

УДК 621.472

Л.И. КНЫШ, О.Г. ГОМАН

Днепропетровский национальный университет имени Олеса Гончара

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГОМАССОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ ПРИЁМА ТЕПЛА СОЛНЕЧНОЙ ПАРАБОЛОЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Предлагается численный алгоритм для расчёта энергомассопереноса в системе приёма солнечного излучения солнечной термодинамической станции с параболическими концентраторами. Алгоритм базируется на мультифизическом подходе и состоит из четырёх последовательно работающих программных модулей. Результат вычисления в каждом модуле является начальным или граничным условием для следующего. Компьютерный алгоритм позволяет определить наиболее рациональные геометрические, динамические и теплофизические показатели системы приёма.

Ключевые слова: термодинамическая солнечная станция, параболический цилиндрический концентратор, мультифизический подход, метод Монте-Карло, численное решение уравнения Навье-Стокса.

Л.І. КНИШ, О.Г. ГОМАН

Дніпропетровський національний університет імені Олеса Гончара

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОМАССОПЕРЕНОСУ В СИСТЕМІ ПРИЙОМУ ТЕПЛА СОНЯЧНОЇ ПАРАБОЛОЦИЛИНДРИЧНОЇ СТАНЦІЇ

Запропоновано чисельний алгоритм для розрахунку энергомассопереносу в системі прийому сонячного випромінювання сонячної термодинамічної станції з параболическими концентраторами. Алгоритм базується на мультифизичному підході та складається з чотирьох послідовно працюючих програмних модулів. Результат розрахунків в кожному модулі є початковими або граничними умовами для наступного. Комп'ютерний алгоритм дозволяє визначити найбільш раціональні геометричні, динамічні та теплофізичні показники системи прийому.

Ключові слова: термодинамічна сонячна станція, параболический цилиндричний концентратор, мультифизичний підхід, метод Монте-Карло, чисельний розв'язок рівняння Нав'є-Стокса.

L. KNYSH, O.GOMAN

Oles Honchar Dnipropetrovsk National University

MODELING FEATURES OF ENERGY-MASS TRANSFER IN THE HEAT RECEIVER SYSTEM OF THE SOLAR PARABOLIC CYLINDRICAL PLANT

Numerical algorithm for analysis of energy/mass transfer in the solar radiation receiver system of thermodynamic solar plant with cylindrical parabolic concentrator is proposed. An algorithm is based on multi-physical approach and consists of the four software packages that work in sequence. Each package yields results that form initial/boundary conditions for next package. An algorithm enables to determine the most rational geometric, dynamic and thermophysical parameters of receiver system.

Keywords: thermodynamic solar plant, cylindrical parabolic concentrator, multi-physical approach, Monte-Carlo method, numerical solution of Navier-Stokes equations.

Постановка проблеми

Высокий уровень инсоляции, характерный для большей части территории Украины, способствует бурному развитию солнечных энерготехнологий. Автономные системы горячего водоснабжения на основе солнечных коллекторов являются неременным атрибутом многих гостиничных комплексов Причерноморья, фермерских хозяйств, частных усадеб. Популярными становятся автономные фотоэлектрические системы, способные полностью обеспечивать электроэнергией индивидуальные жилые и производственные здания. В последние годы широкое распространение получили фотоэлектрические солнечные станции большой мощности, генерирующие электроэнергию в общую сеть. Такие системы экологически безопасны, но имеют низкую эффективность (12-15%) при значительной первоначальной дороговизне оборудования и земельных площадей. Кроме того, относительно небольшой срок эксплуатации фотоэлектрических станций не позволяет сделать объективный вывод о деградации солнечных батарей и связанным с этим снижением эффективности станции.

Подобных недостатков полностью лишены термодинамические солнечные станции, КПД которых приближается к 25-30%. Термодинамическая солнечная технология хорошо апробирована в мире и базируется на классическом паротурбинном цикле. Опытная термодинамическая солнечная станция СЭС-5 в недавнем прошлом функционировала в Украине, но по объективным причинам её работа была приостановлена. Эксплуатация СЭС-5 доказала принципиальную возможность создание термодинамических

солнечных станций в климатических условиях Украины. СЭС-5 была спроектирована в виде башни, что предполагает двухосевую систему слежения за Солнцем. На привод такой системы при небольших мощностях (до 5 МВт) уходит большая часть вырабатываемой электроэнергии. Более экономичной в этом смысле является параболоцилиндрическая термодинамическая солнечная станция, система приёма которой одноосевая, и, с точки зрения эксергии, более оптимальна.

При создании параболоцилиндрических станций используется теплоэнергетическое оборудование, характерное для паротурбинного цикла. В этом смысле расчёт стоимости и окупаемости станции не представляет большого труда. Главная проблема – это проектирование систем приёма солнечного излучения. Эта часть станции является наиболее финансовозатратной и долгоокупаемой. Стоимость системы приёма составляет от 60% до 75% общей стоимости станции [1,2]. Поэтому моделирование и расчёт наиболее рациональных энергетических параметров системы приёма, состоящей из параболоцилиндрического концентратора с расположенным в его фокусе трубчатым теплоприёмником, является важной наукоёмкой проблемой, элементы решения которой представлены в данной работе.

Анализ последних исследований и публикаций. Формулирование цели исследования

Методика расчёта и проектирования системы приёма параболоцилиндрических солнечных станций состоит из нескольких самостоятельных задач, связанных одной логической конструкцией. Эти задачи решаются на основе различных математических и физических моделей, причём результат каждой из них является начальным условием для следующей задачи. Такой подход можно считать мультифизическим для конкретной системы, в отличие от обобщённого мультифизического подхода, моделирующего работу всех систем объекта [3,4].

Структурно моделирование проводилось в четыре этапа. На первом этапе вычислялось значение интенсивности солнечной радиации в зависимости от климатических факторов, порядкового дня в году и географии местности, где предполагается проектирование солнечной станции. Кроме того, учитывалась интегральное значение плотности теплового потока от Солнца, соответствующее определённому дню года. Такие расчёты делались на основе созданной методики, в которой предполагалось синусоидальное распределение плотности теплового потока в течение суток [5]. Подобных методик существует множество и все они, как правило, базируются на классических астрономических формулах с незначительными уточняющими дополнениями [6].

Среди множества подобных зарубежных коммерческих программ следует отметить приложения Google, в которых рассчитываются необходимые параметры солнечных энергоустановок. Но география этих программ ограничена некоторыми районами Калифорнии, Аризоны, Невады.

Вычисленное значение интенсивности теплового потока от Солнца является важной частью математической модели, которая положена в основу следующего этапа моделирования, на котором вычисляется облучённость теплоприёмника отражённым тепловым потоком от концентратора. Значение облучённости вычислялось на основе метода статистических испытаний Монте-Карло [7]. Выбор метода определялся спецификой задачи, связанной с необходимостью вычисления геометрических размеров трубчатого теплоприёмника, находящегося в фокусе концентратора. Энергетические параметры концентратора можно определить и другими методами, в частности, на основе электромагнитной теории, геометрической оптики и пр. [8,9].

Вычисленное значение теплового потока, что падает на теплоприёмник, является граничным условием для расчёта тепломассопереноса внутри трубчатого теплоприёмника. Теплоноситель, который движется в нём, играет роль рабочего тела для двухконтурного паротурбинного цикла. Вычисление температурного и динамического режима теплоприёмника проводится на третьем этапе решения и базируется на численном моделировании уравнения Навье – Стокса [10]. В результате такого моделирования становится возможным найти интегральные значения температур на выходе из канала и вычислить тепловую мощность системы приёма. На заключительном этапе проводится сравнение полученного значения с проектной мощностью системы с последующим уточнением результатов.

Представленный подход позволяет минимизировать временные затраты на расчёт системы приёма, обеспечить прозрачность такого расчёта, отказаться от использования дорогостоящих и требующих дополнительной наладки стандартных пакетов. Выбор рациональных параметров системы приёма проводится в одном программном модуле, в котором максимально учтены факторы, влияющие на энергоперенос.

Изложение основного материала исследования

Общая структура созданного программного модуля представлена на рис.1. Предполагаемое место проектирование солнечной электростанции – географические координаты – вносятся в качестве начальных значений в программу GEOGRAPHY. Там же расположены астрономические показатели выбранной местности, среди которых наиболее важные – время восхода и захода Солнца для каждого дня года. Климатические показатели местности – облачность, запылённость, усреднённое значение альбедо и пр. рассматриваются в программе GEOGRAPHY посезонно. Вычисленное в GEOGRAPHY значение интенсивности солнечной радиации является приближённым, основанным на интегральных данных. Такой подход требует значительного уточнения и согласования со специальной системой слежения за Солнцем,

являючись важливим елементом системи приёма. Но алгоритмизация работы этой системы – отдельная самостоятельная задача, рассмотрение которой не входит в объект исследования данной работы.

Вычисленное в GEOGRAPHY значение интенсивности солнечной радиации E_C передаётся в программу SUN, в которой моделируется лучистый теплоперенос в системе «Солнце – концентратор – теплоприёмник». Математическая модель этого процесса базируется на интегральном соотношении (1), в котором учтено большинство факторов, влияющих на данный процесс:

$$E_{ПП} = \frac{E_C}{2\pi} \iint_{S_K} \frac{\beta_K f(\varphi) \cdot \xi(\bar{l}_{КП}) \cdot \chi(\bar{l}_{КП}) \cos(-\bar{l}_C, \bar{n}_K) \cos(\bar{l}_{КП}, -\bar{n}_{ПП}) dS_K}{l_{КП}^2 \int_0^{\varphi_0} f(\varphi) \sin \varphi d\varphi} \quad (1)$$



Рис.1. Структурная схема созданного программного модуля

К таким факторам относятся геометрические показатели концентратора и теплоприёмника: площадь концентратора S_K ; величина, характеризующая взаимное расположение концентратора и теплоприёмника в пространстве $\cos(\bar{l}_{КП}^0, -\bar{n}_{ПР})$; величина, характеризующая ориентацию концентратора на Солнце $\cos(-\bar{l}_C^0, \bar{n}_K)$; длина вектора, соединяющего произвольную точку концентратора и теплоприёмника $l_{КП}$. Отражательная способность материала зеркала характеризуется величиной β_K , а неравномерность распределения энергии в пучке, который идёт от Солнца к концентратору и от концентратора к теплоприёмнику учитывается введением функции индикатрисы излучения $f(\varphi)$.

В соотношении (1) входят также функции типа Хевисайда $\xi(\bar{l}_{КП})$ и $\chi(\bar{l}_{КП})$, которые указывают, попал ли луч, идущий от концентратора на поверхность теплоприёмника. Возможность непопадания луча на поверхность теплоприёмника связана с наличием аберраций – отклонений поверхности концентратора от идеальной формы. Такие отклонения могут быть технологического и эксплуатационного характера. Одним из методов их учёта является использование вероятностного подхода. В частности, предполагалось, что величины углов, характеризующих аберрации, подчиняются нормальному вероятностному закону.

Математическая модель лучистого теплопереноса в системе «Солнце – концентратор – теплоприёмник» реализована в программе SUN методом Монте-Карло, что обусловлено физической картиной явления. Результатом работы программы SUN является не только вычисление плотности теплового потока, что падает на поверхность теплоприёмника, но и вычисление геометрических размеров трубчатого теплоприёмника, который расположен в фокусе концентратора. Полученные значения являются исходными данными для программы TEMPERATURE по вычислению полей температур внутри теплоприёмника.

Численный алгоритм программы TEMPERATURE базируется на математической модели по вычислению безразмерного поля температур $\vartheta(R, \Theta, Z)$ в круглой трубе. Система уравнений Навье – Стокса для такой геометрии существенно упрощается и состоит из уравнения энергии и выражения для профиля скорости $W_Z(R)$, что характеризует стабилизированное течение теплоносителя при разных режимах.

Уравнение энергии в безразмерных координатах имеет вид:

$$W_Z(R) \frac{\partial \vartheta(R, \Theta, Z)}{\partial Z} = \frac{\partial^2 \vartheta(R, \Theta, Z)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \vartheta(R, \Theta, Z)}{\partial R} + \frac{1}{4\pi^2 R^2} \frac{\partial^2 \vartheta(R, \Theta, Z)}{\partial \Theta^2}, \quad (2)$$

и дополняется нетривиальными граничными условиями на внешней стороне теплоприёмной трубы. В частности, из SUN в программу TEMPERATURE передаётся дискретное значение плотности теплового потока, вычисленное методом Монте-Карло. Этот же метод позволяет определить геометрические размеры фокусного пятна, которое занимает лишь часть теплоприёмной поверхности трубы. Именно с этим связано введение в уравнение (2) угловой координаты.

В программу TEMPERATURE также передаётся значения профиля скорости $W_Z(R)$ из подпрограммы SPEED. В SPEED предусмотрено вычисление квадратичного профиля скорости для ламинарного течения теплоносителя, а также несколько вариантов турбулентного профиля. Анализ физической модели процесса, температурный режим, который характерен для данных систем, позволил сделать вывод, что наилучшие характеристики при турбулентном режиме обеспечивает профиль скорости Рейхардта. Подтверждение этого приводится в [11], где сравниваются коэффициенты турбулентного переноса, рассчитанные по моделям Прандтля-Кармана, Рейхардта и Дайслера. В турбулентном ядре все модели показывают хорошее согласование с экспериментом и могут считаться равнозначными. В пристеночной области двухслойная модель Прандтля и трёхслойная модель Кармана дают грубую аппроксимацию. Формулы Рейхардта и Дайслера в непосредственной близости от стенки отличаются незначительно, но кривая модели Рейхардта лучше аппроксимирует изменение коэффициента турбулентного переноса в пристеночной области, поэтому этому методу было отдано предпочтение.

Для расчёта температурного поля внутри теплоприёмной трубы использовался метод контрольного объема. Неявная маршевая схема позволила обеспечить устойчивость решения и оптимизировать время расчёта. Выбор шага расчётной сетки определялся критерием устойчивости, в качестве которого выбиралось сеточное число Пекле, характерное для схемы «против потока». Алгоритм для численного решения параболического уравнения (2) базировался на расщеплении по радиальной и угловой координате с последующей реализацией метода прогонки. По завершению расчёта определялась бреднеинтегральная температура на выходе из канала. При постоянных значениях плотности и теплоёмкости теплоносителя эта величина в безразмерных переменных имеет вид:

$$\bar{q}_{CP} = \frac{\bar{T} - T_0}{T_{BX} - T_0} = 4 \int_0^1 (1 - R^2) \mathcal{G}(R, \Theta) R dR .$$

Такая величина является определяющей для вычисления интегрального значения мощности теплового потока в канале и сравнения его с проектными параметрами. В случае существенного отклонения результатов от заданных параметров в рамках итерационного процесса происходит уточнение выбранных геометрических, динамических или теплофизических параметров.

Выводы

Проведённая методология позволяет, без использования стандартных прикладных пакетов и дорогостоящих экспериментальных исследований, максимально быстро провести расчёт проектных параметров системы приёма солнечного излучения термодинамической солнечной станции. В созданном программном алгоритме реализована математическая модель, в которой учтены все наиболее важные физические аспекты, влияющие на энергетические показатели системы приёма параболоцилиндрических станций. Методика легко может быть адаптирована для расчёта перспективных комбинированных станций, а также других энергетических систем с концентраторами разных типов.

Список использованной литературы

1. Peter Gevorkian. Large-Scale Solar Power System Design. An Engineering Guide for Grid-Connected Solar Power Generation – McGraw –Hill, New York, 2011. – P.378
2. Werner Vogel, Henry Kalb. Large-Scale Solar Thermal Power: Technologies, Costs and Development – WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2010. – 461 P.
3. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование электротехнических устройств – Теоретична електротехніка та електрофізика. – 2015, №2. – С.3 – 15.
4. Усовершенствованные средства инженерного анализа для принятия обоснованных решений о производстве изделий – www.siemens.com/plm/nxcae - Режим доступа: <http://www.ideal-plm.ru/uEditor/files/4/NXCAE.pdf>
5. Кныш Л.И. Особенности эксплуатации солнечных коллекторов с учётом климатических, географических и астрономических факторов / Кныш Л.И. // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» – 2015. – №15–16(179–180). – С. 10 – 14.
6. Борцов А.В., Потовская Е.И. Определение интенсивности солнечного излучения для наклонной принимающей поверхности // Вісник НТУ «ХП». – 2013. – №59(1032) – С. 34 – 39.
7. Кныш Л.И. Численное моделирование лучистого теплопереноса в системе концентрации солнечного излучения «параболоцилиндрический концентратор - трубчатый теплоприёмник» / Л.И. Кныш // ISSN 1819–8058, Відновлювана енергетика – 2012. – #3(30). – С. 26 – 32.
8. Гаевский А.Ю., Ушкаленко О.В. Расчёт распределения мощности электромагнитного излучения в солнечных концентраторах // Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – №23. – С.39 – 44.
9. Ароян О.С., Геруни С.П. Программа расчёта параметров солнечного параболоцилиндрического концентратора // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» – 2005. – №11(31). – С. 42 – 46.
10. Knysh L.I. Selecting the flow regime of the heat transfer in the heat receivers of solar energy plant with cylindrical parabolic concentrators // Knysh L.I. // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. – 2014. – № 15, (155). – С. 20 –25.
11. Петухов Б.С. Теплообмен в ядерных энергетических установках. / Б.С. Петухов, Л.Г. Генин, С.А. Ковалёв. – М.,1974. – 408 стр.