

УДК

Т.В. Бобра,  
В.О. Яшенков

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕЛИОСИСТЕМ**

Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского

*Аннотация:* В статье рассматриваются методы повышения экономической и энергетической эффективности гелиосистем. Предложена система проектирования гелиосистем, которая учитывает конкретные условия территории проектирования и требования технического задания.

*Ключевые слова:* солнечная радиация, гелиоколлектор, расчет площади гелиоколлектора, расчет объема бака-аккумулятора, оптимальные схемы размещения гелиоустановок, окупаемость.

В настоящее время при проектировании гелиосистем для повышения экономической и энергетической эффективности применяют неподвижные гелиоустановки (гелиоколлекторы и фотоэлектрические установки), ориентированные перпендикулярно прямой солнечной радиации в полдень в месяц с наибольшей суммарной солнечной радиацией.

Оптимальные углы наклона гелиоустановок ( $\beta$ ) определяются периодом работы и для южной ориентации равны: для круглогодичных установок  $\beta = \varphi$  (где  $\varphi$  – широта местности), для летних  $\beta = \varphi - 15^\circ$  и для работающих в отопительный период  $\beta = \varphi + 15^\circ$ . При произвольном расположении коллекторов, как показали расчеты, для углов наклона  $\beta = \varphi \pm 15^\circ$ . Отклонение от южной ориентации до  $10^\circ$  изменяет суммарный годовой поток падающей солнечной радиации не более чем на 5 %, до  $20^\circ$  - на 10 %, до  $30^\circ$  - на 15 % соответственно [3].

Таким образом, отсутствие систем автоматической ориентации и оптимальный угол наклона гелиоустановки считаются достаточными методами повышения экономической и энергетической эффективности проектируемых гелиосистем.

Эти традиционные методы оптимизации, на самом деле, не учитывают целый ряд задач, решение которых действительно повышает экономическую и энергетическую эффективность проектируемых гелиосистем, так как они зависят от конкретных условий рассматриваемой территории и требований технического задания. По нашему мнению, к таким задачам относятся:

1. формирование «избыточной» матрицы компоновки элементов проектируемых гелиосистем;
2. определение углов и степени затенения гелиоустановок горизонтальными и вертикальными препятствиями на поверхности;
3. расчет оптимальной площади гелиоустановок и объема бака-аккумулятора (для гелиоколлекторов) исходя из конкретных климатических условий и требований технического задания.

**Формирование «избыточной» матрицы компоновки элементов проектируемых гелиосистем.** Выбор оптимальной схемы размещения элементов гелиосистем в пределах заданного участка является одним из наиболее сложных этапов проектирования. Как правило, гелиоустановки размещают на крышах зданий и сооружений, в пределах уже спланированной и застроенной территории. Такие участки могут иметь произвольную конфигурацию, содержать различные естественные препятствия и инженерные сооружения, которые мешают свободному размещению гелиоустановок. Таким образом, территория, предназначенная для размещения элементов проектируемой гелиосистемы, может быть разбита на доступные и недоступные зоны. Поставленную задачу можно решить путем представления каждой доступной и недоступной зоны в виде замкнутых многоугольников, стороны которых задаются системой линейных уравнений [4]:

1. Рассматриваемая территория в целом

$$\begin{aligned} a_1x + b_1y &= 0 \\ a_2x + b_2y &= 0 \\ &\dots\dots\dots \\ a_nx + b_ny &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $n$  – число сторон рассматриваемой территории;

## 2. Недоступные зоны

$$\begin{aligned} c_{11}x + d_{11}y &= 0 \\ c_{12}x + d_{12}y &= 0 \\ c_{13}x + d_{13}y &= 0 \\ c_{14}x + d_{14}y &= 0 \\ &\dots\dots\dots \\ c_{m1}x + d_{m1}y &= 0 \\ c_{m2}x + d_{m2}y &= 0 \\ c_{m3}x + d_{m3}y &= 0 \\ c_{m4}x + d_{m4}y &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

где  $m$  – число недоступных зон.

Элементами гелиосистем размещаемых в пределах выделенного участка являются: блоки гелиоустановок, которые ориентированы на юг под углом ( $\beta$ ) к горизонту; бак-аккумулятор и трубопроводы обвязки блоков гелиоколлекторов и бака-аккумулятора, аккумулятор и провода обвязки блоков фотоэлектрических установок и аккумулятора.

Блоки гелиоустановок обычно состоят из  $N_1$  параллельных рядов  $M_1$  последовательно соединенных гелиоустановок. Параллельное соединение блоков называется батареей, а параллельное соединение батарей – секцией.

Для определения возможного размещения блоков гелиоустановок в пределах выделенной территории, вычисляем в системе координат, где ось ОУ ориентирована на юг [4]:

$$\Delta y = M_1 l_{gs} (\cos\beta + \sin\beta/\operatorname{tg}\delta) \quad (3)$$

$$\Delta x = N_1 b_{gs} \quad (4)$$

где  $\delta$  – угловая высота солнца в расчетное время начала работы системы,  $l_{gs}$  и  $b_{gs}$  длина и ширина гелиоустановки соответственно.

Следует отметить, что второй член в формуле (3) определяет необходимое расстояние между батареями гелиоустановок, исключающее перекрытие плоскости гелиоустановок тенью смежного ряда.

В процессе трассирования выделенного участка определяем непосредственное размещение блоков гелиоустановок. Для этого используем уравнение  $i$ -й батареи гелиоустановки [4]:

$$y_i = y_{max} + i \Delta y \quad (5)$$

где  $y_{max}$  – максимальное значение ординат вершин участка.

Путем совместного решения уравнений (5) с каждым из уравнений систем (1) и (2) определяем координаты точек пересечения  $i$ -й батареи со сторонами участка и недоступных зон. Далее находим для каждого блока гелиоустановок  $i$ -й батареи его текущее положение в ней:

$$x_{ij} = x_{min} + j \Delta x \quad (6)$$

Таким образом, по координатам  $x_{ij}$ ,  $x_{ij} + \Delta x$  и координатам точек пересечения с границами рассматриваемой территории и недоступных зон определяем возможность размещения данного блока гелиоустановок в доступной зоне.

Аналогичным образом выполняем трассировку для всех батарей, попадающих в пределы участка.

**Определение углов и степени затенения гелиоустановок горизонтальными и вертикальными препятствиями на поверхности.** При размещении гелиоустановок в пределах заданной территории необходимо учитывать углы затенения характерные для данного участка. Это позволит спроектировать установку гелиосистемы так, чтобы избежать, частично или полностью, затенения поверхности гелиоустановок от полезного поступления солнечной энергии.

Существуют два основных способа затенения: горизонтальными и вертикальными препятствиями на поверхности. Горизонтальные препятствия преграждают путь свету сверху. Степень затенения определяется относительной геометрической формой препятствия и поверхности: чем шире козырек, тем больше зона тени; чем выше козырек, тем

меньше зона тени. Вертикальные препятствия преграждают путь свету сбоку. Как и с горизонтальными препятствиями, геометрия угла затенения обуславливает пропорциональные размеры и близость препятствия к поверхности. В качестве препятствий могут выступать деревья, горы, здания, а также другие естественные объекты и искусственные сооружения.

Для любого условия затенения можно построить теневую маску, чтобы отобразить количество и эффективность затенения данной поверхности, предварительно необходимо определить высоту солнца и его азимут для рассматриваемой территории.

Высоту солнца и его азимут определяем по следующим формулам [1]:

$$\sin h_0 = \cos \varphi \cos \delta \cos w + \sin \varphi \sin \delta \quad (7)$$

$$\sin A = \cos \delta \sin w / \cosh_0 \quad (8)$$

или

$$\cos A = \frac{\sin \varphi \sin h_0 - \sin \delta}{\cos \varphi \cosh_0} \quad (9)$$

где  $h_0$  – высота солнца,  $\varphi$  – широта местности,  $\delta$  – солнечное склонение,  $w$  – часовой угол,  $A$  – азимут солнца.

Зная высоту и азимут солнца заданного участка, можно построить теневую маску на интересующий период, используя уже готовые инструменты в различных ГИС-программах (ArcGIS и др.), предварительно создав карту рельефа данной территории.

Теневую маску можно построить и без ГИС-программ, используя диаграмму движения солнца для данной территории и транспортер теневой маски (рис. 1).

Нижняя половина транспортера используется для изучения сегментных эффектов затенения горизонтальных препятствий. Верхняя половина, повернутая стрелкой  $0^\circ$  на юг, относится к радиальному эффекту затенения вертикальных препятствий.

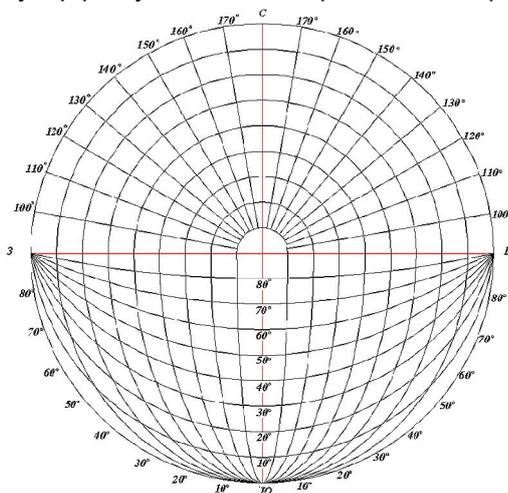


Рис. 1. Транспортер теневой маски

Горизонтально вытянутое препятствие даст сегментную теневую маску, где величина  $\alpha$  указанная маской, соответствует углу  $\alpha$  затеняющего устройства (рис. 2а). Вертикальное препятствие даст радиальную теневую маску с углом  $\beta$ , соответствующим такому же углу затеняющего устройства (рис. 2б). Для сочетания вертикальных и горизонтальных затеняющих элементов можно построить комбинированную теневую маску (рис. 2в).

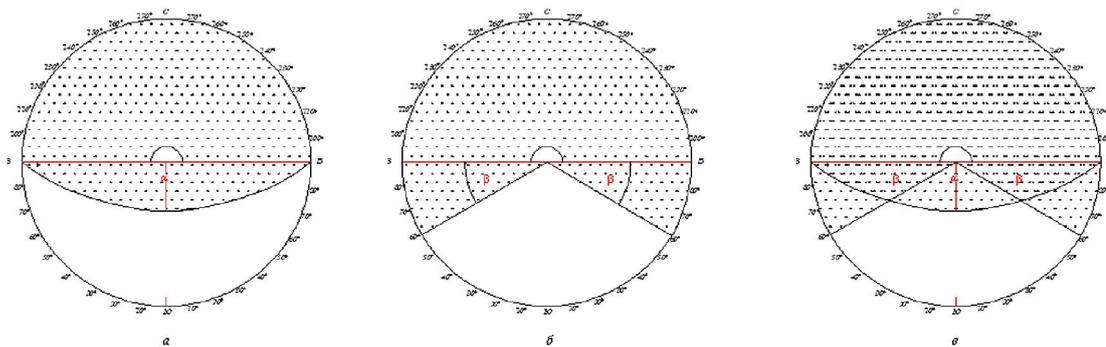


Рис. 2. Теневые маски: а – сегментная (горизонтальная), б – радиальная (вертикальная), в – комбинированная

Теневые маски целесообразнее читать при помощи диаграмм движения солнца, составленных для данной территории. Диаграммы строят при помощи транспорта движения солнца (рис. 3). На нем отмечают высоту и азимут солнца рассматриваемой территории на каждый час 21-го дня каждого месяца. Маску накладывают на диаграмму движения солнца и определяют те периоды года, когда поверхность затенена.

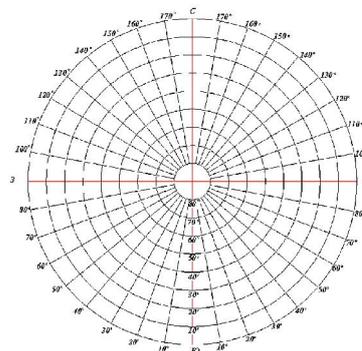


Рис. 3. Транспорт движения солнца

Длину освещенной части гелиоустановки можно определить по высоте солнца и расстоянию между рядами. Расстояние между рядами гелиоустановок можно выразить через угол  $F$  (рис.4). Таким образом,  $tgF$  определяет отношение высоты ряда к расстоянию между рядами гелиоустановок.

Длину освещаемой части гелиоустановки, следовательно, можно определить по следующей формуле [4]:

$$l_{осв} = l_{gs} \frac{ctg\beta + ctgF}{ctg\beta + ctgh_0} \quad (10)$$

где  $l_{осв}$  – длина освещаемой части гелиоустановки,  $l_{gs}$  – длина гелиоустановки,  $\beta$  – угол наклона к горизонту гелиоустановки ориентированной на юг,  $h_0$  – высота солнца.

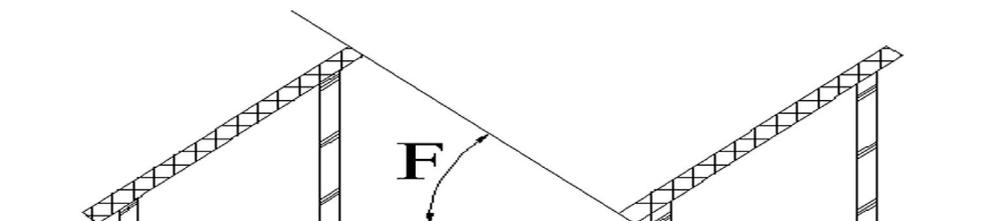


Рис. 4. Угловое расстояние между рядами гелиоустановок

В работе [1, 2, 3] анализируется изменение КПД гелиоустановок (главным образом гелиоколлекторов), размещение которых осуществлялось с учетом определения углов и степени затенения горизонтальными и вертикальными препятствиями. Повышение КПД гелиосистем повышалось в отдельных случаях до 10 %, а в среднем от 3 до 5 %. Тогда как экономическая эффективность повышалась до 12,5 %. Последнее объясняется тем, что достижение наибольшего КПД гелиоустановок, например, гелиоколлекторов, экономически эффективнее в строго определенный период. Так как гелиоколлектор не всегда будет работать, когда светит солнце, по ряду причин, например, когда потребителю тепловая энергия не требуется. Или рано утром и поздно вечером, когда интенсивность излучения недостаточно велика для работы гелиоустановки или угол падения лучей на гелиоустановку настолько мал, что большая часть отражается от панели.

Поэтому при проектировании гелиосистем особенно важно учитывать требования технического задания (период работы, минимально допустимую мощность системы и т.д.).

**Расчет оптимальной площади гелиоустановок и объема бака-аккумулятора (для гелиоколлекторов) исходя из конкретных климатических условий и требований технического задания.** Фотозлектрические установки (ФЭУ) проектируются, как правило, с расчетом на круглогодичное эффективное использование. Если же ФЭУ должны использоваться в качестве аварийных источников энергии при неблагоприятных климатических условиях, то в этом случае угол оптимального наклона ФЭУ определяется по месяцу с наименьшим значением плотности потока солнечного излучения за год.

Оптимальная площадь ФЭУ может быть определена с помощью уравнения [3]:

$$S_{фэу} = P / I_{sol} \cos \Gamma \eta F_i \quad (11)$$

где  $S_{фэу}$  – площадь ФЭУ,  $P$  – выходная мощность ФЭУ, определяемая условиями технического задания,  $I_{sol}$  – плотность потока солнечного излучения, Вт/м<sup>2</sup>,  $\cos \Gamma$  – суммарный угол между направлением на солнце и нормалью к плоскости ФЭУ,  $\eta$  – КПД солнечного элемента,  $F_i$  – суммарный фактор, учитывающий особенности ФЭУ и возможную деградацию ее параметров (определяется техническими характеристиками конкретной ФЭУ).

$$\cos \Gamma = \sin h_0 \cos \beta + \sin [\arccos (\cos \varphi \cos \delta \cos w + \sin \varphi \sin \delta)] \sin \beta \cos A \quad (12)$$

где  $h_0$  – высота солнца,  $\varphi$  – широта местности,  $\delta$  – солнечное склонение,  $w$  – часовой угол,  $A$  – азимут солнца.

В работе [4] анализируются результаты исследований производительности гелиоколлекторов выполненных в эксплуатационном режиме для различных схемных решений и климатических условий. Из них следует, что объем бака  $V$  оказывает существенное влияние на производительность системы и ее эффективность. Влияние увеличения объема бака-аккумулятора тем больше, чем больше соответствующая удельная площадь гелиоколлекторов. Однако, для площадей гелиоколлекторов меньше, чем 2 м<sup>2</sup> на 1 человека, увеличение объема бака свыше 0,15 м<sup>3</sup> не дает заметного увеличения коэффициента замещения. Изменение объема от 0,15 до 0,25 м<sup>3</sup> оказывает малое влияние на годовой КПД системы. Зато резко снижает годовой КПД гелиосистемы увеличение площади гелиоколлекторов. Таким образом, задача ее определения имеет важный характер и носит оптимизационный характер. Критерием оптимизации служит минимум приведенных затрат на проектируемую гелиосистему.

По результатам проведенных исследований были составлены уравнения регрессии второй степени, адекватно описывающие зависимость производительности гелиосистемы от ряда параметров для климатических условий Ялты, Одессы и Киева [4]:

$$\begin{aligned} Q_Y &= 1,063 + 1,920 S + 12,97 V - 0,359 S^2 - 34,50 V^2 + 1,650 S V \\ Q_O &= 0,915 + 1,843 S + 10,24 V - 0,347 S^2 - 26,81 V^2 + 1,210 S V \\ Q_K &= 0,418 + 1,888 S + 8,680 V - 0,365 S^2 - 25,71 V^2 + 2,011 S V \end{aligned} \quad (13)$$

где  $S$  – площадь гелиоколлектора в расчете на 1 чел., м<sup>2</sup>/чел.,  $V$  – объем бака-аккумулятора в расчете на 1 чел., м<sup>3</sup>/чел.

Их недостатком является привязанность к конкретным климатическим условиям, ограничивающим возможную зону применения каждого уравнения. Это приводит к необходимости составления большого числа "типичных" годов для различных метеопунктов.

Решением данной задачи является приведенное ниже уравнение регрессии второй степени [4]:

$$\eta = 0,488 - 0,161 S + 1,155 V + 0,019 S^2 - 2,450 V^2 \quad (14)$$

Уравнение (14) с заданной ошибкой, для требуемого уровня надежности, позволяет вычислить зависимость КПД гелиосистемы от ее параметров в любом из трех пунктов, а также и в любом другом географическом пункте, метеоданные которого можно отнести к той же генеральной совокупности, из которой сделана выборка.

Количество выработанного гелиосистемой тепла за год  $Q_{\text{пол}}$  находят по формуле [4]:

$$Q_{\text{пол}} = \eta S \sum_{z,i,j} q_{\text{пад}} \quad (15)$$

где  $\eta$  – КПД гелиосистемы,  $S$  – площадь гелиосистемы,  $q_{\text{пад}}$  – годовые значения суммарной падающей солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>.

Используя уравнения (14) и (15) можно, зная удельные капитальные затраты на проектируемую гелиосистему, найти оптимальные значения  $S_{\text{опт}}$  и  $V_{\text{опт}}$  для конкретных экономических и климатических условий.

Установка гелиоколлектора, как правило, считается экономически целесообразной при условии, что критерий экономической эффективности данной гелиоустановки меньше или равен сезонному (годовому) коэффициенту полезного действия рассматриваемого гелиоколлектора.

Таким образом, последовательное решение поставленных выше задач способствует повышению экономической и энергетической эффективности проектируемых гелиосистем. Так как данные гелиосистемы будут с максимальной эффективностью использовать всю площадь заданного участка проектирования; учитывать степень затенения гелиоустановок горизонтальными и вертикальными препятствиями на поверхности, что позволит их правильно сориентировать для выполнения конкретных функциональных задач, определяемых условиями технического задания; а также – определить размеры элементов проектируемых гелиосистем (оптимальную площадь гелиоустановок, оптимальный объем бака-аккумулятора) исходя из конкретных экономических и климатических условий, а также требований технического задания, причем критерием оптимизации служит минимум приведенных затрат на проектируемую гелиосистему, что позволяет снизить срок окупаемости системы ниже нормативного при соблюдении КПД, которое должно быть достигнуто.

Данная система проектирования реализована в кодах C++ и может работать как приложение к программам ArcGis 9.1 и AutoCAD 2005 (задача № 1, 2), что существенно облегчает процесс проектирования гелиосистем.

### Литература.

1. Андерсон Б. Солнечная энергия: (Основы строительного проектирования) / Пер. с англ. А.Р. Анисимова; Под. ред. Ю.Н. Малевского. – М.: Стройиздат, 1982. – 375 с., ил.
2. Даффи Дж.А., Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Под. ред. Ю.Н. Малевского. – М.: Мир, 1977. – 420с., ил.
3. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с., ил.
4. Системы солнечного тепло- и хладоснабжения / Р.Р. Аевзов, М.А. Барский-Зорин и др.; Под. ред. Э.В. Сарнацкого и С.А. Чистовича. – М.: Стройиздат, 1990. – 328 с., ил.

*Анотація:* У статті розглядаються методи підвищення економічної і енергетичної ефективності геліосистем. Запропонована система проектування геліосистем, що враховує конкретні умови території проектування і вимоги технічного завдання.

*Ключові слова:* сонячна радіація, геліоколектор, розрахунок площі геліоколектора, розрахунок об'єму бака-аккумулятора, оптимальні схеми розміщення геліоустановок, окупність.

*The summary:* In the article the methods of increase of economical and power efficiency of the solar systems are esteemed. The system of designing solar systems is offered, which one allows for concrete conditions of designing terrain and requirement of the performance specification.

*Keywords:* solar radiation, solar hot water systems, calculation of the area solar hot water systems (solar collectors), calculation of volume of the hot-water (supply) tank, optimum schemes of installation solar systems, recouperment.

Поступила в редакцію

### II.3. ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ И ИХ ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА

