

### Библиографические ссылки

1. Кочин Н.Е. Теоретическая гидромеханика / Н.Е. Кочин, И.А. Кибель, Н.В. Розе. – М., 1956. – 560 с.
2. Лаврентьев М.А. Методы теории функций комплексного переменного / М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. – М., 1965. – 716 с.
3. Гуревич М.И. Теория струй идеальной жидкости / М.И. Гуревич. – М., 1961. – 302 с.
4. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М., 1953. – 680 с.

Надійшла до редакції 22.12.10

УДК 621.479

Л.И. Кныш, В.И. Давыдов

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара*

### МЕТОДИКА РАСЧЁТА ОБЛУЧЕННОСТИ ТРУБЧАТОГО ПРИЕМНИКА ТЕПЛА В СОСТАВЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ПАРАБОЛОЦИЛИНДРИЧЕСКИМ КОНЦЕНТРАТОРОМ

Розроблено методику визначення теплових потоків на поверхні лінійного та трубчатого приймача сонячного випромінювання, що знаходиться у фокусі параболоциліндричного концентратора. Проведено чисельні експерименти, що виявили основні закономірності процесу, пов'язані, головним чином, з вибором геометрії системи. Показано задовільний збіг результатів чисельного та експериментального досліджень.

*Ключові слова:* сонячна енергетична система, параболоциліндричний концентратор, теплоприймач.

Разработана методика по определению тепловых потоков на поверхности линейного и трубчатого приёмника солнечного излучения, который находится в фокусе параболоцилиндрического концентратора. Проведены численные эксперименты, выявившие основные закономерности процесса, связанные, главным образом, с выбором геометрии системы. Показано удовлетворительное совпадение результатов численного и экспериментального исследований.

*Ключевые слова:* солнечная энергетическая система, параболоцилиндрический концентратор, теплоприёмник.

A method for determination of heat flows on the surface of linear and tube solar receiver, which located in the focus of cylindrical parabolic concentrator, is developed. The numerical experimentations have revealed fundamental regularities of the process. These regularities connected with selection of system geometry. Satisfactory fit of results numerical and experimental investigations are demonstrated.

*Key words:* solar power system, cylindrical parabolic concentrator, heat receiver.

**Введение.** В настоящее время на Украине существуют объективные причины, стимулирующие развитие различных энергосберегающих технологий, а также установок, использующих нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Перспективным направлением крупномасштабного использования солнечной энергии можно считать интегрирование в энергетическую систему региона солнечных энергетических станций (СЭС) на базе параболоцилиндрических концентраторов (ПЦК). Именно в этом направлении развивается мировая солнечная энергетика.

Существенные успехи уже достигнуты в США, Израиле, Испании, Германии. Под эгидой Европейского Союза ведутся работы над крупномасштабным проектом Desertec, в рамках которого предполагается строительство более 100 солнечных электростанций на севере Африки, электроэнергия от которых будет передаваться через Средиземное море в Европу [1].

Анализ научных публикаций по вопросам проектирования и эксплуатации подобных объектов [2; 3] и др. позволяет сделать вывод о необходимости проведения более детальных исследований, в первую очередь, по основному элементу СЭС – системе ПЦК – трубчатый приёмник тепла.

Создание эффективной системы приёма солнечного излучения заключается в определении основных геометрических параметров концентратора (фокусного расстояния  $f_K$ , радиуса  $r_K$ , угла раскрытия  $u_K$ ), и также неточностей геометрии (среднеквадратичных отклонений  $\sigma_\phi$ ,  $\sigma_\gamma$ ), при которых обеспечивается требуемая степень концентрации по лучевоспринимающей поверхности приёмника. Это, в свою очередь, даёт возможность получать необходимые уровни температур и тепловых потоков в теплоприемнике, минимизируя тепловые потери.

**Цель работы.** Целью работы является определение тепловых потоков, которые попадают на линейный и трубчатый приёмник тепла от ПЦК и выбор, базируясь на этих значениях, наиболее рациональных геометрических характеристик теплоприемника.

**Математическая постановка задачи.** В [4] была создана обобщённая математическая модель процесса концентрации солнечного излучения, в которой, в рамках фотометрического подхода учтены все факторы, влияющие на лучистый теплообмен в системе Солнце-концентратор-приёмник. Применим основные положения этой модели к рассмотрению точно ориентированных на Солнце ПЦК, в фокусе которых располагается трубчатый теплоприемник. На рис.1 показана схема распределения лучистых потоков в рассматриваемой системе.

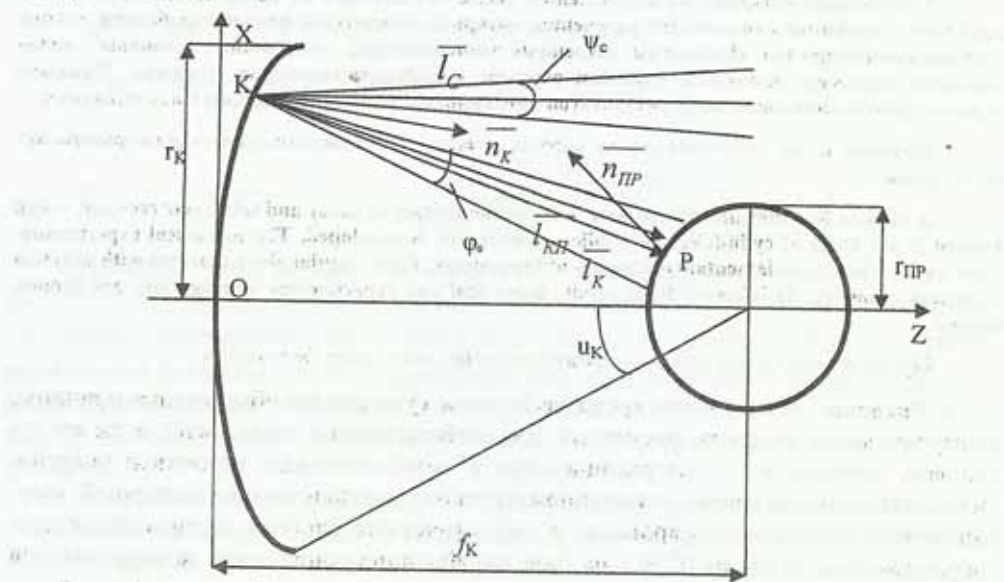


Рис. 1. Схема к определению облучённости приёмника в системе ПЦК – трубчатый теплоприемник

Определим облучённость приёмника, приходящую на единицу длины рассматриваемой системы. Если обозначить текущие точки на поверхности концентратора и приёмника  $K(x, z)$  и  $P(x, z)$ , то полный поток энергии, падающий на точку  $K(x, z)$  концентратора равен

$$d\Phi_0 = \beta_3 d\Phi_{\text{ПАД}} = \beta_3 E_C dl \cos(-\vec{l}_C, \vec{n}_K), \quad (1)$$

где  $\beta_3$  – коэффициент зеркального отражения лучевоспринимающей поверхности концентратора;  $dl$  – длина элементарной площадки концентратора, м;  $E_C$  – суммарная солнечная радиация, Вт/м<sup>2</sup>.

Будем считать, что отражённое излучение распространяется в углу  $\phi_0$  в соответствии с законом, определяемым функцией индикатрисы излучения  $f(\phi)$ , которая имеет вид

$$f(\phi) = \frac{dI(\phi)}{dI(0)}, \quad 0 \leq \phi \leq \phi_0, \quad (2)$$

где  $dI(\phi)$  – элемент поля интенсивностей излучения внутри угла  $\phi_0$ ;  $dI(0)$  – интенсивность излучения в направлении, выбранном за основное. Тогда поток энергии, отражённый от концентратора, будет равен

$$d\Phi_0 = \int_0^{\phi_0} dI(\phi) d\phi.$$

Учитывая (2), получаем

$$d\Phi_0 = dI(0) \int_0^{\phi_0} f(\phi) d\phi. \quad (3)$$

Приравняем правые части (1) и (3)

$$dI(0) = \frac{\beta_3 E_C dl \cos(-\vec{l}_C, \vec{n}_K)}{\int_0^{\phi_0} f(\phi) d\phi},$$

или

$$dI(\phi) = \frac{f(\phi) \beta_3 E_C dl \cos(-\vec{l}_C, \vec{n}_K)}{\int_0^{\phi_0} f(\phi) d\phi}. \quad (4)$$

Рассматривая элемент поверхности концентратора как вторичный точечный источник излучения, определяем плотность теплового потока в точке  $P(x, z)$  на основании известного фотометрического соотношения, которое объединяет закон косинусов и квадрата расстояний

$$dE_{\Pi} = \frac{dI(\phi) \cdot \xi(\vec{l}_{K\Pi}) \cdot \cos \vartheta(\vec{l}_{K\Pi}, \vec{n}_{\Pi})}{l_{K\Pi}^2}, \quad (5)$$

где  $l_{K\Pi}$  – расстояние между точками поверхности приёмника и концентратора;

$$\xi(\vec{l}_{KP}) = \begin{cases} 1, & \text{если } (\vec{l}_{KP}^0 \cdot \vec{l}_K^0) \geq \cos \phi_0 \\ 0, & \text{если } (\vec{l}_{KP}^0 \cdot \vec{l}_K^0) < \cos \phi_0 \end{cases}$$

функция Хевисайда, показывающая, попал ли луч, идущий от концентратора  $\vec{l}_K$ , в пучок лучей  $\phi_0$ , падающий в окрестность рассматриваемой точки приёмника.

Подставляя (4) в (5), получаем

$$E_{\Pi} = \int_L \frac{\beta_3 f(\phi) \cdot E_C \cdot \xi(\vec{l}_{KP}) \cos(-\vec{l}_C^0, \vec{n}_K) \cos(\vec{l}_{KP}^0, -\vec{n}_{\Pi P}) dl}{l_{KP}^2 \int_0^{\phi_0} f(\phi) d\phi} \quad (6)$$

где  $L$  – длина параболы в сечении параболоцилиндра.

Нахождение облученности трубчатого приёмника сводится к вычислению криволинейного интеграла (6), при этом учёт неточностей, возникающих при изготовлении и эксплуатации концентратора предлагается проводить с помощью введения углов  $\Delta\gamma_K, \Delta\nu_K$ , характеризующих отклонение нормали поверхности реального концентратора  $\vec{n}_K$  от математически идеальной  $\vec{n}_K$ , а именно

$$\vec{n}_K = \vec{n}_K(\vec{n}_K, \Delta\gamma_K, \Delta\nu_K).$$

Не имея данных абберационных испытаний реальных концентраторов, можно предположить, что распределение локальных угловых ошибок подчиняется нормальному вероятностному закону, который для случая, когда  $\Delta\gamma_K \gg \Delta\nu_K$ , имеет вид

$$P(\Delta\gamma_K) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\gamma} \exp\left(-\frac{\Delta\gamma_K^2}{2\sigma_\gamma^2}\right).$$

**Численный метод исследования.** Выбор метода решения задачи связан с физическими особенностями протекания процесса. Абберации, существующие на поверхности концентратора, приводят к тому, что не все лучи, отражённые от него, попадают на тепловоспринимающую поверхность приёмника. Таким образом, значение подынтегральной функции в (6) носит случайный характер. Кроме того, при определении отклонения нормали реального концентратора от математически идеального, использовался вероятностный подход. В связи с этим, в качестве основного метода решения данной задачи, выбран метод статистических испытаний. Он был реализован при следующих допущениях, часто используемых в гелиотехнических расчётах [5], а именно, предполагалось, что отражённый пучок имеет угол раскрытия, равный солнечному  $\phi_0 = \psi_C \approx 32'$ , распределение интенсивности излучения по направлениям в пучке равномерное  $f(\phi) = 1$ , коэффициент отражения зеркальной поверхности концентратора  $\beta_3$  в пучке является постоянной величиной.

Численные исследования проведены для линейного и трубчатого приёмника тепла при различных углах раскрытия концентратора  $u_K$ .

Первоначально исследован линейный приёмник тепла, находящийся в фокусе ПЦК. Результаты численного эксперимента представлены на рис. 2.



Рис.2. Изменение облучённости линейного приёмника при различных углах раскрытия концентратора

При вычислениях выбиралось среднее квадратичное отклонение  $\sigma_\gamma = 0.5\psi_C$ . Исследование проводилось для приёмника, имеющего максимальный относительный радиус  $\bar{r}_{MAX} = \frac{r_{ПП}}{r_K} = 0.05$ . Как видно из графика, в фокусе теплоприёмника тепловой поток, идущий от Солнца, может быть увеличен более чем в 100 раз, однако его значение существенно снижается даже при небольшом отдалении от фокуса. Поэтому средняя степень концентрации не будет превышать 40 – 50.

На рис. 3 представлено изменение относительной облучённости трубчатого приёмника  $\bar{E} = \frac{E_{П}}{E_C}$  в направлении оси  $x$  при различных углах раскрытия концентратора. Графики построены при фиксированном максимальном относительном радиусе трубы, также равном  $\bar{r}_{MAX} = 0.05$ .

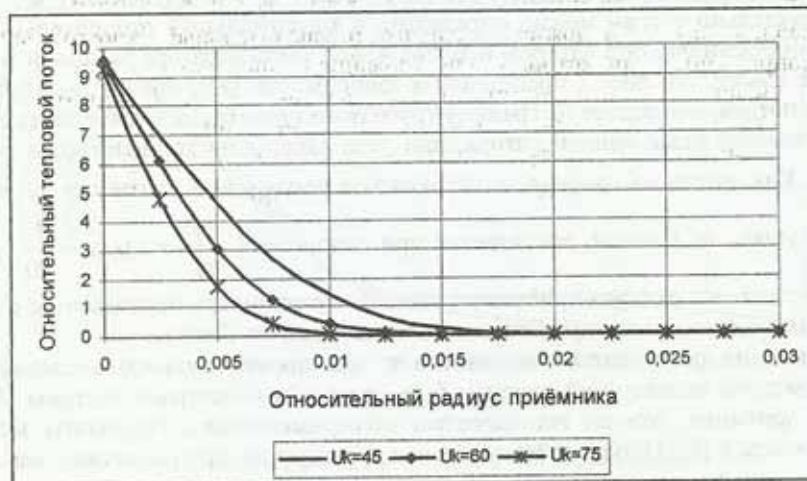


Рис. 3. Изменение облучённости трубчатого приёмника при различных углах раскрытия концентратора

Как видно из графика, излучение от концентратора попадает лишь на часть приёмника, находящуюся в афокальных плоскостях, в окрестности главной оптической оси. На остальную часть трубчатого приёмника концентрированное солнечное излучение практически не попадает. Такое распределение тепловых потоков приводит к относительно низкому значению коэффициента концентрации, которое для точек оптической оси не превышает 10.

Методика, описанная выше, позволяет определить характер распределения тепловых потоков внутри трубчатого приёмника вдоль оси  $z$ . Кривые, представленные на рис. 4, показывают распределение лучистых потоков, идущих от концентратора, при различных фиксированных значениях максимального относительного радиуса трубы. Кривые построены при фиксированном угле раскрытия концентратора, равному  $\mu_K = 60^\circ$ . Как видно из графика, тепловой поток, идущий от концентратора, распространяется внутри трубы в направлении оси  $z$  неравномерно, в узкой области, прилегающей к главной оптической оси. Этот факт необходимо учитывать при расчёте и проектировании трубчатых теплоприёмников для оптимизации их геометрических размеров и минимизации тепловых потерь.

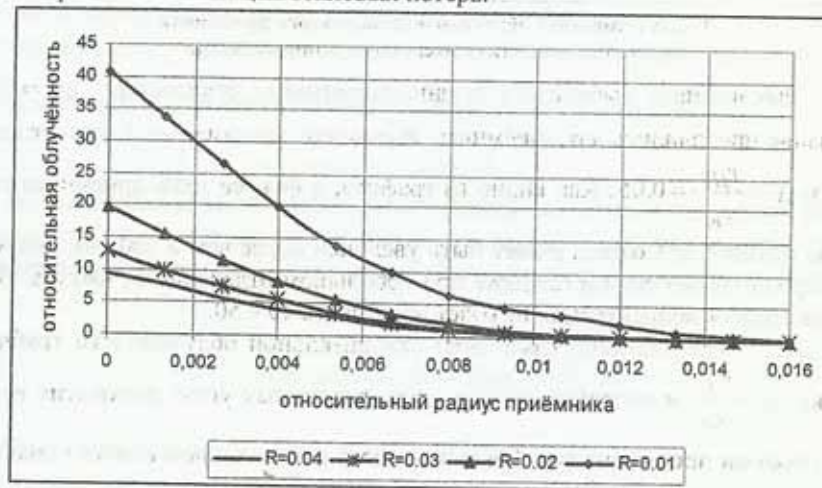


Рис. 4. Характер распределения тепловых потоков в трубе в направлении оси  $z$

Параллельно с этим можно определить и максимальный относительный радиус теплоприёмника, при котором использование концентратора заданной геометрии имеет смысл. На рис. 5 представлена зависимость величины относительного теплового потока, что падает на границу трубчатого приёмника в точке пересечения его с оптической осью концентратора, при угле раскрытия концентратора равном  $\mu_K = 60^\circ$ . Как видно из графика, десятикратное увеличение плотности теплового

потока, идущего от Солнца, достигается при отношении  $\frac{r_{\text{ПР}}}{r_K} = \bar{r}_{\text{MAX}} = \frac{1}{20}$ . Дальнейшее увеличение радиуса приёмника является практически бесполезным с точки зрения усиления мощности лучистого потока, идущего от Солнца.

**Сравнение результатов численного и экспериментального исследований.** Выбор геометрии исследуемой системы был определён геометрией системы ПЦК — линейный приёмник, которая исследовалась экспериментально. Результаты экспериментов описаны в [6]. Натурные исследования проводились при различных значениях прямой солнечной радиации  $E_C$  для параболоцилиндрической гелиоустановки с горизонтальной оптической осью и углом раскрытия  $\mu_K = 60^\circ$ . Отражатель установки

представлял собой несущую раму V-образного сечения с отражающим покрытием из листов зеркального алюминия с коэффициентом отражения солнечных лучей  $\beta_3 = 0.78 - 0.8$ . Теоретический профиль поперечного сечения зеркала соответствовал параболе  $y^2 = 2,6x$ . Теплоприемник данной установки представлял собой стальную трубу с наружным диаметром  $d_{TP} = 0.042\text{ м}$ , покрытую термостойкой краской. Стальная труба приёмника была помещена в стеклянную трубу диаметром  $d_{СТ} = 0.07\text{ м}$ . По необлучаемой поверхности был установлен теплоизоляционный экран.



Рис. 5. Тепловые потоки в точках пересечения границы теплоприемника с оптической осью концентратора

На рис. 6 представлены результаты натурального эксперимента, проведенного при  $E_C = 700\text{ Вт} / \text{м}^2$ . Они близки к результатам численного исследования для точек приёмника, расположенных в окрестности фокуса. Для периферийных областей численный эксперимент даёт несколько заниженный результат, что связано, скорее всего, с приближённым характером учёта неровностей поверхности зеркала.



Рис. 6. Сравнение результатов численного исследования с результатами экспериментов

**Выводы.** В работе представлен численный алгоритм по определению величины тепловых потоков, идущих от параболоцилиндрического концентратора (ПЦК) на приёмник тепла, расположенный в его фокусе. Выявлены основные энергетические характеристики подобной системы для линейного и трубчатого приёмника тепла. Удовлетворительное совпадение результатов численного и экспериментального исследований подтверждает корректность данной методики и возможность её использования для теплоприемников различной геометрии, расположенных в фокальной и афокальной плоскостях ПЦК, точно ориентированного на Солнце.

### Библиографические ссылки

1. [www.ehorussia.ru/new/book/export/html/1307](http://www.ehorussia.ru/new/book/export/html/1307).
2. Cliff M. Webb SEGS Plant Design and Operation / M. Cliff. – Los Angeles. – 1989. – 42 p.
3. Клычев Ш.И. Методика расчёта системы параболоцилиндрический концентратор-трубчатый приёмник солнечных теплоэнергетических установок / Ш.И. Клычев, М.М. Мухитдинов, С.А. Бахрамов // Гелиотехника. – 2003. – №4. – С. 50–55.
4. Кныш Л.И. Применение метода статистических испытаний для расчёта облучённости приёмника тепла концентрированным потоком солнечной энергии / Л.И. Кныш, В.И. Давыдов // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: Механіка.–2009. – Вип. 13, т.1. – С. 51–59.
5. Мак-Клелланд Д. Концентраторы солнечного излучения для высокотемпературных установок КА. / Д. Мак-Клелланд // Энергетические установки космических аппаратов. – М., 1964. – С. 95–110.
6. Результаты испытаний солнечной параболоцилиндрической установки / И.И. Кохова, В.И. Кабаков, С.Ф. Эргашев, О.С. Дробязгина // Гелиотехника. – 1991. – №2. – С.14 – 16.

Надійшла до редакції 05.01.11

УДК 532.516

В.И. Елисеєв\*, Т.А. Рузова\*, А.П. Толстопят\*, Л.А. Флеєр\*,  
А.Ф. Шевченко\*\*, С.А. Шевченко\*\*

\*Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара

\*\*Інститут чорної металургії НАН України

### ДИНАМИКА ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ ПРИ ПОДАЧЕ ГАЗОВОГО ПОТОКА ЧЕРЕЗ ВЕРТИКАЛЬНУЮ ЗАГЛУБЛЕННУЮ ФУРМУ

Наведено результати комп'ютерної обробки відеозображень коливної поверхні рідини при подаванні газового потоку через вертикальну заглиблену фурму. Отримано амплітудно-частотні характеристики коливального руху, значення характерних розмірів бульбашок і величини сплесків на поверхні рідини.

*Ключові слова:* вертикально заглиблена фурма, вдування газу в рідину, коливання вільної поверхні рідини при вдуванні газу.

Приведены результаты компьютерной обработки видеозображений колеблющейся поверхности жидкости при подаче газового потока через вертикальную заглибленую фурму. Получены амплитудно-частотные характеристики колебательного движения, значения характерных размеров пузырей и величин всплесков на поверхности жидкости.

*Ключевые слова:* вертикально заглибленная фурма, вдувание газа в жидкость, колебания свободной поверхности жидкости при вдувании газа.

© В.И. Елисеєв, Т.А. Рузова, А.П. Толстопят, Л.А. Флеєр, А.Ф. Шевченко, С.А. Шевченко, 2011