводности и теплопроводности.

Учитывая (3) – (5), можно получить

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

Тогда законы сохранения (1), (2) приобретают вид:

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

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

Этими нелинейными дифференциальными уравнениями второго порядка в частных производных (7) и (8) определяются распределения температуры T и потенциала U в термоэлементах.

Уравнение, описывающее процесс переноса тепла в стенках теплообменников в стационарном случае, записывается следующим образом:

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

где k_1 – коэффициент теплопроводности стенок теплообменника, ∇T_1 – градиент температуры, Q_1 – тепловой поток.

Процессы тепло-массо обмена теплоносителей в каналах теплообменников в стационарном случае описываются уравнениями [9]

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

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

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

где p – давление, ρ – плотность теплоносителя, A – поперечное сечение трубы, \vec{F} – сумма всех сил, C_p – теплоемкость теплоносителя, T_2 – температура, \vec{v} – вектор скорости, k_2 – теплопроводность теплоносителя, f_D – коэффициент Дарси, $d = \frac{4A}{Z}$ – эффективный диаметр, Z – периметр стенки трубы, Q_2 – тепло, которое выделяется за счет вязущего трения [Вт/м] (из единицы длины теплообменника), Q_{wall} – тепловой поток, поступающий от теплоносителя к стенкам трубы [Вт/м]

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

где h – коэффициент теплоотдачи, который определяется из уравнения

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

Для определения числа Нуссельта используется уравнения Gnielinski ($3000 < Re < 6 \cdot 10^6$, $0.5 < Pr < 2000$)

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

где $Pr = \frac{C_p \mu}{k_2}$ – число Прандтля, μ – динамическая вязкость, $Re = \frac{\rho v d}{\mu}$ – число Рейнольдса.

Для определения коэффициента Дарси f_D используем уравнение Churchill для всего спектра числа Рейнольдса и всех значений e/d (e – шероховатость поверхности стенки)

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

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

Решая уравнения (7) – (12) мы получим распределения температур, электрического потенциала (для термоэлементов), скоростей и давления (для теплоносителя).

Целевой функцией во время оптимизации блок-секции является исходная мощность (мощность модуля с учетом потерь на прокачку теплоносителей в теплообменниках), которую находят по формуле:

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

где

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

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

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

Здесь Wn_{hot} , Wn_{cold} – мощности, которые затрачиваются на прокачку горячего и холодного теплоносителей соответственно, ΔU – разность потенциалов между крайними коммутациями блок-секций, R – сопротивление электрической нагрузки, r – сопротивление термоэлементов, Δp_h , Δp_c – гидравлическое сопротивление горячего и холодного теплообменников (перепад давлений в трубе), η – КПД насоса.

Коэффициент полезного действия модуля можно рассчитать по формуле

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

Мощность всех модулей в ряду и исходная мощность одного ряда ТЭГ определяются согласно формулам

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

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

После проведения оптимизации геометрических размеров блок-секции, определения мощности и КПД оптимальной блок-секции, можно найти количество рядов ТЭГ n , необходимое для построения электростанции мощностью $W_{отес}$. Для этого воспользуемся уравнением

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

КПД электростанции определяется по формуле

$$\eta_{отес} = \frac{W_{отес}}{n \cdot N \cdot Q_{\Sigma i}}. \quad (25)$$

Мощность, потребляемую насосами, можно определить согласно формулам

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

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

Мощность, которую необходимо затратить для прокачки воды трубопроводами, в общем случае исчисляется по формуле [10]:

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

где G_v – затраты воды во всех рядах ТЭГ (в случае трубы для смешанной воды она в 2 раза больше), ρ – средняя плотность воды, ρ_1, ρ_2 – плотности холодной и горячей воды соответственно, g – ускорение свободного падения, H – высота, на которую надо поднять жидкость, $\lambda = \frac{0.316}{\sqrt[4]{Re}}$ – коэффициент гидравлического трения, D – диаметр трубы, L – длина

трубы, ξ – коэффициент местного сопротивления (учитывает местные сопротивления на входах и выходах из труб и на коллекторах 10 – 13), S – площадь поперечного сечения трубы,

$Re = \frac{4\rho G_v}{\mu\pi D}$ – число Рейнольдса.

Компьютерная модель блок-секции ТЭГ

Проектирование термоэлектрической электростанции состоит из двух частей:

- 1) оптимизации одного ряда блок-секций ТЭГ;
- 2) расчет термоэлектрической электростанции.

Для решения первой части задачи целесообразно использовать метод конечных элементов, который может быть реализован в программной среде Comsol Multiphysics. Этот метод позволяет решить дифференциальные уравнения (6) – (12) для различных значений параметров (G, d, h, b, N) ТЭГ. Среди этих параметров можно выбрать такие, при которых функция исходной мощности ТЭГ (17) будет достигать максимального значения.

Рассмотрим построение компьютерной модели блок-секции ТЭГ на примере ТЭГ с теплообменниками круглой формы внутри. Выбор такой формы теплообменников обусловлен тем, что они имеют на 15% меньшее гидравлическое сопротивление чем теплообменники прямоугольной формы. Это определено с помощью компьютерного моделирования в Comsol двух труб одинаковой длины и поперечного сечения. Результаты приведены на рис. 2.

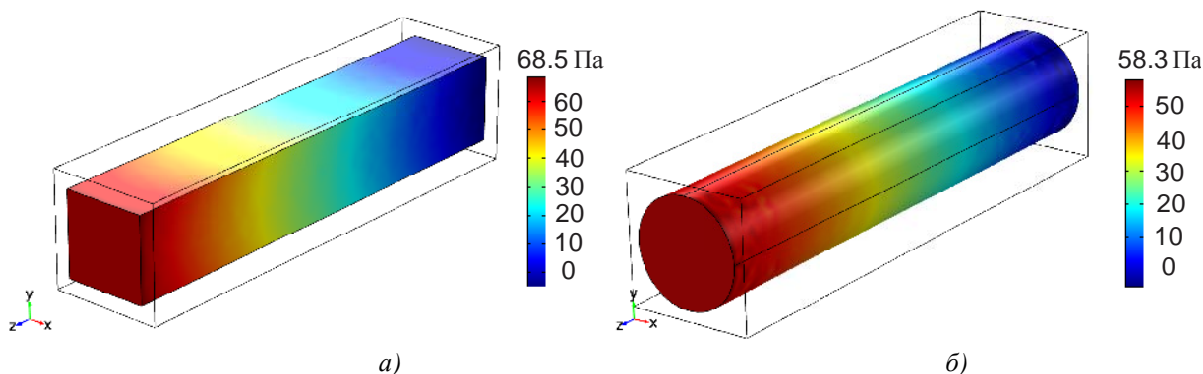


Рис.2. Перепад давления в трубе прямоугольной (а) и круглой (б) формы внутри.

На рис. 3. изображена геометрия и сетка конечных элементов, построенные в Comsol, для моделирования термоэлектрической блока-секции. Исходные данные:

- длина блок-секции $l = 60$ мм;
- КПД насосов $\eta = 80$ %;
- толщина стенки теплообменника $x = 2$ мм;
- длина ветвей термоэлектрического модуля $a = 4$ мм;
- расстояние между ветвями $l_1 = 1$ мм;
- толщина коммутационных пластин $h_1 = 0.5$ мм;
- толщина керамических пластин $h_2 = 0.5$ мм.

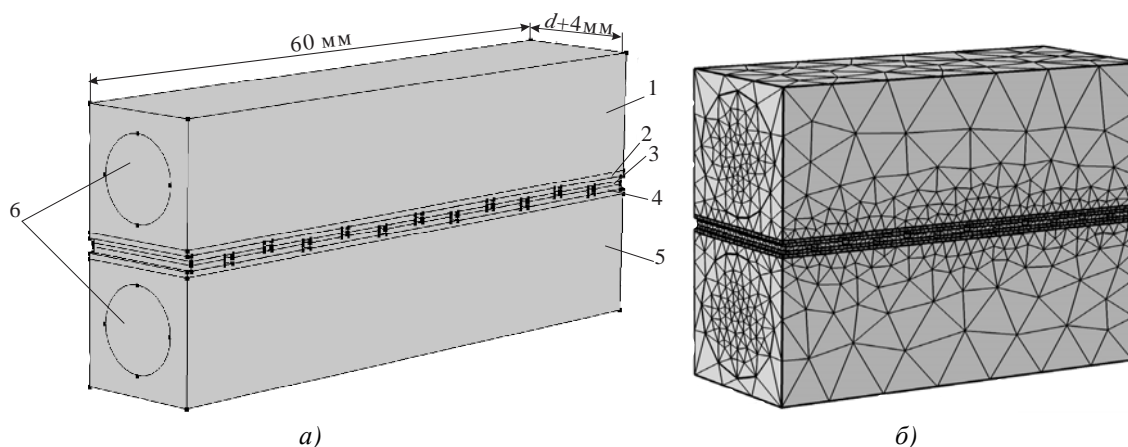


Рис. 3. Геометрия (а) и сетка (б), построенные в Comsol для блок-секции ТЭГ:
1 – горячий теплообменник; 2 – керамическая пластина; 3 – термоэлектрический материал;
4 – коммутационная пластина; 5 – холодный теплообменник;
6 – каналы диаметром d с теплоносителем.

Материал теплообменников – алюминий. Материал коммутаций – медь. Модель учитывает контактное и коммутационное сопротивление термоэлементов. Контактное сопротивление равно 10^{-5} Ом·см². Чтобы учесть температурную зависимость α , σ , κ термоэлектрического материала *Bi-Te* *n*- и *p*-типа, они заданы в виде полиномов, полученных по экспериментальным данным. Исходная мощность рассчитывалась в режиме согласованной нагрузки ($R = r$).

Диапазон изменения параметров для моделирования:

- диаметр канала $d = 2 \dots 140$ мм;
- высота ветви $h = 0.04 \dots 10$ мм;
- ширина ветви $b = 12 \dots 200$ мм;
- затрата теплоносителей $G = 1 \dots 2000$ мл/с;
- количество блок-секций $N = 1 \dots 400$ шт.

Начальные условия для моделирования:

- температура горячей воды на входе $T_h = 29$ °С;
- температура холодной воды на входе $T_c = 4$ °С;
- затрата теплоносителей на входах в каналы G ;
- давление на выходах из каналов $p = 0$ Па;
- электрический потенциал на первой коммутации $U = 0$ В;
- на всех других границах наложены условия тепловой и электрической изоляции.

Результаты компьютерного моделирования

На рис. 4 изображены типичные распределения температуры и электрического потенциала в блоке-секции.

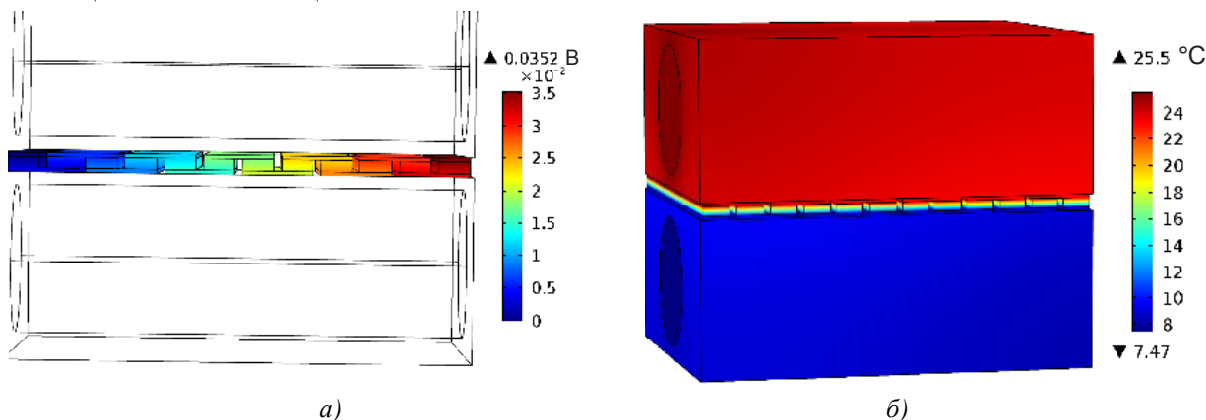


Рис. 4. Типичное распределение температур (а) и электрического потенциала (б) в блоке-секции.

На рис. 5, 6 изображена серия зависимостей исходной мощности (17) от высоты ветвей h при оптимальном d , затраты теплоносителя G при оптимальной h и диаметре канала d при оптимальной h ($b = 12$ мм).

На рис.7 изображены результаты оптимизации по количеству блок-секций в одном ряду.

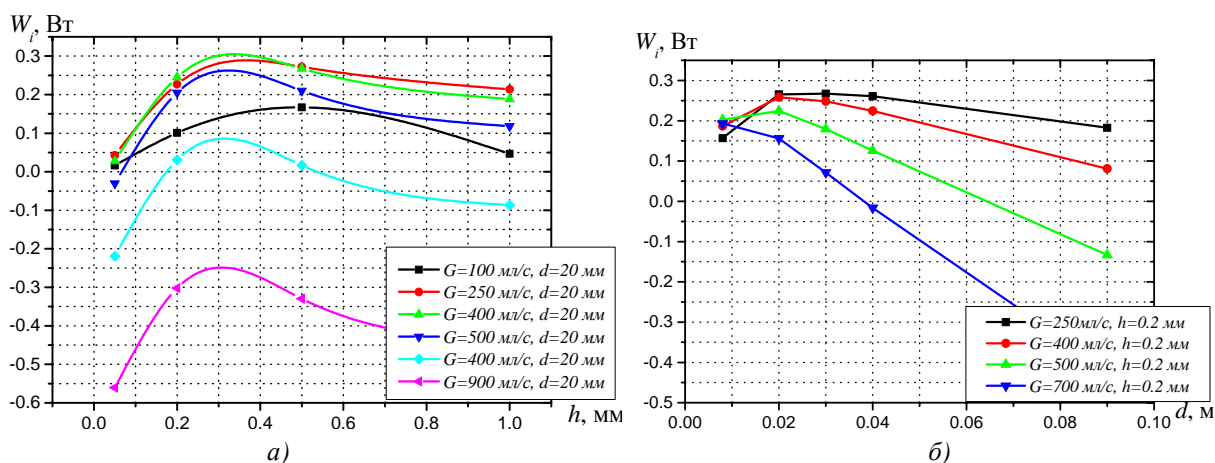


Рис. 5. а) Зависимость исходной мощности (17) от высоты ветвей h при оптимальном d ,
б) Зависимость исходной мощности от затраты теплоносителя G при оптимальной h .

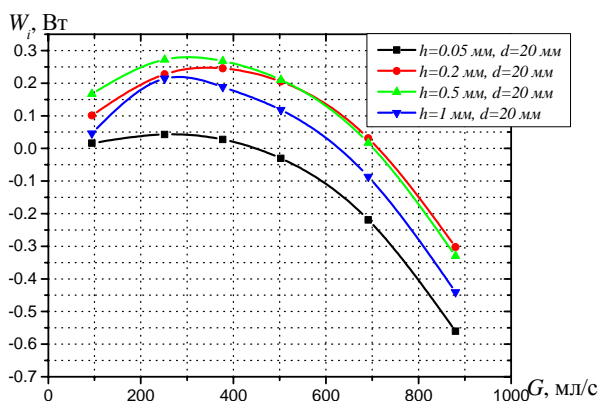


Рис. 6. Зависимость исходной мощности от диаметра канала d при оптимальной h .

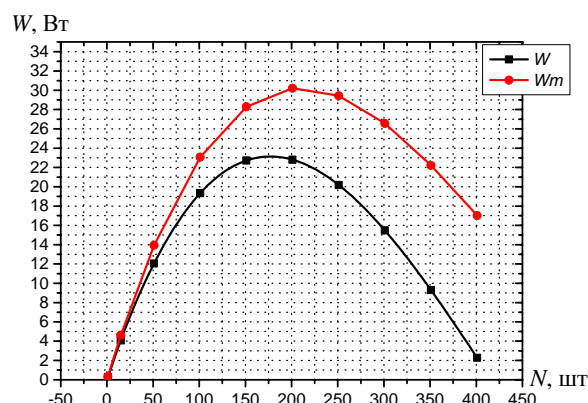


Рис. 7. Зависимость мощности всех модулей (22) и исходной мощности (23) от количества блок-секций в одном ряду.

Из графиков видим такие оптимумы:

- высота ветви $h_{opt} = 0.35$ мм;
- затрата теплоносителей $G_{opt} = 300$ мл/с;
- диаметр канала $d_{opt} = 20$ мм;
- количество блок-секций в одном ряду $N = 175$ шт.

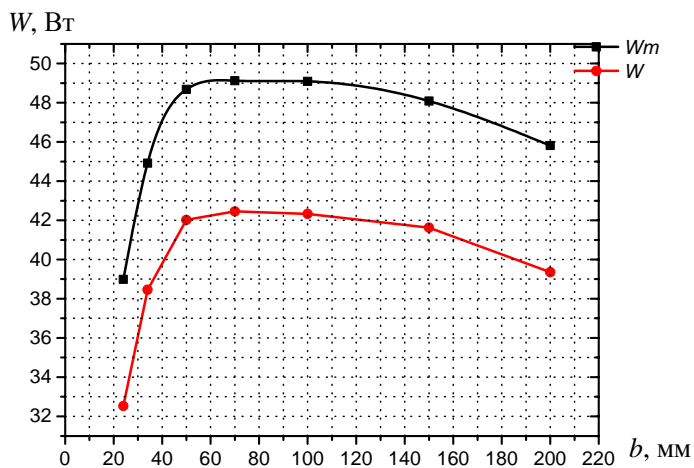


Рис. 8. Зависимость мощности всех модулей (22) и выходной мощности (23) от ширины ветви.

Эти результаты получены для термоэлемента с шириной ветви $b = 12$ мм. Для того, чтобы повысить мощность, за счет увеличения площади контакта теплообменника с модулем и уменьшения влияния контактного сопротивления, следует увеличить ширину и высоту ветви пропорционально так, чтобы термоэлектрический материал полностью заполнял пространство между теплообменниками. При дальнейшем увеличении ширины ветви необходимо соответственно увеличивать ширину теплообменника. Моделирование показало, что оптимум достигается при ширине ветви $b_{opt} = 50$ мм и соответствующей высоте $h_{opt} = 1.5$ мм (рис. 8).

В результате расчетов модели с окончательными оптимальными параметрами $h_{opt} = 1.5$ мм, $b_{opt} = 50$ мм, $G_{opt} = 300$ мл/с, $d_{opt} = 20$ мм, $N = 175$ шт получены такие энергетические характеристики одного ряда блок-секций:

- исходная мощность $W_{max} = 42$ Вт;
- мощность модулей $W_{mmax} = 49$ Вт;
- напряжение $U_N = 2.8$ В;
- ток $I = 17.5$ А;
- КПД генератора $\eta_{ТЭГ} = 0.76\%$;
- КПД модулей $\eta_m = 0.88\%$.

Расчеты термоэлектрической электростанции

Второй этап проектирования электростанции состоит в расчете потерь мощности на прокачку воды по трубопроводам и расчетах количества рядов ТЭГ, необходимых для достижения заданной мощности электростанции $W_{ОТЕС}$. Для этого надо решить уравнение (27), что легко сделать в программе Mathcad.

Рассмотрим, для примера, электростанцию мощностью $W_{ОТЕС} = 100$ кВт электрической энергии. Один ряд модулей с учетом потерь мощности на прокачку теплоносителя генерирует 42 Вт электроэнергии при затрате воды 2×300 мл/с. Необходимо использовать n рядов ТЭГ. Каждый насос должен обеспечить затрату $G_v = n \cdot 300 \cdot 10^{-6}$ м³/с.

Исходные данные для вычислений:

- длины трубопроводов $L_1 = 2000$ м, $L_2 = 200$ м, $L_3 = 20$ м;
- глубины опускания трубопроводов $H_1 = 1000$ м, $H_2 = 100$ м, $H_3 = 10$ м;
- коэффициенты местного сопротивления на входах в трубы $\xi_{\text{вх}} = 0.5$, выходах из труб $\xi_{\text{вых}} = 1$, на сгибах $\xi_s = 0.7$, на входных коллекторах $\xi_{\text{к.вх}} = 1.2$, на выходных коллекторах $\xi_{\text{к.вых}} = 0.8$;
- диаметр трубопроводов $D = 2 \dots 10$ м

На рис. 9 приведены результаты расчетов количества рядов и потерь мощности, на прокачку воды по трубопроводам, для электростанции мощностью $W_{\text{ОТЕС}} = 100$ кВт. Из графика видно, что при диаметрах меньше $D = 3$ м, потери мощности на прокачку воды и количество рядов ТЭГ значительно возрастают. Установка трубопроводов с большими диаметрами усложняется из-за увеличения механических нагрузок на трубу, а также ее стоимости.

Произведя вычисления для $D = 3$ м, получим, что необходимое количество рядов модулей составляет $n = 3313$; мощности которые следует затратить на прокачку $W_c = 36.31$ кВт, $W_h = 1$ кВт и $W_{\text{exit}} = 1.94$ кВт, мощность, генерируемая термоэлектрическими модулями, – 162.3 кВт; мощность, потребляемая на прокачку теплоносителей в каналах ТЭГ – 23.1 кВт; КПД электростанции – 0.54%.

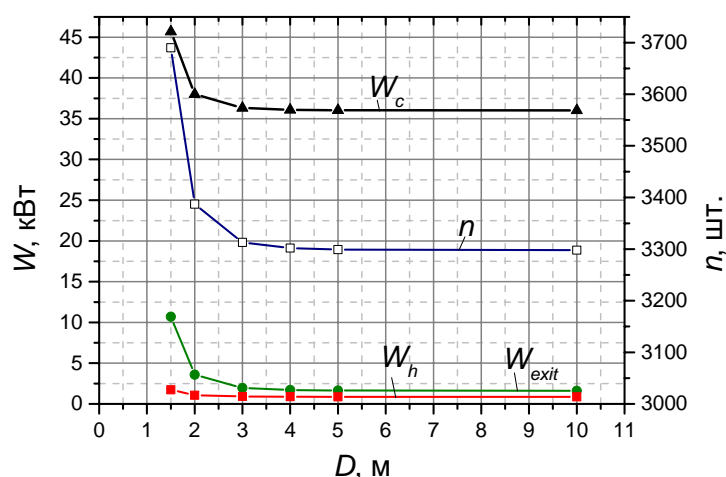


Рис. 9. Зависимость количества рядов ТЭГ и потерь мощности, на прокачивание воды по трубопроводам, от диаметра трубопроводов.

Несложно посчитать, что при стоимости термоэлектрического модуля 3 \$ (при условиях массового производства), стоимости материала теплообменника 2.5 \$/кг, стоимости трубопроводов 60 \$/м, насосов 0.45 \$/Вт, инвертора 0.1 \$/Вт и других затратах 10% [2], удельные капиталовложения в такую установку будут составлять до 25 \$/Вт. Для сравнения такие же удельные капиталовложения составляют в тепловые машины мощностью 6 МВт [2]. Цена на электроэнергию, при затратах на обслуживание 10%, составляет 0.15 – 0.3 \$/кВт·час. Таким образом, термоэлектрические ОТЕС могут иметь преимущество над тепловыми машинами в области низких мощностей, поскольку они менее чувствительны к масштабному фактору.

Кроме того, удельная стоимость солнечных электростанций со всеми элементами их конструкции колеблется от 3 \$/Вт до 6 \$/Вт [11]. Если учесть, что коэффициент использования мощности с течением времени в солнечных электростанциях 20% [12], а в ОТЕС – 100%, то можно говорить о возможности конкуренции этих технологий.

Выводы

1. Разработан метод проектирования термоэлектрических ОТЕС.
2. Определены оптимальные параметры одного ряда блок-секций ТЭГ, при которых достигается максимальная генерируемая мощность $W_{max} = 42$ Вт, с учетом потерь на собственные нужды: высота ветви $h_{opt} = 1.5$ мм, ширина ветви $b_{opt} = 50$ мм, затраты теплоносителя $G_{opt} = 300$ мл/с, диаметр канала теплообменника $d_{opt} = 20$ мм, количество блок-секций в одном ряду ТЭГ $N = 175$ шт.
3. Проведены расчеты электростанции мощностью 100 кВт, определено, что удельные капиталовложения в установку составят 25 \$/Вт, а цена на электроэнергию 0.15 – 0.3 \$/кВт·час.

Литература

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.
3. Лобунец Ю.М., Термоэлектричество и океан // Термоэлектричество. – 2014. – №3. – С. 82-86.
4. Кин-Ичи Уемура, История развития термоэлектричества в Японии // Термоэлектричество. – 2002. С. 22-26.
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.
6. Bohn, Benson, Jayadev. Thermoelectric OTEC. // Journal of Solar Energy Engineering. – 1980. – vol. 102. – P. 119-127.
7. J. Henderson. Analysis of a heat exchanger - thermoelectric generator system. // 14th intersociety energy conversion engineering conference, Boston. – 1979.
8. Лобунец Ю.М., Оценка характеристик ОТЕС с термоэлектрическим преобразователем энергии // Термоэлектричество. – 2013. – №1. – С. 62-67.
9. Michael V. Lurie. Modeling of Oil Product and Gas Pipeline Transportation, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA, Weinheim, 2008. – P. 214.
10. Вильнер Я.М. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам, Высшая школа, 1976. – 411 с.
11. International Renewable Energy Agency. Renewable energy technologies: cost analysis series, 2012 г. – 46 с.
12. Economics of Renewable Energy Plants/ <http://www.greenrhinoenergy.com/renewable/context/economics.php>

Поступила в редакцию 17.04.2015.