

1. Суржик Т.В. Экспериментальные исследования абсорбера полимерных солнечных коллекторов на долговечность // *Відновлювана енергетика*. – № 1. – 2008. – С. 25–29.

## REFERENCES

1. Surzhuk T.V. Experimental study absorber polymer solar collectors durability // *Renewable energy*. – №1 – 2008. – Pp. 25–29 (Ukr).

**А.Н.Суржик** (Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев)

**Экспериментальное исследование на долговечность композиционных материалов коллекторов солнечной энергии**

*Проведены экспериментальные исследования на долговечность композиционных материалов коллекторов солнечной энергии на основе углерода и наполнителей. Библ. 1, табл. 1.*

**Ключевые слова:** солнечный коллектор, композиционный материал, долговечность.

**О.М.Surzhuk** (Renewable Energy Institute of NAS of Ukraine, Kyiv)

**Experimental study on the durability of composite materials collectors of solar energy**

*Experimental studies have been conducted on the durability of composite materials Solar energy and carbon-based fillers. Reference 1, table 1.*

**Keywords:** solar collector, composite, durability.

## SYNOPSIS

Experimental research on durability conducted to determine the life of the composite material absorber solar collector (SC) under natural climatic conditions; the ability of the design to keep operating until the end of the period specified in the terms of the margin needed to preserve functional properties. SK investigated absorbers made of composite materials for solar collectors, which included basic component, fillers and binders. During the tests measured: temperature in a heat chamber of artificial weather; energy radiation coming from the radiation source unit sample surface; temperature and pressure of the internal liquid medium experimental design; including the test and the destruction of the sample.

Стаття надійшла до редакції 07.06.16

Остаточна версія 14.06.16

УДК 621.472

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

**Программный модуль для комплексного исследования энергопереноса в теплоприёмниках солнечных параболоцилиндрических станций**

*Предлагается алгоритм расчета геометрических, динамических и энергетических параметров системы приёма параболоцилиндрических солнечных станций. Алгоритм базируется на фрагментарном мультифизическом подходе, основанном на взаимодействии нескольких методик, различных по своей математической сути. Предлагаемый программный продукт может заменить достаточно громоздкие и дорогостоящие вычисления на основе стандартных пакетов, обеспечить максимально быстрое взаимодействие между основными расчётными блоками и проведение множества численных экспериментов по нахождению параметров системы, близких к проектным. Библ. 9, рис. 1.*

**Ключевые слова:** солнечная параболоцилиндрическая станция, система приёма солнечного излучения, концентратор, трубчатый теплоприёмник, мультифизический подход.

ORCID 0000-0003-3525-4804

**Введение.** Поступательное развитие солнечной энергетики на данном этапе уже практически не зависит от конъюнктуры цен на энергоносители, политических и социальных изменений и других факторов, далёких от науки и технического прогресса. Следует отметить, что в мировой возобновляемой энергетике в большей или

меньшей мере востребованы все типы преобразования солнечной энергии, базирующиеся на кардинально разных методах и подходах. "Солнечные" проекты, как правило, инвестируются частными компаниями, поэтому, зачастую, выбор типа предлагаемых систем зависит от апробированности данной технологии в проектной компании.

© Л.И.Кныш, 2016

На территории Украины реализовано или планируется к реализации множество проектов солнечных фотоэлектрических энергосистем, которые показали свою высокую энергетическую эффективность и экологическую чистоту [1]. Относительно короткий срок эксплуатации фотоэлектрических станций ещё не позволяет накопить достаточный материал по некоторым негативным моментам, которые связаны с естественной деградацией солнечных элементов и существующими при этом потерями мощности. Учёт этих факторов приведёт, в конечном счёте, к повышению сроков окупаемости таких станций и стоимости вырабатываемой на них электрической энергии.

Менее уязвимы в этом смысле термодинамические солнечные станции, проектированию которых отдают предпочтение в США (Solana Generating Station Project, Ivanpah Solar Electric Generating system), Испании (Solaben Solar Power Station), Южной Африке (Khi Solar One, Vokroort), во многих арабских странах (Miraah, Noor, Shams Solar Power Station). Эти системы имеют значительные преимущества в эффективности и долговечности по сравнению с фотоэлектрическими станциями. Причём эффективность термодинамических станций существенно возрастает с увеличением мощности. Классический паротурбинный цикл в этих станциях может быть дополнен фотоэлектрическим контуром. Эффективность таких комбинированных систем возрастает и представляет собой сумму КПД двух независимых циклов [2, 3].

Функционирование опытной солнечной термодинамической станции СЭС-5 показало возможность использования термодинамической солнечной технологии в местах высокой инсоляции (побережье Черного и Азовского морей, Закарпатье, Центральные и Восточные районы Украины). СЭС-5 была выполнена в виде башни. Зеркала таких станций чётко ориентированы на Солнце, что обеспечивается двухосевой системой слежения. На привод данной системы затрачивается значительный энергетический потенциал станции. В этой связи более экономичными явля-

ются термодинамические параболоцилиндрические станции с одноосевой системой слежения за Солнцем.

Реализуемый в таких станциях классический паротурбинный цикл практически не требует дополнительных доводов и базируется на элементной базе, характерной для традиционной энергетики. Цена отпускаемой электрической энергии, срок окупаемости параболоцилиндрических станций и другие важные экономические параметры в данном случае во многом определяются проектными характеристиками систем приёма солнечного излучения. Поэтому создание математических моделей энергопереноса в приёмных системах термодинамических станций и реализация на их основе быстродействующих алгоритмов расчёта – важнейшая задача, стоящая перед проектировщиками таких станций. Один из этапов решения этой задачи представлен в данной работе.

#### **Постановка задачи и метод её решения.**

Система приёма параболоцилиндрической станции включает в себя три основных объекта – Солнце, как первичный источник тепла, концентратор, как вторичный источник и трубчатый теплоприёмник с движущимся внутри теплоносителем. Множество факторов различной физической природы, которые влияют на энергоперенос в этой системе, существенно усложняют математическое моделирование и разработку алгоритмов расчёта. Кроме того, использование разных подходов к расчёту (детерминированных и недетерминированных) делает проблематичным сопряжение основных расчётных моментов. Эту проблему предлагается решать на основе подходов, характерных для мультифизического моделирования, важной концепцией которого является использование результатов одной модели в качестве начальных или граничных условий для другой модели. Такой метод позволяет получать результаты, подробно отражающие суть физических явлений, используя различный математический аппарат. При этом алгоритмизацию созданной математической модели предполагается реализовывать в едином информационном пространстве, что приводит к повышению

точности результатов, минимизации временных затрат на подготовку модели и трансляцию промежуточных результатов.

Конечно, понятие мультифизичности чаще воспринимается в широком смысле, под которым понимается использование суперкомпьютерных технологий, обеспечивающих имитационное моделирование сложных инженерных систем. Это моделирование проводится с использованием специальных пакетов, которые часто разрабатываются или адаптируются под конкретное наукоемкое производство. Однако такой подход можно использовать и в более узком, фрагментальном смысле, в частности, при моделировании взаимосвязанных процессов энергомассопереноса в системе "Солнце – концентратор – теплоприёмник". Некоторые этапы, на которых базируется разработка такого алгоритма, представлены ниже.

**Этапы расчёта.** На первом этапе исследования необходимо провести расчёт плотности лучистого теплового потока, который, отражаясь от поверхности концентратора, поступает на поверхность теплоприёмника. Существует множество подходов к решению этой задачи, каждый из которых имеет свои преимущества [4]. Однако в данной постановке наиболее рациональным методом для расчёта лучистого теплообмена в системе "Солнце – концентратор – теплоприёмник" видится статистический метод Монте-Карло. При таком вероятностном подходе становится возможным учесть специфические особенности отражения солнечных лучей от поверхности концентратора, которые связаны с технологическими и эксплуатационными неточностями поверхности зеркала, что, в конечном счёте, влияет на вероятность попадания отражённого от концентратора луча на поверхность трубчатого теплоприёмника, расположенного в фокусе зеркала [5]. Проведенные по этой методике численные исследования показали, что даже при относительно больших размерах зеркал размеры фокального пятна будут невелики (3-5 см), и максимальная интенсивность солнечного излучения будет падать лишь на относительно небольшой участок теплоприёмного канала. Это позволяет определить геометриче-

ские размеры и конструкцию канала, обосновать необходимость использования теплоизоляции при его проектировании. На основе расчётного алгоритма Монте-Карло определяются также граничные условия для следующего этапа исследований, связанных с течением и теплообменом теплоносителя в трубчатом канале.

Моделирование тепломассопереноса в теплоприёмнике с движущимся внутри теплоносителем проводилось на основе уравнений Навье-Стокса в приближении слоистого течения. Предполагалось, что течение теплоносителя стабилизированное, причём внутри канала возможны некоторые конструктивные решения – перегородки, турбулизаторы, стабилизаторы [6]. Малая зависимость теплофизических и динамических параметров от температуры позволяет решать динамические и энергетические уравнения независимо друг от друга, что структурирует задачу, делая её решение более прозрачным.

На рис. 1 представлена блок-схема созданного программного модуля, в которой указаны все этапы проводимого расчёта. Блок SUN создан для расчёта облученности теплоприёмника и базируется на реализации метода Монте-Карло. Блок SPEED – вычисление возможных профилей скорости. Выбор профиля скорости проводится в зависимости от типа течения в канале и его геометрии. Кроме классического ламинарного параболического профиля для круглого канала в модуль входит вычисление турбулентных профилей на основе индуктивной теории свободной турбулентности Рейхардта, на основе подходов Дайслера, Бай Ши-И, а также классического степенного закона. Кроме того, при наличии в канале дополнительных конструктивных элементов, например, перегородок, существует возможность введения в модуль SPEED профилей скорости для некруглых каналов. Например, для расчёта динамики течения теплоносителя в перспективных солнечных комбинированных PVT-станциях в модуль SPEED было введено выражение для профиля скорости в полукруглом канале, основанное на решении уравнения Пуассона [7].

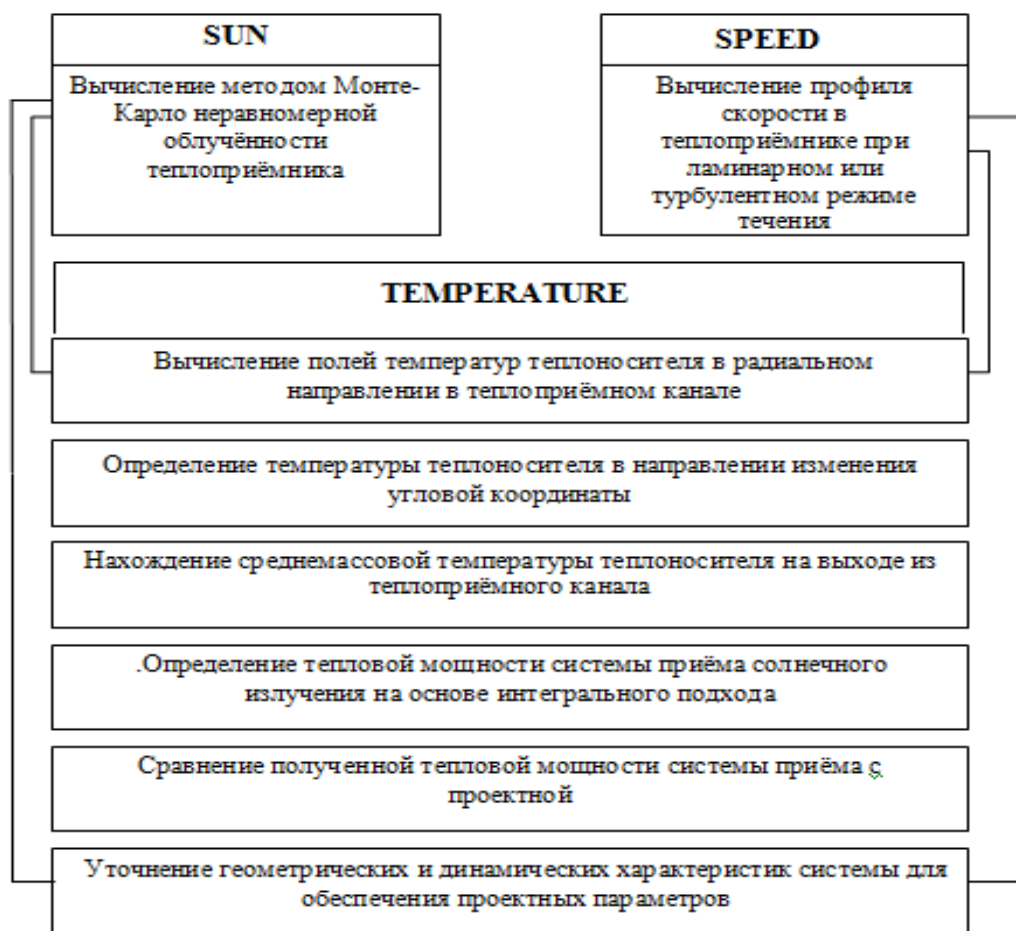


Рис. 1. Схема программного модуля для вычисления параметров системы приёма параболоцилиндрических солнечных станций.

Поле скоростей, вычисленное в модуле SPEED, передаётся в модуль для вычисления полей температур TEMPERATURE. В качестве граничных условий используются данные по облучённости приёмника, рассчитанные в модуле SUN. Используя эти граничные условия в качестве активных, рассчитывается поле температур теплоносителя в радиальном направлении. Это поле будет первым объектом метода расщепления двумерной параболической задачи. На следующем шаге вычисляется поле температур по угловой координате, причём в качестве значений на предыдущем шаге выбирается радиальное поле температур.

Такое расщепление по пространственным радиальным  $R$  и угловым  $\Theta$  координатам позволяет проводить моделирование одномерных процессов с помощью неявных схем, а последовательное действие процессов учитывать явно. Решение двумерной задачи по переменным  $R$  и  $\Theta$

сводится к расчёту на каждом полуцелом шаге по пространственной продольной координате  $Z$  набора одномерных задач, решаемых методом прогонки. Применение неявной аппроксимации обеспечивает устойчивость схемы, а общее число арифметических действий оказывается пропорциональным числу узловых точек, поскольку алгоритм прогонки обладает этим свойством. Выбор шага расчётной сетки обусловлен устойчивостью решения. В качестве критерия устойчивости выбиралось сеточное число Пекле, характерное для схемы "против потока" [8].

Данный алгоритм заканчивается расчётом среднemasсовой температуры на выходе из теплообменного канала с последующим вычислением интегральной тепловой мощности системы приёма всего параболоцилиндрического модуля. После чего происходит сравнение полученной тепловой мощности с проектной. Если значения различаются выше заложенной погрешности, то

организуется итерационный процесс, в ходе которого уточняются геометрические (диаметр зеркала, диаметр теплоприёмника, точность изготовления концентратора, наличие, тип и толщина изоляции теплоприёмного канала), динамические (скорость и вязкость теплоносителя), теплофизические (теплоёмкость и теплопроводность теплоносителя) показатели системы приёма.

Кроме того, может быть промоделировано влияние некоторых внешних условий на энергетические параметры модуля, такие как средняя скорость ветра, средняя температура окружающей среды.

Следует отметить, что при составлении алгоритма расчёта плотность теплового потока от Солнца принималась постоянной, не зависящей от географических и климатических параметров. Очевидно, что при проектировании реальных систем это делать недопустимо. В настоящее время существует множество прикладных программ по определению уровня радиации, которые могут быть состыкованы с работой созданного модуля. От значения радиации зависит также работа систем слежения, термоаккумулятора, блока перехода на традиционное топливо в случае солнечно-топливных станций [9]. Согласование работы всех систем станции – отдельная масштабная задача, решение которой не входит в рамки данной работы.

**Выводы.** В работе представлен алгоритм расчёта наиболее рациональных геометрических, динамических и энергетических параметров системы приёма солнечных параболоцилиндрических станций. Алгоритм лёг в основу программного модуля, который базируется на фрагментарном мультифизическом подходе – использование результатов одного расчётного блока в качестве начальных или граничных условий для следующего. Причём эти расчётные блоки могут быть построены на принципиально разных методологических подходах. Предложенный программный модуль, созданный для конкретной задачи, может заменить достаточно дорогостоящие и громоздкие пакеты прикладных программ, существенно минимизировать время расчёта и его стоимость. В модуле существует возможность варьирования основными характеристиками системы приёма

параболоцилиндрических станций для нахождения тех, которые полностью обеспечивают их проектные энергетические параметры.

1. *Резцов В.Ф., Суржик Т.В., Хилько В.А.* Создание солнечной электростанции в Международном детском центре "Артек" // *Альтернативная энергетика и экология.* – 2013. – №17. – С. 44–45.

2. *Андреев В.М.* Концентраторная солнечная фотоэнергетика // *Альтернативная энергетика и экология.* – 2012. – №5 – 6. – С. 40–44.

3. *Стребков Д.С., Майоров В.А., Панченко В.А.* Солнечный тепло-фотоэлектрический модуль с параболоторическим концентратором // *Альтернативная энергетика и экология.* – 2013. – №1–2. – С. 35–39.

4. *Гаевский А.Ю., Ушкаленко О.В.* Расчёт распределения мощности электромагнитного излучения в солнечных концентраторах // *Альтернативная энергетика и экология.* – 2014. – №23. – С. 39–44.

5. *Кныш Л.И.* Численное моделирование лучистого теплопереноса в системе концентрации солнечного излучения «параболоцилиндрический концентратор – трубчатый теплоприёмник // *Альтернативная энергетика и экология.* – 2013. – №2. – С. 17–21.

6. *Майоров В.А., Стребков Д.С., Трушевский С.Н.* Исследование конструктивных и энергетических параметров приёмников излучения солнечных модулей с концентраторами // *Альтернативная энергетика и экология.* – 2015. – №6. – С. 24–30.

7. *Кныш Л.И.* Сравнительный анализ методов расчёта распределения скорости течения теплоносителя в теплоприёмнике солнечной энергетической установки // *Альтернативная энергетика и экология.* – 2013. – №1-1. – С. 14–17.

8. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

9. *Гамарко А.В., Резцов В.Ф., Суржик Т.В., Шевчук В.И.* Анализ устойчивости аккумуляторов энергии солнечного излучения // *Альтернативная энергетика и экология.* – 2012. – №7. – С. 37–40.

## REFERENCES

1. *Reztsov V.F., Surzhik T.V., Khilko V.A.* Creating a solar power plant in the International "Artek" Children's Center // *Alternativnaya energetika i ekologiya.* – 2013. – №17. – Pp. 44–45. (Rus)

2. *Andreev V.M.* Concentrator solar photovoltaics // *Alternativnaya energetika i ekologiya.* – 2012. – №5-6. – Pp. 40–44. (Rus)

3. *Srebkov D.S., Mayorov V.A., Panchenko V.A.* Solar thermal photovoltaic module with a *parabolotorical* concentrator // *Alternativnaya energetika i ekologiya.* – 2013. – №1–2. – Pp. 35–39. (Rus)

4. *Gaevskiy A.Yu., Ushkalenko O.V.* Calculation of power distribution of electromagnetic radiation in solar concentrators // *Alternativnaya energetika i ekologiya.* – 2014. – №23. – Pp. 39–44. (Rus)

5. *Knysh L.I.* Numerical simulation of radiant heat transfer in the system of solar concentration "parabolic cylindrical concentrator – tubular heat receiver" // *Alternativnaya energetika i ekologiya*. – 2013. – №2. – Pp. 17–21. (Rus)

6. *Mayorov V.A., Strebkov D.S., Trushevskiy S.N.* The study of structural and power parameters of radiation receivers of solar modules with concentrators // *Alternativnaya energetika i ekologiya*. – 2015. – №6. – Pp. 24–30. (Rus)

7. *Knysh L.I.* Comparative analysis of the methods of calculating the velocity distribution of coolant flow in heat receiver solar power plant // *Alternativnaya energetika i ekologiya*. – 2013. – №1-1. – Pp. 14–17. (Rus)

8. *Patankar S.* Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics. – M.: Energoatomizdat, 1984. – 152 p. (Rus)

9. *Gamarko A.V., Reztsov V.F., Surzhik T.V., Shevchuk V.I.* Stability analysis of solar energy batteries // *Alternativnaya energetika i ekologiya*. – 2012. – №7. – Pp. 37–40. (Rus)

**Л.І.Кныш**, докт.техн.наук (Дніпропетровський національний університет ім. О.Гончара, Дніпропетровськ)

#### **Програмний модуль для комплексного дослідження енергопереносу в теплоприймачах сонячних параболоциліндричних станцій**

*Пропонується алгоритм розрахунку геометричних, динамічних та енергетичних параметрів системи прийому параболоциліндричних сонячних станцій. Алгоритм базується на фрагментарному мультифізичному підході, що базується на взаємодії декількох методик, які різні за своєю математичною суттю. Запропонований програмний продукт може замінити досить громіздкі та дорогі обчислення на основі стандартних пакетів, забезпечити максимально швидко взаємодію між основними розрахунковими блоками та проведення багатьох чисельних експериментів по знаходженню параметрів системи, близьких до проектних. Бібл. 9, рис. 1.*

**Ключові слова:** сонячна параболоциліндрична станція, система прийому сонячного випромінювання, концентратор, трубчатий теплоприймач, мультифізичний підхід.

**Knysh L.I.**, (Dnipropetrovsk National University of Oles Honchar, Dnipropetrovsk)

#### **A software package for analysis of energy transfer in the receiver of solar parabolic cylindrical station**

*An algorithm for analysis of geometric, dynamic and energy parameters of receiver in a parabolic cylindrical solar plant is*

*proposed. The algorithm is based on fragmentary multi-physical approach that is a result of an interaction between few techniques of a different mathematical nature. The proposed software package is able to replace cumbersome and expensive solutions, provides the highest speed of interaction between main computational blocks, and allows performing a number of numerical experiments to determine optimal parameters of a system. References 9, figure 1.*

**Keywords:** solar parabolic cylindrical plant, receiver system of solar radiation, concentrator, tube receiver, multi-physical approach.

#### SYNOPSIS

Thermodynamic solar technologies are developed steadily all over the world. They are highly efficient, well-tested and have large element base. Different combined systems can be designed based on classic solar plants with parabolic cylindrical concentrators. These systems can be photovoltaic-thermal (PVT), solar-wind, solar-fuel etc. Economical efficiency of these projects depends on the choice of optimal parameters of the «Sun – concentrator – heat receiver» systems. This problem is solved using multi-physical approach, which combines few techniques of a different mathematical nature.

A software package includes three blocks. The block SUN models radiation heat transfer using Monte-Carlo method. This modeling determines heat flow density in the focus of concentrator, where the tube receiver is placed. The value of focus spot is determined and the design of heat receiver is optimized. At the same time velocity profile for coolant is calculated in the block SPEED. This profile depends on chosen geometry of a receiver and coolant flow regime.

Results obtained from block SUN define the boundary conditions in heat receiver. Temperature fields are calculated in block TEMPERATURE, which also receives velocity profile from block SPEED.

The temperature fields in heat receiver and the average temperature at the exit from heat receiver are calculated. After that heat power of a receiver module is determined and compared with a design value. If the obtained value differs significantly from design value, then iterative procedure is used in order to find optimal parameters.

Dynamic (coolant velocity and viscosity), geometrical (diameter of concentrator and receiver, quality of surface of concentrator, method of thermal insulation and its thickness), thermal-physical (heat capacity of coolant and its thermal conductivity) properties are adjusted during this procedure. Some additional conditions (average wind velocity, average temperature of the environment) also can be taken into account.

Стаття надійшла до редакції 27.05.16

Остаточна версія 07.06.16