

УДК 621.311; 621.383.51

Э.А.Бекиров, докт. техн. наук, А.П.Химич (Национальная академия природоохранного и курортного строительства, Симферополь)

Теоретическая оценка эффективности цилиндрических концентраторов в неследящих гелиосистемах

В статье описывается создание прикладной программы, использующей метод трассировки лучей, для моделирования работы солнечных концентраторов, а также результаты ее применения для сравнения эффективности цилиндрических концентраторов различных сечений.

У статті описується створення прикладної програми, в якій використовується метод трасування променів, для моделювання роботи сонячних концентраторів, а також результати її використання для порівняння ефективності циліндричних концентраторів різних перетинів.

Введение. Для повышения энергоэффективности солнечных батарей и гелиоколлекторов перспективным является использование систем с концентраторами солнечного излучения. К ним относятся параболоцилиндры, линейные концентраторы, солнечные башни, тарельчатые системы. В малой энергетике может применяться множество других конфигураций концентраторов. Лучшая эффективность концентратора может быть достигнута при точном слежении за Солнцем. В этом случае можно сфокусировать большой поток солнечной энергии на малой площади, что приведет к существенному снижению мощности тепловых потерь и повышению плотности энергии. В тепловых системах это означает, что могут быть достигнуты более высокие температуры, а значит – повышен тепловой КПД установки. В системах с фотопреобразователями высокая концентрация приводит к сокращению площади фотоэлементов, необходимой для достижения установленной мощности.

Постановка задачи. Наибольшую степень концентрации можно получить при использовании параболоцилиндров и параболоидов вращения (в тарельчатых системах), но такие концентраторы очень чувствительны к качеству фокусировки, поэтому требуют высокой точности слежения за Солнцем. Для энергоустановок небольшой мощности затраты на создание такой системы и осуществление слежения не всегда оправданы экономиче-

ски. Особенно это касается тепловых систем, где равномерность светового потока не важна, и в абсорбере не требуется высоких температур (например, в системах солнечного отопления). Была поставлена следующая задача: теоретически исследовать эффективность цилиндрических концентраторов различного сечения и сделать выводы относительно целесообразности их применения в системах без слежения за Солнцем.

Методика исследования. Для анализа эффективности концентрирующих систем целесообразно применять метод трассировки лучей. Он заключается в разбиении светового потока, испускаемого источником, на конечное количество лучей и отслеживании пути каждого луча с учетом отражений от препятствий, а в общем случае – преломлений, а также дисперсии, дифракции и других волновых эффектов.

Трассировка большого количества лучей практически невозможна без применения электронных вычислительных систем, поэтому была создана прикладная программа, предназначенная для расчета количества энергии, попадающей на абсорбер, с учетом концентрации лучей. Программа способна вычислять положение Солнца в зависимости от времени суток и дня года, моделировать световой поток и выполнять трассировку лучей. Ее применение дает возможность определять количество энергии, поступающей на приемник в любой момент времени при заданных

параметрах концентратора и абсорбера (геометрических размеров, коэффициентов отражения и поглощения).

Разработка прикладной программы. В основу программы положены основные соотношения стереометрии и векторной алгебры [1], а также законы геометрической оптики и солнечной геометрии. Ранее была разработана программная среда, предназначенная для комплексного моделирования работы энергетических систем в реальном времени [2]. Алгоритм трассировки был реализован в существующей среде, что позволит в дальнейших исследованиях создавать более полные модели энергоустановок с концентраторами солнечной энергии.

Алгоритм трассировки работает следующим образом:

1. По заданию пользователя создается геометрия моделируемой системы: плоскость Земли, источник света (Солнце), зеркало и абсорбер. Для этого задается массив вершин V_i , включающий их координаты в трехмерном пространстве в виде

$$V_i = \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

и вспомогательные переменные, необходимые для их последующей интерпретации в программе. Одновременно выделяются области памяти для массива преобразованных вершин VT_i и массива проекций вершин VP_i :

$$VT_i = \begin{pmatrix} XT_i \\ YT_i \\ ZT_i \end{pmatrix}; \quad (2)$$

$$VP_i = \begin{pmatrix} XP_i \\ YP_i \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Затем вершины объединяются в ребра и грани объектов.

2. В зависимости от положения наблюдателя, которое определяется пользователем, в реальном времени происходит преобразование трехмерного пространства в его проекцию на плоскость экрана: для каждой вершины выполняется поворот по двум осям относительно камеры в направлении, обратном относительному наклону

камеры. Для этого вычисляются матрицы поворотов относительно вертикальной оси Z на угол α :

$$M_{rotZ} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

и относительно горизонтальной оси X на угол β :

$$M_{rotX} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Затем производится последовательное умножение матриц координат и поворотов:

$$VT_i = V_i \cdot M_{rotX} \cdot M_{rotZ}. \quad (6)$$

3. Далее вычисляется положение Солнца (азимутальный угол и угловая высота) в зависимости от заданного времени суток и даты. После этого создается плоскость, перпендикулярная направлению на Солнце, с которой с заданной плотностью происходит испускание лучей. Вводится первичный массив лучей $R(j)$, определяющий начальную точку, вектор направления, предел расчетной длины и вспомогательные переменные для каждого луча.

Для каждой грани вычисляется нормаль, для чего находится векторное произведение двух ее сторон:

$$\vec{N}_j = \vec{F}_1 \times \vec{F}_2, \quad (7)$$

где $\vec{F}_1 = (X_1 - X_2, Y_1 - Y_2, Z_1 - Z_2)$ – первый вектор стороны; $\vec{F}_2 = (X_3 - X_2, Y_3 - Y_2, Z_3 - Z_2)$ – второй вектор стороны, не параллельный \vec{F}_1 ; при этом $V_1 = (X_1, Y_1, Z_1)$; $V_2 = (X_2, Y_2, Z_2)$; $V_3 = (X_3, Y_3, Z_3)$ – вершины, лежащие на j -грани.

4. Затем выполняется трассировка лучей, то есть проверка всех возможных комбинаций лучей и граней с целью выявления пересечений \vec{D}_{ij} :

$$\vec{D}_{ij} = \frac{(\vec{P}_j - \vec{R}_{0i}) \cdot \vec{N}_j}{\vec{l}_i \cdot \vec{N}_j}, \quad (8)$$

где \vec{P}_j – точка, лежащая на j -грани; \vec{R}_{0i} – начальная точка i -луча; \vec{l}_i – единичный вектор направления i -луча.

Если точка пересечения заданной плоскости и луча находится в пределах грани, вычисляется значение энергии, переданное лучом, и рассчитывается направление отраженного луча \vec{E}_{ij} :

$$\vec{E}_{ij} = \vec{l}_i - 2 \frac{\vec{l}_i \cdot \vec{N}_j}{\vec{N}_j^2} \cdot \vec{N}_j. \quad (9)$$

5. Для всех отраженных лучей выполняется последующая трассировка, которая повторяется до тех пор, пока все лучи не отразятся в бесконечность или будет достигнуто максимальное число отражений, заданное пользователем. При этом с учетом коэффициентов отражения и поглощения рассчитывается количество энергии, переданной каждым лучом абсорберу. Сумма энергий при каждой трассировке сохраняется в выходном массиве для последующей обработки и анализа.

Результаты применения разработанной программы. В результате применения разработанной прикладной программы были получены графики мощности, поступающей на абсорбер, для разных типов концентраторов. Моделирование проводилось для двух дней года: дня осеннего равноденствия и летнего солнцестояния.

На рис. 1 представлена общая геометрическая схема моделируемой установки.

В центре расположен абсорбер 1 – труба круглого сечения. Источник света 2 изменяет свое положение в зависимости от даты и времени суток. Поток солнечного излучения концентрирует-

ся с помощью зеркала 3 – цилиндра, в сечении которого может быть полуокружность, полуэллипс или парабола. Апертура A для всех типов концентраторов была принята равной 0,5 м. Интенсивность светового потока была принята равной 1000 Вт/м^2 (в плоскости, перпендикулярной направлению солнечного излучения). Длина цилиндрического зеркала для всех типов концентраторов составляла 2 м, длина трубы абсорбера – 4 м, что обеспечивает лучшую концентрацию лучей на абсорбер при низких углах падения света (утром и вечером). Расстояние R от зеркала до приемника зависело от типа концентратора. Для параболицилиндра абсорбер располагался в точке фокуса; для эллиптического цилиндра – в центре сечения; для круглого цилиндра рассматривались 2 варианта: в центре сечения и на расстоянии, равном половине радиуса сечения.

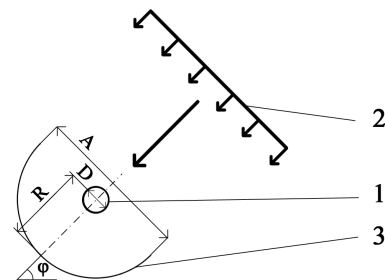


Рис. 1. Геометрическая схема моделируемой установки.

Первая группа графиков (рис. 2) соответствует результатам моделирования для широты местности 45 градусов в равноденствие; при этом угол наклона концентраторов был равен 45° , диаметр трубы абсорбера был принят равным 5 см.

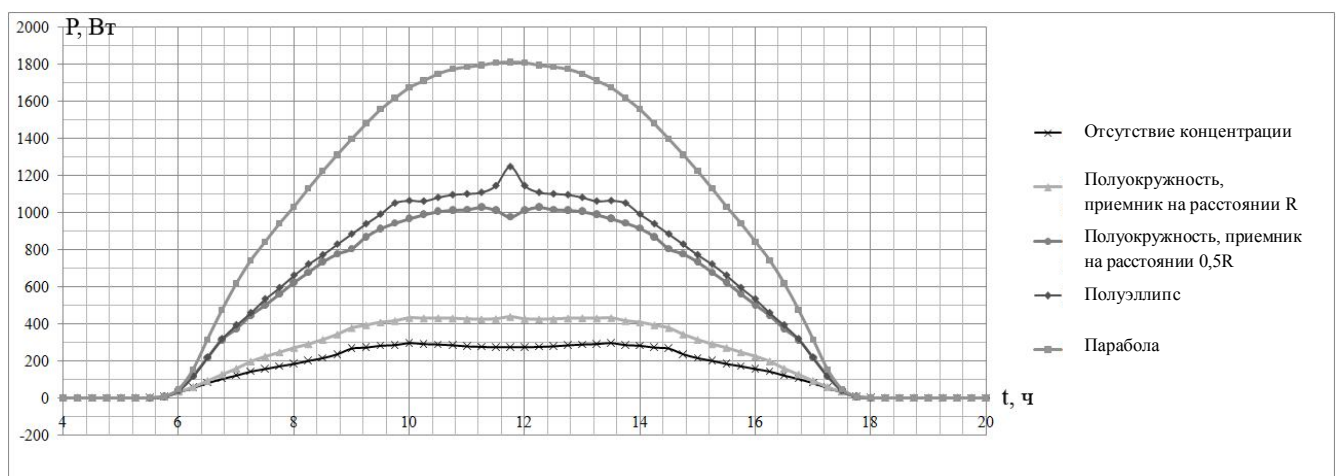


Рис. 2. Мощность, поглощаемая абсорбером в день осеннего равноденствия при $D = 5 \text{ см}$ и оптимальной ориентации зеркала.

Вторая группа графиков (рис. 3) соответствует тем же условиям, что и рис. 2, но диаметр трубы абсорбера был принят равным 10 см. Как видно из графиков, количество поступающей энергии для всех концентраторов, кроме параболоцилиндра, возросло на 15-30%. Но при этом эффективность концентрации упала на 20-30% (за счет увеличения площади поверхности приемника). В реальных установках это приведет к возрастанию тепловых потерь с поверхности абсорбера.

На рис. 4 и рис. 5 представлены аналогичные результаты моделирования, но для дня летнего солнцестояния. Угол наклона концентратора был принят равным 68°, что соответствует угловой высоте Солнца в полдень. Из графиков видно, что увеличение диаметра трубы абсорбера приводит к более стабильному режиму работы концентратора, но при этом также увеличиваются тепловые потери.

В рассмотренных случаях наибольшая эффективность соответствовала параболоцилиндрам.

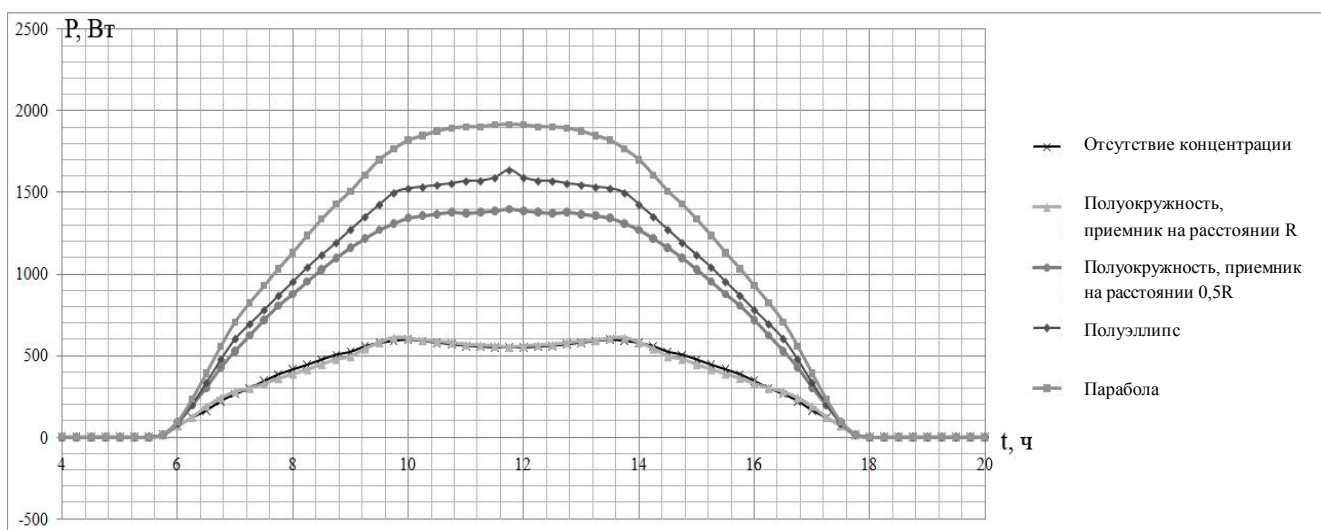


Рис. 3. Мощность, поглощаемая абсорбером в равноденствие при $D = 10$ см и оптимальной ориентации зеркала.

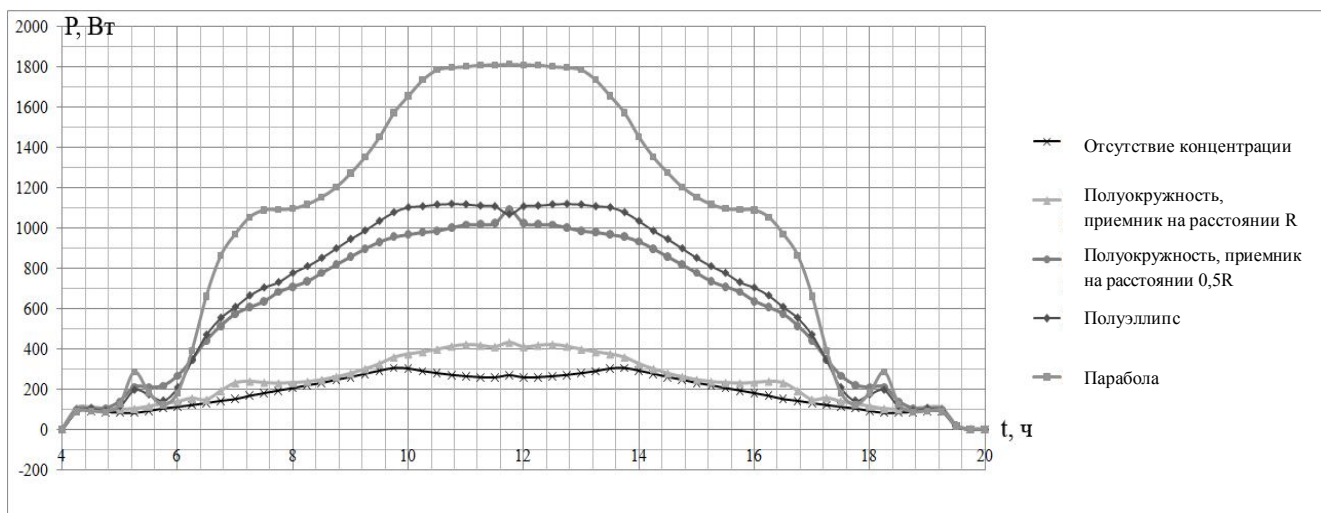


Рис. 4. Мощность, поглощаемая абсорбером в день летнего солнцестояния при $D = 5$ см и оптимальной ориентации зеркала.

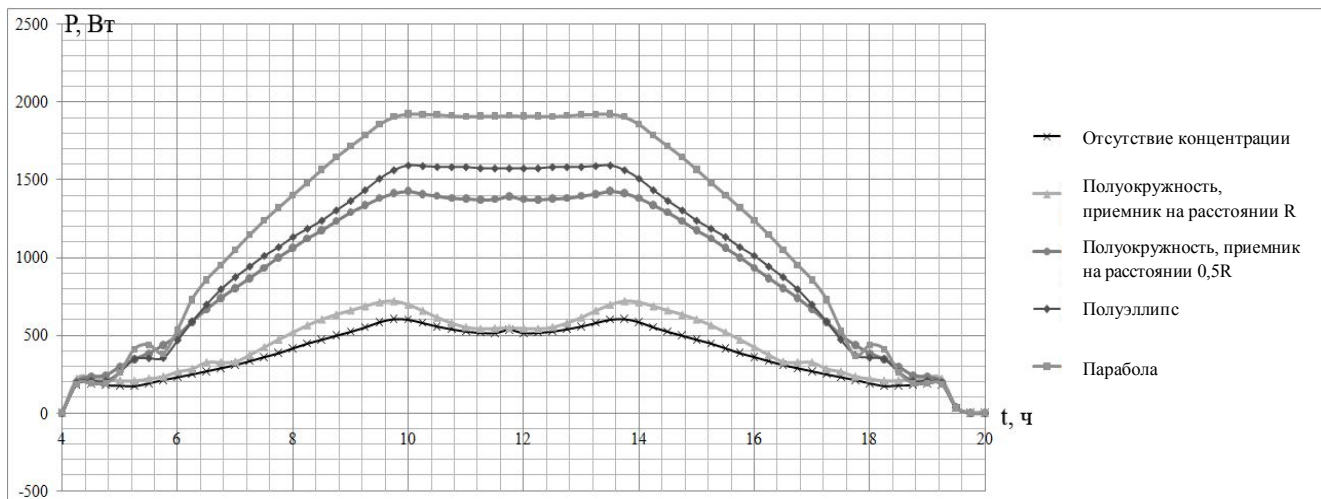


Рис. 5. Мощность, поглощаемая абсорбером в день летнего солнцестояния при $D = 10$ см и оптимальной ориентации зеркала.

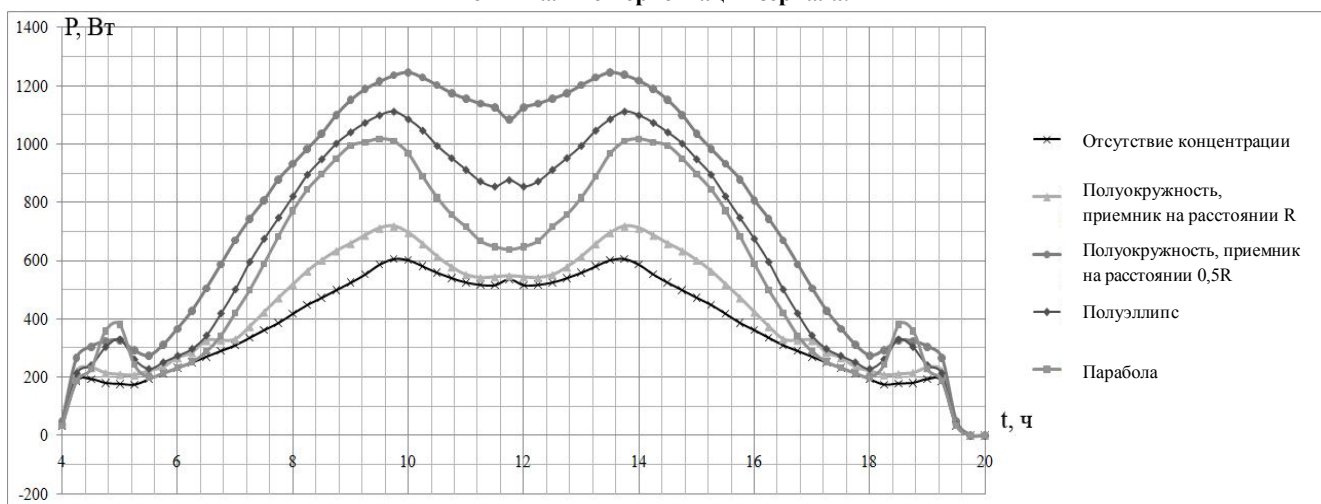


Рис. 6. Мощность, поглощаемая абсорбером в день летнего солнцестояния при $D = 10$ см и ориентации зеркала, соответствующей равноденствию.

На рис. 6 показаны графики поступающей энергии для дня солнцестояния, но при этом концентраторы были расположены под углом 45° , что оптимально для равноденствия. Несоответствие углов установки зеркала и угловой высоты Солнца позволяет исследовать эффективность работы концентраторов без какого-либо слежения за Солнцем.

Как видно из графиков, наибольшую эффективность показал круглый цилиндрический концентратор с приемником, расположенным на расстоянии, равном половине радиуса его сечения.

Выводы. В результате выполненного исследования были получены сравнительные характеристики функционирования различных цилиндрических концентраторов в условиях полного или

частичного отсутствия слежения за Солнцем. Было выявлено, что при ежемесячной коррекции угла установки и отсутствии слежения в течение дня параболоцилиндры показывают наибольшую эффективность. Если же слежение за Солнцем отсутствует полностью, то лучший результат дает цилиндр с полуокружностью в сечении.

1. Умнов А.Е. Аналитическая геометрия и линейная алгебра: учебное пособие для вузов – М.О.: Издание ЗАО "Оптимизационные системы и технологии", 2004. – С. 12–40.

2. Химич А.П. Компьютерное моделирование тепловых и электрических систем // Актуальные проблемы архитектуры, строительства и энергосбережения. – Симферополь: НАПКС, 2010. – С. 175–180.