

УДК 621.472

Л.И.Кныш, канд.техн.наук (Днепропетровский национальный университет им. О.Гончара, Днепропетровск)

### **Численное моделирование лучистого теплопереноса в системе концентрации солнечного излучения "параболоцилиндрический концентратор – трубчатый теплоприёмник"**

*Приводятся результаты численного моделирования лучистого теплообмена в системах концентрации солнечного излучения "параболоцилиндрический концентратор – трубчатый теплоприёмник". На основе созданной математической модели разработан численный алгоритм, базирующийся на использовании метода Монте-Карло. В ходе численных экспериментов выявлено влияние aberrаций на энергетические характеристики зеркала, определён оптимальный угол его раскрытия, проанализировано влияние расположения приёмника относительно фокуса. Сравнение численных и экспериментальных данных показало их хорошее согласование.*

*Наведено результати чисельного моделювання променевого теплообміну в системах концентрації сонячного випромінювання "параболоциліндричний концентратор – трубчастий теплоприймач". На основі створеної математичної моделі розроблено чисельний алгоритм, що базується на використанні методу Монте-Карло. Під час чисельних експериментів виявлено вплив аберацій на енергетичні характеристики дзеркала, визначено оптимальний кут його розкриття, проаналізовано вплив розташування приймача відносно фокуса. Порівняння чисельних та експериментальних даних показало їх добре погодження.*

**Введение.** В настоящее время в мировой солнечной энергетике наблюдается устойчивое развитие двух основных направлений, связанных с машинным преобразованием солнечного излучения. К первому направлению следует отнести проектирование и ввод в эксплуатацию солнечных электрических станций (СЭС) башенного типа, а ко второму – строительство станций с распределенными трубчатыми приёмниками, расположенными на фокусной оси параболоцилиндрических концентраторов (ПЦК).

Примером первого поколения станции башенного типа могут служить экспериментальная Крымская СЭС-5 в г. Щёлково, а также станция с промежуточным теплоносителем Барслоу на юге Калифорнии. Впечатляют современные проекты башенных станций. В Севилье, на юге Испании, в 2007-2009 годах введена в эксплуатацию солнечная станция башенного типа второго поколения Abengoa Solar общей мощностью более 30 МВт [1].

Первыми станциями с полем ПЦК можно считать каскад гибридных СЭС, построенных фирмой LUZ в пустыне Мохаве (Калифорния) в 1985 г. В настоящее время существует большое количество действующих и проектируемых станций подобного типа. Ярким примером может

служить станция немецкой компании Solar Millennium AG Andasol 1, построенная в Андалузии, первый блок которой введён в эксплуатацию в 2008 году [2]. С 2007 года функционирует городская солнечная параболоцилиндрическая станция Nevada Solar One в США мощностью 64 МВт [3].

Провести технико-экономическое сравнение станций башенного типа и станций с ПЦК довольно сложно. Группы компаний, имеющие апробированные технологии того или иного способа улавливания солнечного излучения, настаивают на принятии своей концепции СЭС. Поэтому эти два направления в мировой солнечной энергетике развиваются параллельно, и для каждой из концепций, как, впрочем, и для всей солнечной энергетике, главным вопросом является вопрос себестоимости производимого электричества. Для станций с полем ПЦК характерным является то, что в себестоимости производимой электрической энергии около 80% составляет стоимость самих концентраторов. Поэтому необходимость проведения детальных теоретических и экспериментальных исследований системы приёма солнечного излучения, на основе которых могут быть сформулированы основные рекомендации по выбору геометрии концентратора, материала для его изготовления, общей схемы установки и

прочих данных, необходимых для минимизации стоимости системы, не вызывает никаких сомнений.

**Математическая модель процесса концентрации.** Для создания математической модели процесса концентрации солнечного излучения в системе приёма "ПЦК – трубчатый теплоприёмник", изображённой на рис. 1, был применён комплексный подход, основанный на интегральном методе исследования лучистого теплообмена с элементами оптики и фотометрии.

Полученная математическая модель включает в себя соотношение для вычисления облученности поверхности приёмника:

$$E_{\Pi} = \int_L \frac{\beta_3 f(\varphi) \cdot E_C \cdot \xi(\bar{l}_{КП}) \cos(-\bar{l}_C, \bar{n}_K) \cos(\bar{l}_{КП}, -\bar{n}_{\Pi P}) dl}{l_{КП}^2 \int_0^{\varphi_0} f(\varphi) d\varphi}, \quad (1)$$

в котором учитывается взаимное расположение теплоприёмника и концентратора ( $\cos(\bar{l}_{КП}, -\bar{n}_{\Pi P})$ ), ориентация концентратора на Солнце ( $\cos(-\bar{l}_C, \bar{n}_K)$ ), оптическое качество материала поверхности концентратора ( $\beta_3$ ), интенсивность солнечной радиации ( $E_C$ ), а также вид функции индикатрисы ( $f(\varphi) = \frac{dI(\varphi)}{dI(0)}$ ,  $0 \leq \varphi \leq \varphi_0$ ), показывающий неравномерность распределения энергии в пучке, который идёт от Солнца к концентратору и от концентратора к теплоприёмнику.

Соотношение (1) дополняется соотношениями, описывающими закон зеркального отражения:

$$\begin{aligned} (-\bar{l}_C) \bar{n}_K \bar{l}_K &= 0; \\ (-\bar{l}_C) \bar{n}_K &= \bar{n}_K \bar{l}_K; \end{aligned} \quad \psi_C \leq \varphi_0 \leq \pi / 2, \quad (2)$$

а также уравнениями поверхности приёмника и ПЦК:  $F_{\Pi P}(x, z) = 0$ ,  $F_K(x, z) = 0$ .

Функция  $\xi(\bar{l}_{КП})$  в (1) представляет собой функцию Хевисайда, которая показывает, попал ли рассматриваемый луч, идущий от концентратора, в пучок лучей, падающих на приёмник.

$$\xi(\bar{l}_{КП}) = \begin{cases} 1, & \text{если } (\bar{l}_{КП} \cdot \bar{l}_K) \geq \cos \varphi_0 \\ 0, & \text{если } (\bar{l}_{КП} \cdot \bar{l}_K) < \cos \varphi_0. \end{cases} \quad (3)$$

Необходимость введения такой функции связана с особенностями первичного и вторичного излучателя. Неравномерное распределение энергии в пучке, идущем от Солнца, которое, как правило, не учитывается, в задачах концентрации становится критичным и подлежащим учёту. Кроме того, поверхность концентратора не является идеально гладкой. Она имеет неточности (абберации), возникающие в процессе изготовления и эксплуатации.

Именно эти два критерия – характер распределения энергии в пучке, который попадает на приёмник (вид функции индикатрисы), а также метод учёта аббераций – предполагается положить в основу выбора метода решения задачи.

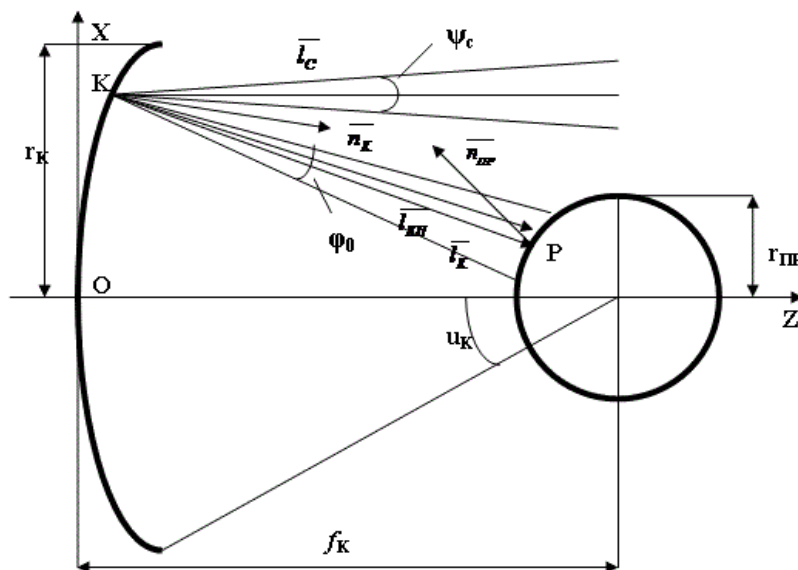


Рис. 1. Схема системы концентрации "ПЦК – трубчатый приёмник тепла".

В работе [4] был проведён подробный анализ возможных предположений о характере распределения энергии в пучке, а также о методах учёта неточностей зеркала. На основе этого анализа был выбран вероятностный подход по учёту aberrаций, основанный на предположении о том, что распределение угловых неточностей поверхности зеркала  $\Delta\gamma_K, \Delta\nu_K$  подчинено нормальному закону распределения, который для случая ПЦК ( $\Delta\gamma_K \gg \Delta\nu_K$ ) записывается так:

$$P(\Delta\gamma_K) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\gamma} \exp\left(-\frac{\Delta\gamma_K^2}{2\sigma_\gamma^2}\right), \quad (4)$$

причём среднеквадратичное отклонение поверхности выражается в долях угла раскрытия Солнца  $\sigma_\gamma = S \cdot \psi_C$ .

Выбор вида функции индикатрисы базировался на том, что в падающем пучке наиболее неравномерно распределено коротковолновое излучение, которое почти полностью рассеивается на микрорельефе отражающей поверхности, при этом для длинноволновой части спектра поверхность относительно точного концентратора может считаться оптически гладкой. Поэтому с достаточной точностью можно принять равномерный закон распределения энергии в пучке, идущем от Солнца на концентратор и от концентратора на приёмник  $f(\varphi) = 1$ . При этом угол раскрытия пучка будет равен углу раскрытия Солнца  $\varphi_0 = \psi_C$ .

**Выбор метода решения и особенности его реализации.** В математической модели (1) искомая величина – плотность излучения, падающего на поверхность приёмника – содержится в явном виде. Поэтому решение задачи концентрации (1)–(4) сводится к вычислению интеграла, у которого область непрерывности подынтегральной функции имеет сложный и трудноопределяемый характер. Очертания границ области зависят от поведения функции Хевисайда, которая, в свою очередь, определяется статистической величиной. В этом случае применение аналитических или графоаналитических методов затруднено. Численные методы, основанные на квадратурных

формулах, также не могут привести к желаемому результату. Очевидно, что единственным численным методом, который полностью соответствует приведенной выше постановке, является метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). В настоящее время он получил широкое распространение благодаря простоте моделирующих алгоритмов, возможности их перестройки при изменении условий задачи, нечувствительности к незначительным сбоям в ходе вычислительного процесса, относительно невысокой требовательности к ресурсам вычислительной техники. Основной недостаток метода – его сравнительно невысокая точность. Несколько нивелировать его помогают специальные математические подходы и приёмы.

Среди двух классических методов статистического интегрирования [5] был выбран тот, который предполагает вычисление интеграла как математического ожидания функции некоторого случайного вектора. Этот способ не требует предварительного задания экстремальных значений подынтегральной функции и к тому же обладает повышенной точностью.

Создание алгоритма статистического интегрирования состояло из 4-х этапов [6]. На первом этапе для фиксированной точки приёмника проводилась процедура формирования координат случайной точки на поверхности концентратора и вычисление направляющих косинусов поверхности идеального концентратора. На втором этапе организуется модуль для вычисления значения функции Хевисайда  $\chi(\vec{l}_{KП})$ , здесь же, с помощью алгоритма, основанного на центральной предельной теореме теории вероятности, проводилось моделирование нормированной случайной величины  $\Delta\gamma_K$  – углового отклонения нормали реального концентратора от математически идеального. На третьем этапе рассчитывалось значение подынтегральной функции и проводилась оценка полученного интеграла. Заключительный этап расчёта связан с определением необходимого количества независимых испытаний, что, в свою очередь, связано с точностью и достоверностью полученных результатов.

**Результаты численного моделирования.** Численные эксперименты по выявлению особенностей теплообмена в системе концентрации были проведены для установки "ПЦК – трубчатый теплоприёмник", которая исследовалась экспериментально на полигоне Ферганского политехнического института [7]. Основные геометрические параметры установки такие: формула параболы в профиле:  $y^2 = 2,6x$ ; диаметр концентратора  $d_K = 1,7$  м; угол раскрытия  $u_K = 60^\circ$ ; площадь миделя зеркала  $B \times L = 1,7 \text{ м} \times 5 \text{ м}$ ; радиус трубчатого приёмника  $r_{ПР} = 0,021$  м. Поверхность зеркала алюминиевая с коэффициентом отражения  $\beta_{АЛЮМ} = 0,8$ . Исследования проводились при значении прямой солнечной радиации  $E_C = 700 \text{ Вт/м}^2$ .

В ходе численных исследований стояла задача выявить следующие основные закономерности:

- влияние аберраций поверхности концентратора на его энергетические характеристики;
- определение оптимального угла раскрытия концентратора, при котором обеспечиваются наиболее высокие значения теплового потока на поверхности приёмника;
- влияние расположения приёмника относительно фокуса концентратора.

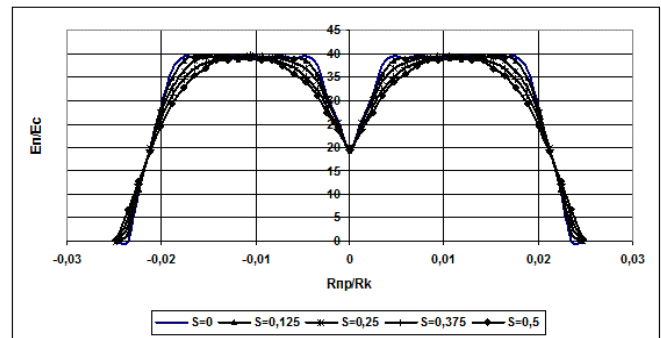
Как отмечалось выше, определение среднеквадратичных отклонений угловых ошибок поверхности концентратора целесообразно проводить в долях угла раскрытия Солнца  $\sigma_\gamma = S \cdot \psi_C$ .

Вначале были исследованы относительно точные концентраторы, для которых  $S = 0 \div 0,5$ . На рис. 2. представлено распределение солнечного излучения на поверхности таких зеркал.

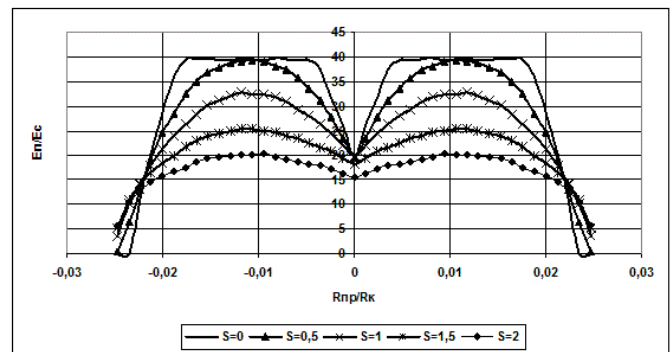
Как видно из графика, незначительные отклонения ПЦК от идеальной формы практически не влияют на энергетические характеристики приёмника, в отличие от параболоидного зеркала, которое также исследовалось по предлагаемой методике в связи с перспективами его использования в космической энергетике [8].

На рис. 3 представлены результаты исследования влияния аберраций для менее точных зер-

кал  $S = 0 \div 2$ . Как видно из графика, при среднеквадратичном отклонении, которое соответствует угловому размеру Солнца  $\psi_C = 16'$ , энергетические характеристики приёмника начинают существенно снижаться. При этом распределение тепловых потоков на поверхности приёмника становится более равномерным, а радиус фокального пятна увеличивается.



**Рис. 2.** Влияние неточности поверхности зеркала на распределение облучения на поверхности приёмника при  $S = 0 \div 0,5$ .



**Рис. 3.** Влияние неточности поверхности зеркала на распределение облучения на поверхности приёмника при  $S = 0 \div 2$ .

В связи с этим следует отметить, что к задачам теории концентрированного излучения затруднительно применить теорию подобия. Соотношения полученной математической модели отражают лишь общие физические закономерности, присущие рассматриваемому явлению. Тут затруднительно получить обобщённые переменные на основе анализа уравнений. Поэтому большинство результатов, хотя и имеют формально безразмерный вид, фактически связаны с конкретной геометрией системы и выбранными оптическими характеристиками.

Выбор наиболее рациональных геометрических параметров системы приёма в основном сводится к выбору оптимального значения угла раскрытия зеркала, поскольку диаметр зеркала глав-

ным образом зависит от требуемой мощности.

Наличие аберраций на поверхности концентратора оказывает существенное влияние на выбор рационального угла. В [9] проведено исследование влияния геометрии ПЦК на соотношение между линейными отклонениями точек пересечения лучей с фокальной плоскостью и определяющими их угловыми флуктуациями отражающей поверхности. Оказалось, что такое соотношение имеет наименьшую среднюю величину при углах раскрытия, близких к  $u_k = 60^0$ . Общую тенденцию, связанную с влиянием угла раскрытия, можно проследить, используя приведенную выше методику. На рис. 4 проиллюстрировано влияние угла раскрытия зеркала на энергетические характеристики приёмника; при этом не учитывалось изменение величины фокального пятна и изменение геометрии той области в нём, где концентрируется основная часть солнечной энергии.

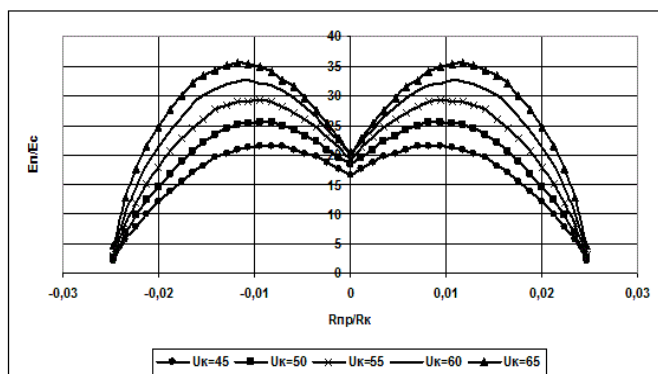


Рис. 4. Влияние угла раскрытия концентратора на облучённость приёмника при  $S = 1$ .

Принимая во внимание сказанное выше, можно сделать вывод о том, что наиболее оптимальным является угол раскрытия ПЦК, близкий к  $60^0$ .

Вопрос, связанный с расположением теплоприёмника относительно фокуса концентратора, является важным для принятия различных конструкторских и тепловых схем функционирования системы. Вариациями местоположения приёмника и различными формами его затемнения можно изменять тепловой поток, поступающий на концентратор, а, следовательно, и температурный режим всей установки.

Результаты численного моделирования облучённости приёмника при изменении его положения относительно фокуса концентратора ( $S = 0,5$ ) на расстояние  $a \cdot r_{ПП}$  вправо показаны на рис. 5.

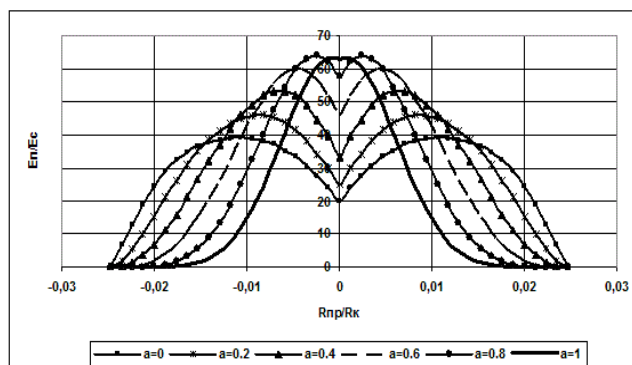


Рис. 5. Распределение облучённости приёмника при его удалении от фокуса вправо ( $S = 0,5$ ).

Как видно из графиков, кривая облучённости изменяется, при этом существенно изменяется её максимальное значение. Этот факт можно в дальнейшем использовать при определении соотношения теплоизолированной части канала к открытой, которая и является непосредственным местом приёма лучистой энергии Солнца.

На рис. 6. представлены результаты численных экспериментов по определению облучённости приёмника при перемещении его относительно фокуса влево, ближе к концентратору, (при  $S = 0,5$ ). Анализируя графики, можно сделать вывод о том, что при приближении к концентратору энергетические характеристики приёмника снижаются, при этом радиус фокального пятна возрастает. Такой факт может быть полезным при проектировании приёмников смешанного типа, в конструкции которых используются фотоэлектрические преобразователи. Для таких преобразователей важным является равномерность распределения облучённости по их поверхности, что и наблюдается в данном случае.

Были также проведены исследования по определению средних значений концентрации при изменении расположения приёмника относительно фокуса. Так, для случая, когда теплоприёмник расположен правее от фокуса, изменение средней степени концентрации представлено на рис. 7.

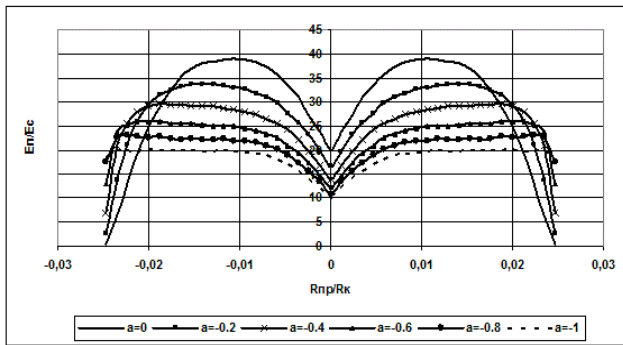


Рис. 6. Изменение распределения облучённости приёмника при приближении его к концентратору ( $S = 0,5$ ).

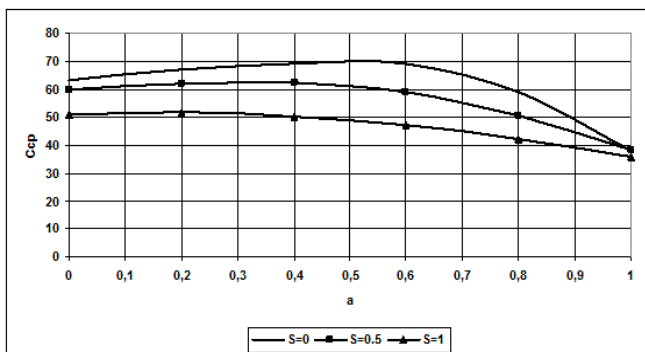


Рис. 7. Изменение величины средней концентрации солнечного излучения при удалении теплоприёмника от фокуса.

Из анализа графиков на рис. 5 и рис. 7 следует, что при удалении от фокуса максимальное значение концентрации существенно возрастает, однако при этом среднее её значение для реальных зеркал падает.

**Сравнение численной методики с экспериментом.** Экспериментальная установка по исследованию облученности поверхности трубчатого приёмника потоком солнечного излучения, идущего от ПЦК, состояла из трёх модулей общей площадью  $S_{обц} = 25 \text{ м}^2$  и протяжённостью  $L = 15 \text{ м}$ . При такой длине влияние концевых эффектов на трубчатом приёмнике с перемещением Солнца в течение светового дня невелико.

Отражатель каждого модуля представляет собой несущую раму V-образного сечения с узлами для установки ложементов и отражающего покрытия – листов зеркального алюминия. Установка имеет горизонтальную оптическую ось вращения.

Приёмник представляет собой стальную трубу, покрытую термостойкой кремнийорганической чёрной краской. Эта труба помещена в тон-

кую стеклянную трубу  $\delta = 0,001 \div 0,0015 \text{ м}$ , изготовленную из молибденового стекла с идеальной пропускной способностью в области солнечного спектра. Для теплоизоляции на необлучаемой поверхности установлен экран из тонкого листового термослоя.

Лучистые потоки, отражённые от параболоцилиндрических модулей, измерялись микрофотодатчиками. Измерения проводились в шести сечениях с промежутком 1 м в фокусе каждого зеркала. По результатам измерений были построены кривые распределения лучистых потоков. Сравнение типичной экспериментальной кривой с кривой, полученной в результате численного расчёта при значении прямой солнечной радиации  $E_c = 700 \text{ Вт/м}^2$ , представлены на рис. 8.

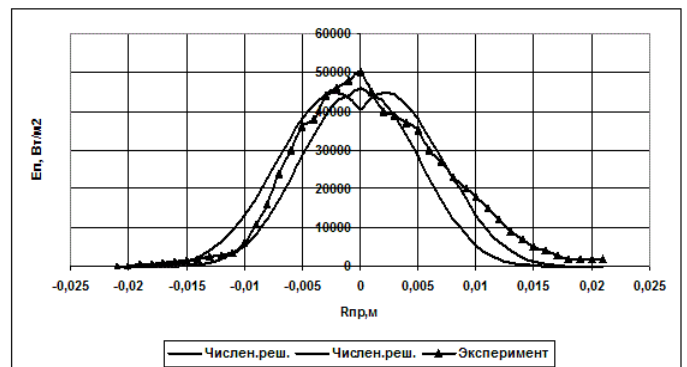


Рис. 8. Сравнение результатов численного расчёта с экспериментальными данными.

**Выводы.** Графики на рис. 8 показывают хорошее согласование результатов численного и экспериментального исследования. Некоторое расхождение результатов на оси теплоприёмника связано, вероятно, с конструктивными особенностями расположения приёмника на фокусной линии концентратора, что, тем не менее, позволяет сделать вывод о достоверности полученных результатов и обоснованности проведённого на основе них анализа.

1. [http://www.woodheat.ru/doklad/spain\\_sun.html](http://www.woodheat.ru/doklad/spain_sun.html)
2. <http://sun.jofo.ru/27876.html>
3. <http://www.basinandrangewatch.org/SolarOneNV.html>
4. Кныш Л.И. Влияние неточности изготовления зеркала на энергетические показатели системы "концентратор-приёмник тепла" солнечной энергоустановки // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. – 2011. – Т. X. – С. 36–42.

5. *Ермаков С.М.* Статистическое моделирование – М., ФИЗМАТЛИТ, 1982.– 295 с.
6. *Кныш Л.И., Давыдов В.И.* Применение метода статистических испытаний для расчёта облучённости приёмника тепла концентрированным потоком солнечной энергии // *Вісник Дніпропетровського університету. Серія Механіка.* – 2009. – №5. – Т.17. Випуск 13. – Т.1. – С. 51–59.
7. *Конохова И.И., Кабаков В.И., Эргашев С.Ф., Дробязгина О.С.* Результаты испытаний солнечной параболоцилиндрической установки // *Гелиотехника.* – 1991. – №2. – С. 14–16.
8. *Кныш Л.И.* Оценка облученности теплоприемника солнечной энергетической установки с параболоидным концентратором // *Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки.* – 2010. – Т. X. – С. 17–22.
9. *Сильверн Д.* Анализ требований к точности концентрирующих зеркал для солнечных энергетических установок. – В кн. *Энергетические установки для космических аппаратов.* – М.: Мир, 1964. – С. 85–94.