

П.А. Нестеренков*

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

*e-mail: stolknner@gmail.com

АВТОНОМНЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС С Λ - ФОТОМОДУЛЯМИ

Аннотация. Рассматривается технология преобразования солнечного излучения с помощью инновационных Λ -фотомодулей и коллектора с оптическим концентратором. Кремниевые фотоэлементы генерируют фототок и нагревают промежуточный теплоноситель до $\approx 65^{\circ}\text{C}$, который сбрасывает тепловую энергию в линейном теплообменнике расходуемой воде внешнего циркуляционного контура. С использованием экспериментальных данных по характеристикам фотоэлементов и двусторонних коллекторов разработан метод инженерного расчета удельной мощности инновационных Λ - фотомодулей и проведено компьютерное моделирование производительности когенерационных установок.

Ключевые слова: оптический концентратор, фотоэлементы, коллектор, Λ - фотомодуль, теплообменник, теплоноситель.

Введение. Теплофотоэлектрические установки с кремниевыми фотоэлементами содержат технологическое противоречие - необходимость поддержания одновременно низкой температуры фотоэлементов и получения высокой температуры теплоносителей. Противоречие устраняется с применением трехпереходных фотоэлементов с концентрацией солнца до 400-крат [1]. Прототип установки Dsolar Sunflower с высокой концентрацией излучения и трехпереходными фотоэлементами имеет удельную электрическую мощность $\approx 167 \text{ Вт/м}^2$ и тепловую $\approx 410 \text{ Вт/м}^2$ [2]. Установки с 200 кратной концентрацией солнца и трехпереходными фотоэлементами, тестируемые в институте Фраугофера (Германия), показали электрическую и тепловую эффективность $\approx 0,26$ и $\approx 0,53$ [3].

Технологии с высокой концентрацией излучения являются слишком сложными для практической реализации, а трехпереходные фотоэлементы требуют особых условий охлаждения с фильтрами тонкой очистки теплоносителей. Более бесперспективны установки с кремниевыми фотоэлементами и малой концентрацией излучения, например, фирмы Cogenra Solar (США), имеющие удельную мощность по электричеству $\approx 100 \text{ Вт/м}^2$, теплу $\approx 490 \text{ Вт/м}^2$ и стоимость удельных капитальных затрат $\approx 860 \text{ \$/м}^2$ [4]. Coventry показал возможность получения электрической и тепловой эффективности $\approx 0,11$ и $\approx 0,57$ с температурой теплоносителя на выходе $\approx 65^{\circ}\text{C}$ для фотомодуля (ФМ) при 30-и кратной оптической концентрации [5].

В данной работе рассматриваются вопросы повышения эффективности оптических концентраторов, снижения тепловых потерь излучением, транспортировки тепла к системе горячего водоснабжения и инженерных методов расчета удельной производительности.

Линейные коллекторы и ФМ с оптическими концентраторами.

Концепция технологии интенсивной когенерации заключается в концентрации солнечного излучения на фотоэлементах и генерации фототока и тепла при повышенной температуре с передачей соответственно химическим аккумуляторам и промежуточному теплоносителю с последующим сбросом в противоточном линейном теплообменнике

технической воде, транспортирующей тепловую энергию за счет естественной циркуляции к тепловому аккумулятору.

Во всех типоразмерах КУ содержит следящую за солнцем несущую конструкцию, зеркала оптического концентратора, ФМ и двусторонний коллектор, как показано на рисунке 1. По горизонтальной оси на экспериментальных графиках тепловой эффективности коллекторов нанесена разность между температурой коллектора t_f и окружающей среды t_{amb} , деленная на интенсивность излучения 1000 Вт/м^2 . Тепловая эффективность двустороннего коллектора (квадратные точки) составляет $\eta_T \approx 0,71$ и $\approx 0,68$ для температуры $t_f \approx 40^\circ\text{C}$ и 60°C . Пунктирными линиями изображены кривые тепловой эффективности ФМ, работающего в режиме линейного коллектора [5], и стандартного плоского коллектора Vitosol 100 [6].

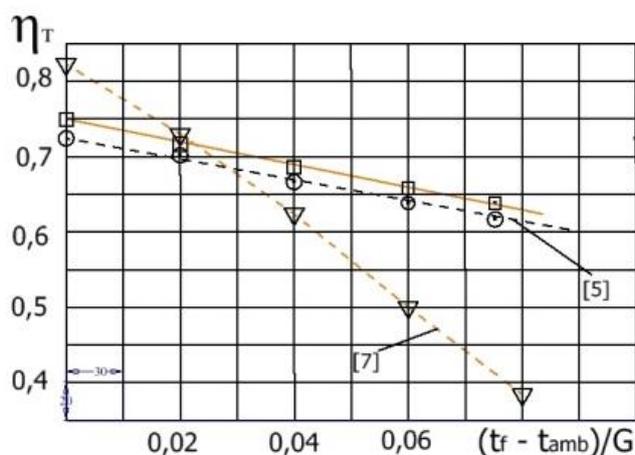


Рисунок 1. Дизайн КУ и кривая тепловой эффективности коллектора

С ростом температуры растут электрические потери и тепловые потери излучением со стенок. Проблема частично решается при использовании Λ -ФМ и фотоэлементов Махеон с малым внутренним сопротивлением. Эффективность фотоэлементов при нагреве снижается: $\eta_e \approx \eta_{e0} \cdot (1 - \frac{k_p \cdot \Delta t_j}{P_0})$, где Δt_j – разность между температурой фотоэлементов и температурой 25°C ; k_p – температурный коэффициент мощности $\approx -0,011 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$ [7].

Для определения характеристик фотоэлементов Махеон в условиях концентрации излучения были поставлены эксперименты, где в качестве имитатора солнца применялись галогеновые лампы КГ-1000 с фильтром в виде толстой пластины из оргстекла, а фотоэлемент Махеон крепился на медной пластине при температуре 25°C . Концентрация излучения варьировалась путем изменения расстояния от ламп до фотоэлемента. Вольт-амперная характеристика снималась в течение нескольких секунд, пока температура фотоэлемента не успевала измениться, что позволяло оценивать влияние только оптической концентрации на характеристики.

Во второй методике проводилась предварительная калибровка оптического тракта и измерительной системы с помощью фотоэлемента с известными характеристиками [8]. Оптическая концентрация варьировалась путем изменения количества галогеновых ламп КГ-1000, а процесс измерений не превышал 2,5 минуты. Температура воды на входе и выходе измерялась с помощью платиновых сопротивлений Pt-100, а температура фотоэлементов с помощью оптического пирометра. Электрические и теплофизические данные снимались при

стабилизации разности температуры теплоносителя между входом и выходом канала. Инструментальная погрешность измерений не превышала $\approx 3\%$.

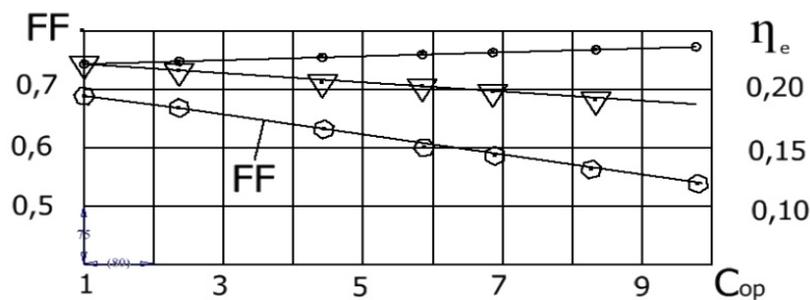


Рисунок 2. Эффективность и фил-фактор фотоэлементов Махеоп

На рисунке 2 представлены результаты измерений электрической эффективности и фил-фактора в виде кривых. Верхняя кривая получена при постоянной температуре фотоэлементов. Видно, что с ростом концентрации излучения эффективность фотоэлементов Махеоп увеличивается на единицы процентов. Это согласуется с выводами работы [9], в которой на основе теории Шокли получены выражения для определения пиковой мощности и эффективности фотоэлементов, работающих с концентрацией:

$$P^* = P_0 \cdot C_{оп} \cdot \left(1 + \frac{kT}{q} \cdot \frac{\ln C_{оп}}{V_{oc}}\right) \quad (1)$$

$$\eta_e^* = \eta_e \cdot \left(1 + \frac{kT}{q} \cdot \frac{\ln C_{оп}}{V_{oc}}\right) \cdot \frac{FF^*}{FF}, \quad (2)$$

где P^* и P_0 - мощность с концентрацией и без, Вт; $C_{оп}$ - оптическая концентрация; η_e^* и η_e - электрическая эффективность с концентрацией и без; T - температура, К; k - постоянная Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; q - заряд электрона, $1,6 \cdot 10^{-19}$ К; и FF^* и FF - фил-фактор с концентрацией и без; V_{oc} -напряжение холостого хода, В;

С ростом температуры и концентрации кривая эффективности (треугольные точки) падает, а величина фил-фактора линейно снижается, причем отношение $\frac{FF^*}{FF}$ падает до $\approx 0,78$ при $C_{оп} \approx 9,3$.

Оптимизация линейных фотомодулей. В инновационных Λ - ФМ фотоэлементы всегда закрыты от попадания града, поэтому исчезла необходимость в толстом защитном стекле и уменьшились оптические потери [10]. Теплообменник является источником тепла, а емкость с водой - потребителем, благодаря чему возникает градиент температуры в замкнутом циркуляционном контуре и естественная циркуляция воды. Плоские зеркала на пленках Alanod Silver с коэффициентом отражения $\approx 0,93$ [11] создают ≈ 9 -ти кратную концентрацию излучения, а фотоэлементы генерируют фототок $I \approx 40$ А. Падение напряжения в проводниках составляет: $I \cdot \rho \cdot l/S$, где ρ , S и l - удельное сопротивление, сечение и длина проводников. На клеммах блока аккумуляторов напряжение ≥ 29 В, откуда получаем базовое количество фотоэлементов на стенке $n \approx (29 + I \cdot \rho \cdot l/S)/0,57$ и их длину $L \approx n \cdot (b_f + \delta_1)$, где b_f и δ_1 - ширина фотоэлементов и расстояние между ними. Для компенсации суммарных температурных потерь напряжения в первый канал добавляются два фотоэлемента, во второй

шесть, в результате получаем основной габаритный размер - длину каналов: $L_1 \approx (n + 2) \cdot 0,042$ и $L_2 \approx (n + 6) \cdot 0,042$. Вдоль поверхности с периодическим смещением отраженного излучения размещается селективная пленка $TiNO_x$ с коэффициентом поглощения излучения $\beta \approx 0,94$.

Обозначая проекцию зеркал на горизонтальную ось b_k , и определяя из результатов компьютерного проектирования средний косинус угла наклона зеркал, получаем площадь апертуры КУ: $S = 2 \cdot (L_1 + L_2) \cdot b_k \cdot \cos \varphi_z$.

Метод инженерного расчета производительности КУ.

Преобразовывая (1) и (2), получаем аналитическое выражение для расчета пиковой электрической мощности:

$$P_j = 2 \cdot S_{fj} \cdot E_d \cdot \eta_{e0} \cdot \left[1 - \frac{k_F \Delta t_j}{P_0} \right] \cdot \left[\left(1 + \frac{k \Delta T_j}{q} \cdot \frac{\ln C_{op}}{V_{oc}} \right) \cdot \frac{FF^*}{FF} \cdot C_{op} + \left(1 + \frac{E_f}{E_d} \right) \right], \quad (3)$$

где P_j – пиковая мощность j – го канала; η_{e0} - паспортная эффективность фотоэлементов; Δt_j - разность между температурой фотоэлементов и температурой $25^{\circ}C$; $\Delta T_j = 273 + t_j$; E_d - интенсивность прямого солнечного излучения; S_{fj} - площадь массива фотоэлементов.

Баланс суммарной мощности, выделяемой на стенках инновационных Λ -ФМ при преобразовании солнечного излучения, имеет вид:

$$2 \cdot S_{Qj} \cdot E_d \cdot \left\{ \left[C_{op} + \left(1 + \frac{E_f}{E_d} \right) \right] + \frac{S_{pj}}{S_{fj}} \cdot \beta \cdot \left[C_{op} + \left(1 + \frac{E_f}{E_d} \right) \right] \right\} = \frac{Q_j}{\eta_{Tj}} + P_j, \quad (4)$$

где Q_j – полезная тепловая мощность; S_{Qj} - площадь фронтальных стенок; $\frac{S_{pj}}{S_{fj}} \approx 0,12$ - отношение площадей селективной пленки и массива фотоэлементов; η_{Tj} - тепловая эффективность.

Тепловое излучение Λ -ФМ с размещаемыми под углом друг к другу фронтальными стенками определяется из полученного в [12] выражения:

$$Q_{\Lambda} = \sum_1^n \Delta Q_i = 2 \cdot \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T_j}{100} \right)^4 \cdot S_{fj} \cdot \left(1 - \sum_1^{10} \frac{\psi_i}{\pi \cdot n} \cdot \cos^2 \vartheta_i \right), \quad (5)$$

где $C_0 \approx 5,67 \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$; T_j , S_{fj} и ε – соответственно температура, площадь и коэффициент черноты излучения фронтальной поверхности; ψ_i и ϑ_i - углы, учитывающие распределение теплового излучения вдоль стенок.

Произведение перед скобкой в (5) представляет собой поток теплового излучения тела площадью S_{fj} . Величина в скобках характеризует снижение тепловых потерь за счет взаимного экранирования стенок на $\approx 27\%$.

Восходящий воздушный поток вдоль горячих фронтальных стенок создает термическое сопротивление, дополнительно снижающее тепловые потери на $\approx 5\%$. В сумме снижение тепловых потерь достигает $\approx (27 + 5)\%$, а тепловая эффективность коллектора составляет: $\approx \eta_T + 0,32 \cdot (1 - \eta_{T0})$, где η_T - берем из верхней кривой на рисунке 1.

В последовательных каналах расход теплоносителя одинаков, поэтому решаем уравнения теплопередачи только для первого канала:

$$t_f - t = \eta_T \cdot C_{op} \cdot E_d \cdot [1 - \eta_e \cdot (1 + \frac{kT}{q} \cdot \frac{\ln C_{op}}{V_{oc}}) \cdot \frac{FF^*}{FF}] \cdot (\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}) \quad (6)$$

$$S_{Q_1} \cdot \eta_T \cdot E_d \cdot \left\{ C_{op} \cdot [1 - \eta_e \cdot (1 + \frac{kT}{q} \cdot \frac{\ln C_{op}}{V_{oc}}) \cdot \frac{FF^*}{FF}] + (1 + \frac{E_f}{E_d}) \cdot (1 - \eta_e) \right\} = C_p \cdot G \cdot \Delta t_K, \quad (7)$$

где t_f - средне интегральная температура фотоэлементов; t_{in} , t - входная и средняя температура теплоносителя; Δt_K , C_p , G - перепад температуры вдоль канала, удельная теплоемкость и расход теплоносителя; S_{Q_1} - площадь фронтальных стенок; α_1 - коэффициент теплоотдачи; δ_i и λ_i - толщина и теплопроводность герметика, оксидированного слоя и металлической стенки.

Используя равенство $\Delta t_K = 2 \cdot (t - t_{in})$, и преобразовывая (6) и (7) получаем аналитическое выражение для определения расхода, в кг/ч:

$$G = \frac{S_{Q_1} \cdot \eta_{T1} \cdot E_d \cdot \left\{ C_{op} \cdot [1 - \eta_{e1} \cdot (1 + \frac{kT}{q} \cdot \frac{\ln C_{op}}{V_{oc}}) \cdot \frac{FF^*}{FF}] + (1 + \frac{E_f}{E_d}) \cdot (1 - \eta_{e1}) \right\}}{C_p \cdot \left\{ (t_{f1} - t_{in1}) - \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right) \cdot \eta_{T1} \cdot C_{op} \cdot E_d \cdot [1 - \eta_{e1} \cdot (1 + \frac{kT}{q} \cdot \frac{\ln C_{op}}{V_{oc}})] \right\}} \quad (8)$$

Зная средне интегральную температуру фотоэлементов первого канала и расход теплоносителей, определяем температуру фотоэлементов второго канала из условия равенства расходов. После чего определяем пиковую электрическую и тепловую мощность второго ФМ из выражений (3) и (4). Таким образом, мы получили замкнутую систему уравнений для определения удельной пиковой мощности инновационных Л-ФМ.

Продемонстрируем разработанный метод инженерного расчета на примере определения удельной пиковой мощности прототипа КУ с оптическим концентратором из двенадцати зеркал и длиной каналов $L_1 \approx 2,40$ м и $L_2 \approx 2,57$ м. При площади фронтальных стенок $S_{Q1} \approx 0,720$ м² и $S_{Q2} \approx 0,771$ м² и площади апертуры концентраторов $S \approx 15,63$ м² геометрическая концентрация составляет: $K_g = \frac{S}{S_{Q1} + S_{Q2}} \approx 10,4$. Для коэффициента отражения зеркал $K_R \approx 0,93$ и коэффициента прохождения света через защитные стекла $K_D \approx 0,97$ величина оптической концентрации равна $C_{op} \approx K_g \cdot K_R \cdot K_D \approx 9,3$.

Для $\eta_{e0} \approx 0,21$ и температуре фотоэлементов $\approx 40^{\circ}\text{C}$ из (3) получаем: $P_1 = 0,97 \cdot E_d$. Подставляя в (8) $C_p \approx 1,161$ Вт·ч/кг·К, термическое сопротивление $(\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}) \approx 0,0024$ $\frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$, величину $\frac{FF^*}{FF} \approx 0,78$ и тепловую эффективность $\eta_{T1} \approx (\eta_{TK} - \eta_{TK} \cdot 0,11) \approx 0,71$, находим расход теплоносителя:

$$G \approx \frac{1,81 \cdot E_d}{(t_{f1} - 15) - 0,014 \cdot E_d} \quad (9)$$

В таблице 1 представлены климатические данные для Алматинской области [13]: среднемесячное количество солнечной энергии, поступающее на нормальную площадку $\sum E_d \cdot \tau$, кВт·ч/м²; количество солнечных дней в месяце m ; интенсивность прямого излучения солнца E_d на нормальную площадку, кВт/м².

Таблица 1. Данные метеостанции, $\phi_{IN} \approx 43^{\circ}$ северной широты.

месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\sum E_d \cdot \tau$	201	213	284	303	335	344	341	315	278	250	207	185
m	24	21	24	26	29	30	31	30	26	22	21	22
E_d	0.87	0.91	0.93	0.93	0.93	0.94	0.93	0.92	0.92	0.9	0.89	0.8

Табличное значение E_d следует умножать на величину среднего косинуса для двенадцати зеркал $\cos \varphi_z \approx 0,92$.

Из условия равенства расходов теплоносителя в последовательных каналах получаем трансцендентное уравнение с одним неизвестным, решая которое методом итераций, находим детерминированную температуру фотоэлементов второго канала $t_{f2} \approx 63^{\circ}\text{C}$. После чего, с применением (3) находим $P_2 \approx 0,82 \cdot E_d$ и далее - суммарную пиковую электрическую мощность: $(P_1 + P_2) \approx (0,97 + 0,82) \cdot E_d$. В итоге, получаем выражение для инженерного расчета пиковой удельной мощности прототипа: $\Pi_p = \frac{P_1 + P_2}{S} \approx 0,119 \cdot E_d \cdot \cos \varphi_z$. Электрическая эффективность прототипа достигает $\frac{0,119 \cdot E_d}{E_d + E_f} \approx 0,10$, что согласуется с результатом исследований Coventry [5].

На рисунке 4 для сравнения представлены графики удельной мощности для летнего и зимнего дня. Результаты математического моделирования показывают, что прототип с 12-ю зеркалами в летние месяцы выдает пиковую мощность $P_{\max} \approx 0,119 \cdot 0,86 \cdot 15,63 \approx 1,59$ кВт. Для более совершенных рыночных фотоэлементов с $\eta_{e0} \approx 0,25$ пиковая удельная мощность составит $\approx 0,133 \cdot E_d \cdot \cos \varphi_z$, а эффективность $\approx 0,11$.

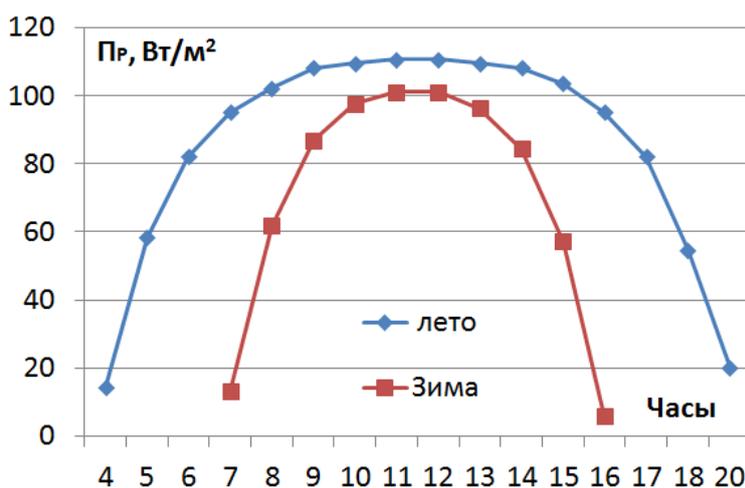


Рисунок 4. Удельная пиковая мощность прототипа КУ.

Подставляя в уравнения (4) площадь стенок каналов, электрическую мощность и тепловую эффективность находим: $(Q_1 + Q_2) \approx (5,34 \cdot E_d + 5,62 \cdot E_d) = 10,96 \cdot E_d$. В итоге, на широте инсталляции $\varphi_{IN} \approx 43^{\circ}$ для прототипа в летне-осенний период получаем удельную тепловую мощность $\Pi_Q = \frac{Q_1 + Q_2}{S_{A(1+2)}} \cdot E_d \approx 0,70 \cdot E_d$, кВт/м² и тепловую эффективность $\frac{0,70 \cdot E_d}{E_d + E_f} \approx 0,58$.

Ближайший зарубежный аналог КУ фирмы Cogenra Solar при десятикратной концентрации излучения на северной широте 35° имеет пиковую удельную мощность по электроэнергии и тепловой энергии $\approx 0,100$ кВт/м² и $\approx 0,490$ кВт/м².

На рисунке 5 представлены графики расчета среднемесячной пиковой удельной производительности по электроэнергии и тепловой энергии на широте инсталляции $\varphi_{IN} \approx 43^{\circ}$: $W_p \approx 0,119 \cdot \sum E_d \cdot \tau \cdot 0,77 \cdot \cos \varphi_z$ и $W_Q \approx 0,70 \cdot \sum E_d \cdot \tau \cdot 0,77 \cdot \cos \varphi_z$.

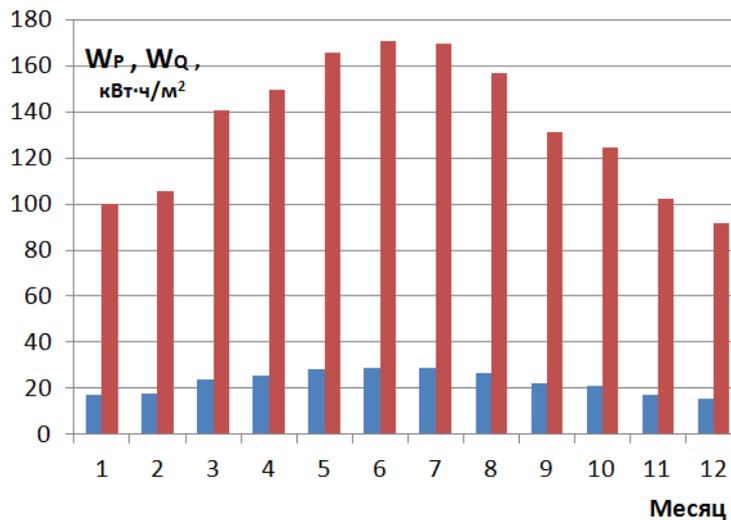


Рисунок 5. Среднемесячная удельная пиковая производительность КУ.

В линейном теплообменнике реализуется эффективный теплообмен жидкостей в режиме противотока и уровнем тепловых потерь $\leq 20\%$. Подпитка холодной воды из источника обеспечивает охлаждающую способность теплоносителей, т.е. стабилизацию входной температуры в каналах Λ -ФМ. Из уравнения теплового баланса находим пиковый расход технической воды при нагреве на 45 и 50°C , представленный на рисунке 6.

$$G_2 \approx \frac{0,8 \cdot (Q_1 + Q_2)}{C_{p1} \cdot (t_2 - t_1)}, \quad (12)$$

где G_2 , t_1 и t_2 – расход, входная и выходная температура воды в теплообменнике; C_{p1} – удельная теплоемкость воды, $\approx 1,159$ Вт·ч/кг·К.

Система управления поддерживает расход воды в интервале $100 - 140$ кг/ч в зависимости от времени года с помощью насосов подпитки холодной воды.

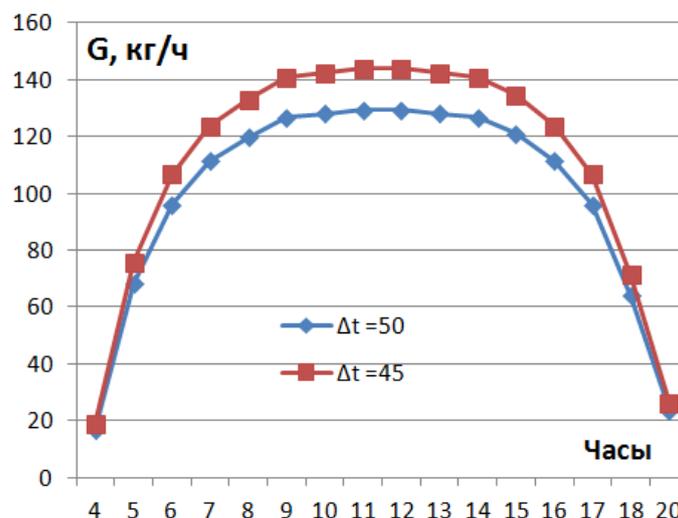


Рисунок 6. Пиковый расход технической воды.

С учетом количества суточной солнечной энергии, поступающей на апертуру, получаем дневное количество воды: $\frac{0,56 \cdot \sum_{\tau}(E_d \cdot 0,77 \cdot \cos \varphi_z \cdot \tau_1) \cdot S_A}{c_{p1} \cdot (t_2 - t_1)} \approx 1260$ кг летом и 819 кг зимой с температурой ≈ 60 °С.

В соответствии с требованиями стандарта горячего водоснабжения на одного человека приходится ≈ 100 литров/сутки воды при температуре ≈ 55 °С [14]. Для фермерской семьи с учетом хозяйственной деятельности требуется в день ≈ 950 литров воды. Расчеты показывают, что выделяемая фотоэлементами тепловая энергия полностью обеспечивает горячее водоснабжение летом, а в зимний период необходим дополнительный источник теплоснабжения – котел на твердом топливе.

Годовое количество энергии солнца, поступающее на 1 м² апертуры оптического концентратора, равно $\sum_{\tau}(E_d \cdot 0,77 \cdot \cos \varphi_z \cdot \tau_1) \approx 2306$ кВт·ч/м², откуда удельная производительность КУ по электроэнергии составляет: $0,119 \cdot \sum_{\tau}(E_d \cdot 0,77 \cdot \cos \varphi_z \cdot \tau_1) \approx 274$ кВт·ч/м² и по тепловой энергии ≈ 1600 кВт·ч/м².

Выводы. 1. Оптимальное сочетание концентрации излучения и интенсивности охлаждения фотоэлементов в инновационных Л-ФМ позволяет получать максимальную удельную мощность на единицу площади апертуры.

2. Увеличение площади отражаемого солнечного пятна при пошаговом слежении оптического концентратора за солнцем удачно компенсируется повышением тепловой эффективности и коэффициента использования материалов за счет размещения по периметру массива фотоэлементов селективной пленки.

3. Режим интенсивной когенерации дает возможность поднять уровень температуры, ускорить теплопередачу, повысить динамический напор и реализовать естественную циркуляцию воды в циркуляционном контуре теплообменника.

4. Метод инженерного расчета Л-ФМ позволяет определять удельную мощность, оптимальный состав оборудования и производительность КУ, обеспечивающих полное энергообеспечение удаленных потребителей.

Автор выражает благодарность Антощенко В.М. и Францеву Ю.В. за предоставленные материалы по измерениям эффективности фотоэлементов Махеоп с малой концентрацией излучения при температуре 25°С.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. Kribus, D. Raftori, G. Mittelman, A. Hirshfeld, Y. Flisanov, A. Dayan. A miniature concentrating photovoltaic end thermal system// *Energy Conversion and Management* 47 (2006), Pp. 3582-3590.
- [2] Источник: <https://newatlas.com/ibm-sunflower-hcpvt-pv-thermal-solar-concentrator> /33989/ (Дата обращения: 25.02.2019)
- [3] *Recent Advances in the Development and Testing of Hybrid PV-Thermal Collectors*. January 2011. DOI: 10.18086/swc.2011.28.06. (Дата обращения 25.11.2020)
- [4] Источник: <http://www.cogenra.com> (Дата обращения: 25.02.2019)
- [5] Coventry J.S. Performance of a Concentrating photovoltaic/thermal Solar Collector// *Solar Energy*, Vol. 78, Issue 2, 2005, Pp. 211–222.
- [6] Источник: <http://www.ohmega.net/images/Vitosol-TechnicalGuide.pdf> (Дата обращения 04.09.2019)
- [7] Источник: <https://global.sunpower.com/products> (Дата обращения 04.09.2019)
- [8] P.A. Nesterenkov, L.A. Nesterenkova, A.G. Nesterenkov "Cogeneration Solar Systems with concentrators of solar radiation" // accepted for publication in *Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development* // IGI-Global// 2018, ISBN13, Pp. 230-254.
- [9] Light concentration effect on PV performance and efficiency/ EME 812: Utility Solar Power and Concentration. Источник: <https://www.e-education.psu.edu/eme812/node/538> (Дата обращения: 11.02.2020)

[10] P. Nesterenkov, V. Kharchenko. "Thermo Physical Principles of Cogeneration Technology with Concentration of Solar Radiation". Proceedings of ICO: International Conference on Intelligent Computing & Optimization. Pattaya, Thailand. 10, 4–5, 2018. Springer Nature Switzerland AG 2019, Print ISBN 978-3-030-00978-6, Series Print ISSN 2194-5357. Vol. №1, Pp. 117-128.

[11] Источник: www.alanod.com (Дата обращения 25.02.2019)

[12] P. A. Nesterenkova, A. G. Nesterenkov, A. N. Temirbekov. Cogeneration Plants with Solar Radiation Concentrators. ISSN 0040-6015, Thermal Engineering, 2020, Vol. 67, No. 10, Pp. 706–714. © Pleiades Publishing, Inc., 2020. Russian Text © The Author(s), 2020, published in Teploenergetika.

[13] Справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные части 1-6, выпуск 18, Казахская ССР. Книга 1, Гидрометеиздат, 1989, стр. 75-78.

[14] Источник: <https://hitropop.com/voda/normy/norma-potrebleniya.html> (Дата обращения 04.09.2019)

REFERENCES

[1] A. Kribus, D. Raftori, G. Mittelman, A. Hirshfeld, Y. Flisanov, A. Dayan. A miniature concentrating photovoltaic end thermal system// Energy Conversion and Management 47 (2006), Pp. 3582-3590.

[2] Istochnik: <https://newatlas.com/ibm-sunflower-hcpvt-pv-thermal-solar-concentrator/33989/> (Data obrashcheniya: 25.02.2019)

[3] *Recent Advances in the Development and Testing of Hybrid PV-Thermal Collectors*. January 2011. DOI: 10.18086/swc.2011.28.06. (Data obrashcheniya 25.11.2020)

[4] Istochnik: <http://www.cogenra.com> (Data obrashcheniya: 25.02.2019)

[5] Coventry J.S. Performance of a Concentrating photovoltaic/thermal Solar Collector// Solar Energy, Vol. 78, Issue 2, 2005, Pp. 211–222.

[6] Istochnik: <http://www.ohmega.net/images/Vitosol-TechnicalGuide.pdf> (Data obrashcheniya: 04.09.2019)

[7] Istochnik: <https://global.sunpower.com/products> (Data obrashcheniya 04.09.2019)

[8] P.A. Nesterenkov, L.A. Nesterenkova, A.G. Nesterenkov "Cogeneration Solar Systems with concentrators of solar radiation" // accepted for publication in *Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development* // IGI-Global// 2018, ISBN13, Pp. 230-254.

[9] Light concentration effect on PV performance and efficiency/ EME 812: Utility Solar Power and Concentration. Istochnik: <https://www.e-education.psu.edu/eme812/node/538> (Data obrashcheniya 11.02.2020)

[10] P. Nesterenkov, V. Kharchenko. "Thermo Physical Principles of Cogeneration Technology with Concentration of Solar Radiation". Proceedings of ICO: International Conference on Intelligent Computing & Optimization. Pattaya, Thailand. 10, 4–5, 2018. Springer Nature Switzerland AG 2019, Print ISBN 978-3-030-00978-6, Series Print ISSN 2194-5357. Vol. №1, Pp. 117-128.

[11] Istochnik: www.alanod.com (Data obrashcheniya 25.02.2019)

[12] P. A. Nesterenkova, A. G. Nesterenkov, A. N. Temirbekov. Cogeneration Plants with Solar Radiation Concentrators. ISSN 0040-6015, Thermal Engineering, 2020, Vol. 67, No. 10, Pp. 706–714. © Pleiades Publishing, Inc., 2020. Russian Text © The Author(s), 2020, published in Teploenergetika.

[13] Spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 3. Mnogoletnie dannye chasti 1-6, vypusk 18, Kazakhskaya SSR. Kniga 1, Gidrometeoizdat, 1989, str. 75-78.

[14] Istochnik: <https://hitropop.com/voda/normy/norma-potrebleniya.html> (Data obrashcheniya 04.09.2019)

П.А. Нестеренков*

әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

*e-mail: stolkner@gmail.com

АВТОНОМДЫҚ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ КЕШЕН А - ФОТО МОДУЛЬДЕРІМЕН

Аңдатпа. Инновациялық А-фотомодульдер мен оптикалық концентраторы бар коллекторды пайдаланып, күн радиациясын түрлендіру технологиясы қарастырылған. Кремнийлі фотоэлементтер фототок тудырады және аралық жылу тасымалдағышты $\approx 65^{\circ}\text{C}$ дейін қыздырады, бұл сыртқы

айналым контурының тұтынылған суының жылу энергиясын жылу энергиясын шығарады. Күн батареялары мен екі жақты коллекторлардың сипаттамалары туралы эксперименттік мәліметтерді пайдалана отырып, инновациялық Λ - фото модульдердің меншікті қуатын инженерлік есептеу әдісі жасалды және когенерациялық қондырғылардың өнімділігін компьютерлік модельдеу жүргізілді.

Негізгі сөздер: оптикалық концентратор, фотоэлементтер, коллектор, Λ - фотомодуль, жылуалмастырғыш, салқындатқыш.

P.A. Nesterenkov*

al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: stolknier@gmail.com

AUTONOMOUS ENERGY COMPLEX WITH Λ - PHOTO MODULES

Abstract. The technology of converting solar radiation using innovative Λ -photomodels and a collector with an optical concentrator is considered. Silicon photocells generate a photocurrent and heat the intermediate heat carrier up to $\approx 65^{\circ}\text{C}$, which releases thermal energy in the linear heat exchanger of the consumed water of the external circulation loop. Using experimental data on the characteristics of photovoltaic cells and double-sided collectors, a method for engineering calculation of the specific power of innovative Λ - photo modules was developed and computer modeling of the performance of cogeneration units was carried out.

Keywords: optical concentrator, photocells, collector, Λ - photo module, heat exchanger, coolant.