

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 697.329

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УСТАНОВКИ АВТОНОМНОГО ТЕПЛООБЕСПЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СОЛНЕЧНОГО ТЕРМАЛЬНОГО КОЛЛЕКТОРА

*А.Л. Карташев, Е.В. Сафонов, М.А. Карташева
г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет*

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF INSTALLATION OF SELF-CONTAINED HEATING BASED ON SOLAR THERMAL COLLECTOR

*A.L. Kartashev, E.V. Safonov, M.A. Kartasheva
Chelyabinsk, South Ural State University*

Разработана математическая модель, описывающая функционирование установки автономного теплообеспечения и горячего водоснабжения на основе солнечного термального коллектора с системой аккумулирования тепловой энергии, мониторинга и управления тепловыми режимами здания. Проведено моделирование функционирования установки на различных режимах.

Ключевые слова: система автономного энергоснабжения, термальный солнечный коллектор, система аккумулирования тепла, мониторинг и управление тепловыми режимами здания.

The mathematical model describing the operation of the installation of self-contained heating and hot water supply based on solar thermal collector with the system of accumulation of heat energy, monitoring and control of thermal conditions of building is developed. Modeling of operation of the installation in different conditions is realized.

Keywords: system of self-contained heating, solar thermal collector, system of heat accumulation, monitoring and control of heat conditions of building

1. Введение

Рассмотрены вопросы математического моделирования параметров установки автономного теплообеспечения, основанной на преобразовании энергии солнечного излучения в тепловую энергию при помощи высокоэффективного солнечного термального коллектора.

Разработка установки автономного теплоснабжения невозможна без поиска конструкторских и технологических решений, обеспечивающих эффективное преобразование солнечной энергии в тепловую и ее последующее использование. Исследование эффективности гелиотехнических систем (систем солнечного теплоснабжения) и их конструктивного исполнения может быть проведено при помощи детального многоуровневого математического моделирования, позволяющего осуществлять проектирование кон-

струкций гелиотехнических систем различного назначения.

Таким образом, основной задачей проведенных исследований являлась разработка математической модели установки автономного теплообеспечения, позволяющей по заданным входным параметрам определять рабочие характеристики установки при обеспечении ее требуемых выходных параметров.

2. Математическая модель установки автономного теплообеспечения на основе солнечного термального коллектора

2.1. Основные принципы построения математической модели

Математическая модель теплоэнергетических рабочих параметров установки автономного теплообеспечения на основе солнечного термального

* Работа выполнена в рамках Государственного контракта № 16.516.11.6054 Министерства образования и науки Российской Федерации.

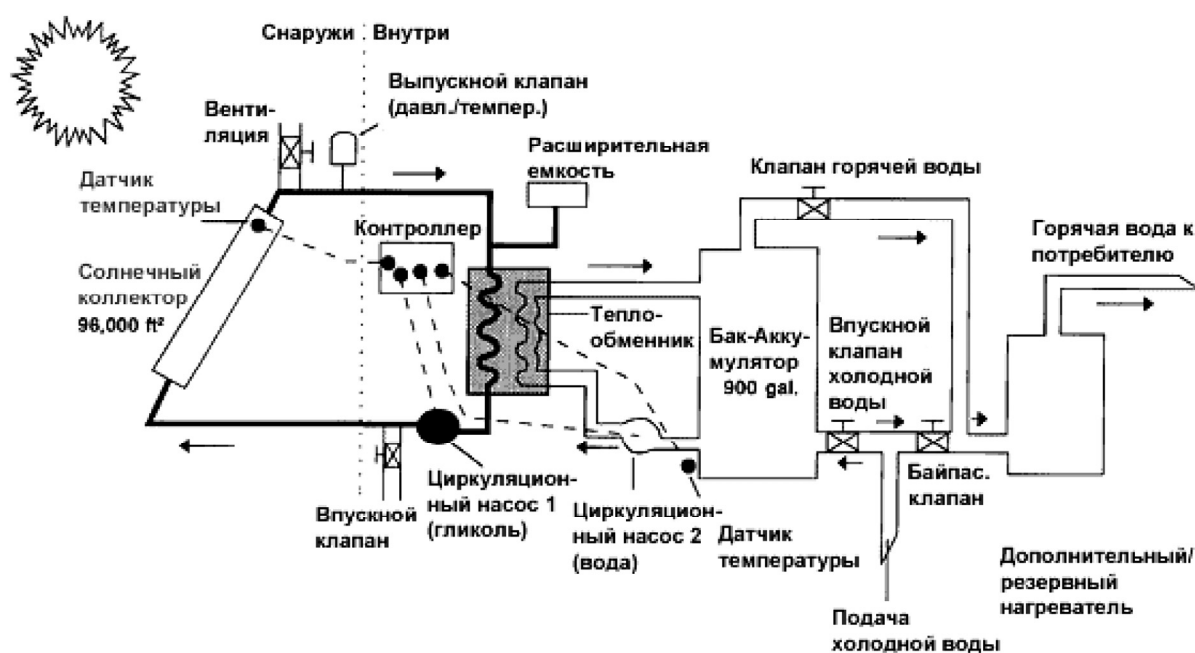


Рис. 1. Схема установки автономного теплообеспечения здания

коллектора (рис. 1) зданий является основой для построения алгоритма выбора оптимальной энергоэффективной установки на основе солнечного термального коллектора (далее – Установка).

Требования к построению такой модели и ее функционированию (функциональной структуре) должны обеспечивать обобщенное применение разрабатываемой математической модели для различных типов Установок, использующихся в различных зданиях и сооружениях (включая жилые, офисные, производственные и возможные другие типы помещений).

Наиболее эффективными для построения математической модели Установки являются принципы системного подхода, реализуемые в модульном построении модели, в ее многоуровневом иерархическом структурировании, а также комплексном учете входных параметров (технических, экономических, организационно-правовых и т.д.).

В целом разрабатываемая математическая модель должна включать в себя несколько моделей (субмоделей) и алгоритмов, таких как:

- статическая модель теплового режима Установки и ее отдельных элементов;
- динамическая модель теплового режима Установки и ее отдельных элементов;
- модели функционирования каждого из отдельных элементов Установки (в зависимости от функционального назначения и конструктивного исполнения);
- модель взаимодействия элементов Установки;
- модуль обработки входных и выходных данных.

Разрабатываемая математическая модель должна стать основой разработки перспективных технологий для систем солнечного теплоснабжения, в том числе использующих солнечные термальные коллекторы.

Создание математической модели установки автономного теплообеспечения, обеспечивающей ее разработку и реализацию в виде опытного образца для внедрения в опытную эксплуатацию, должно быть непосредственным образом связано с техническим исполнением Установки, в частности, с типом и схемой Установки, конструкцией термального коллектора, типом теплообменных устройств, системой управления, характеристики которых являются входной информацией для проведения математического моделирования.

Для построения математической модели Установки необходимо использовать методологию системного анализа. Иерархическая структура математической модели включает в себя общую математическую модель и набор независимых либо связанных друг с другом модулей (моделей и субмоделей), которые должны функционировать совместно либо независимо друг от друга. Кроме того, субмодели различных иерархических уровней должны иметь способность адекватно описывать работу элементов Установки без использования структуры более высоких иерархических уровней.

Математическая модель, описывающая функционирование системы солнечного теплоснабжения, должна обеспечивать многоуровневость проектирования Системы (то есть проектирование систем различных по уровню сложности и полноте

комплектации) и инвариантность ее применения для различных типов отапливаемых помещений и систем горячего водоснабжения.

2.2. Функциональная структура математической модели

Анализ функционирования математической модели, взаимодействия ее субмоделей и модулей может быть проведен с помощью функциональной структуры математической модели.

Разработка такой структуры позволяет дета-

лизовать требования, предъявляемые к математической модели, установить взаимосвязи элементов модели, в случае необходимости легко варьировать составом моделей и модулей математической модели.

Функциональная структура также позволяет создавать различные уровни математической модели для различных гелиотехнических систем.

Предлагаемая структура математической модели представлена на рис. 2. Следует отметить, что модульное построение системы математиче-

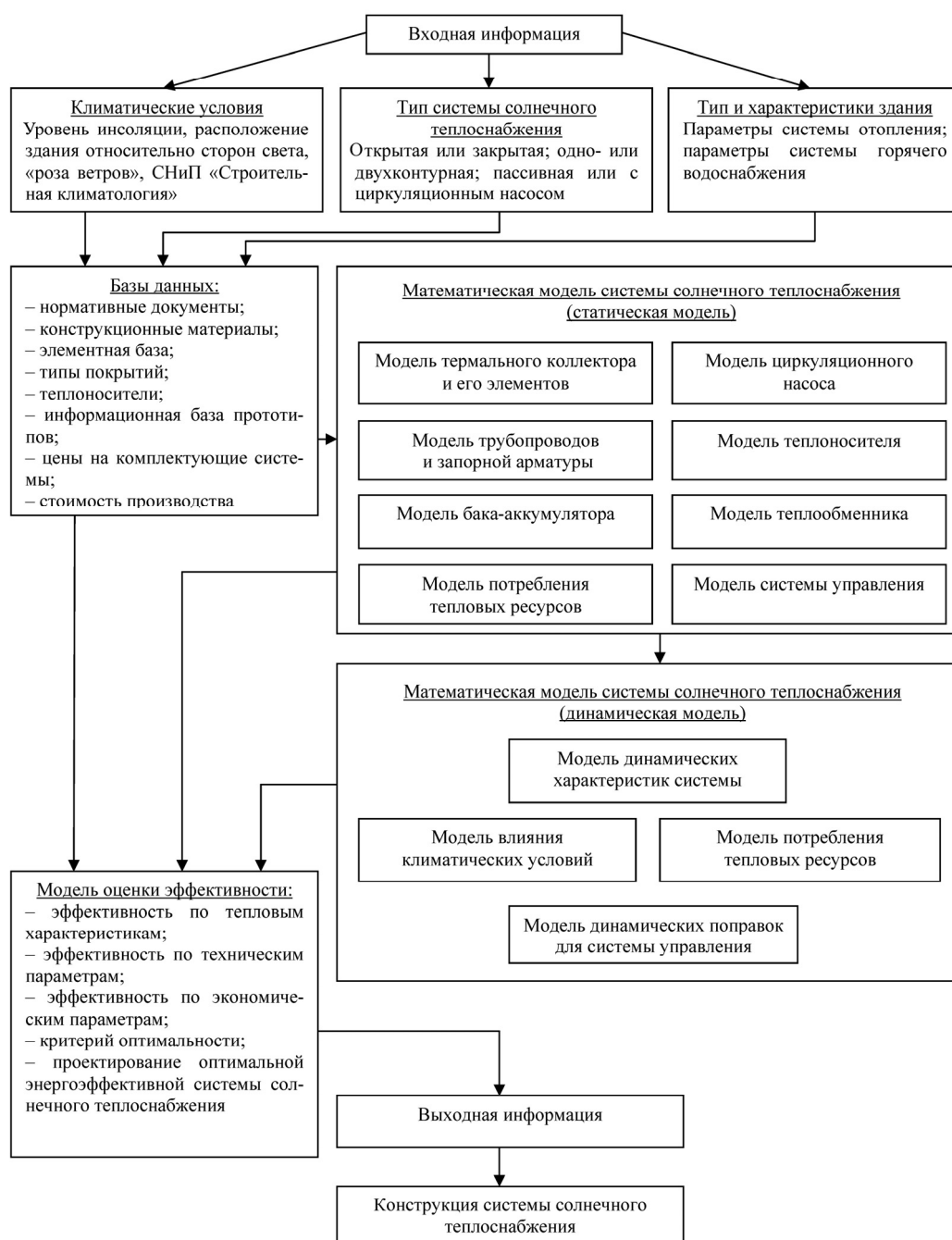


Рис. 2. Математическая модель установки автономного теплообеспечения

Альтернативные источники энергии

ского моделирования позволяет при необходимости откорректировать и функциональную структуру математической модели в соответствии с требованиями, предъявляемыми к системам солнечного теплоснабжения.

Функциональная структура математической модели может быть подразделена на три основных блока: блок входной информации; расчетный комплекс математической модели; блок выходной информации.

3. Функциональное наполнение математической модели

3.1 Модель солнечного термального коллектора

Модель солнечного термального коллектора основана на системе балансовых уравнений тепловых потоков в коллекторе, возникающих из-за поступления солнечного излучения в коллектор, отвода тепла теплоносителем и рассеяния (потерь) тепла в окружающее пространство.

Схема термального солнечного коллектора представлена на рис. 3.

Количество тепла, поступающего от солнечного излучения через двойное остекление коллектора, определяется соотношением

$$Q_{\text{солн}} = qS\tau, \quad (1)$$

где q , Вт/(м²·с) – тепловой поток, попадающий на пластину термального солнечного коллектора; $S = ab$, м² – площадь пластины (a , b – длина и ширина пластины соответственно); τ , с – время нагрева пластины.

Величина теплового потока с учетом эффектов пропускания, отражения и поглощения теплового излучения при прохождении через двойное остекление определяется соотношением (при отсутствии поглощения излучения остеклением)

$$q = q_{\text{солн}}(1 - R)^2(1 + R^2)A, \quad (2)$$

где $q_{\text{солн}}$, Вт/(м²·с) – плотность теплового потока солнечного излучения; R – коэффициент отражения защитного стекла; A – коэффициент поглощения пластины термального коллектора.

Коэффициенты отражения и поглощения для различных материалов приводятся в справочной литературе [1]. Плотность теплового потока солнечного излучения для заданных географической

широты и климатических условий определяется по справочным таблицам [2, 3].

Тепловые потери в солнечном термальном коллекторе вследствие собственного излучения коллектора и механизма теплопроводности через двойное остекление (включая имеющиеся воздушные зазоры) и теплоизолирующую подложку с обратной стороны коллектора определяются следующими соотношениями:

$$Q_{\text{изл. коллект}} = S\sigma t_{\text{коллектора}}^4\tau(1 - RA), \quad (3)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ – постоянная Стефана–Больцмана; $t_{\text{коллектора}}$ – температура пластины коллектора,

$$Q_{\text{остекл}} = S \cdot \frac{t_{\text{коллектора}} - t_{\text{окр}}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \tau, \quad (4)$$

где $t_{\text{коллектора}}$ и $t_{\text{окр}}$, °С – температуры пластины коллектора и окружающей среды соответственно; δ_i , м – толщины стекол и воздушных прослоек в термальном коллекторе; λ_i , Вт/(м·К) – теплопроводности стекла и воздуха (считаются постоянными в рабочем диапазоне температур термального коллектора) и

$$Q_{\text{изол}} = S \frac{\lambda_{\text{изол}}(t_{\text{коллектора}} - t_{\text{окр}})}{\delta_{\text{изол}}} \tau, \quad (5)$$

где $\delta_{\text{изол}}$, м – толщина теплоизолирующего материала в термальном коллекторе; $\lambda_{\text{изол}}$, Вт/(м·К) – теплопроводность теплоизолирующего материала (считается постоянной в рабочем диапазоне температур термального коллектора).

Таким образом, количество тепла за время работы коллектора, передаваемое теплоносителю определяется соотношением:

$$Q_{\text{теплоносителя}} = Q_{\text{солн}} - Q_{\text{изл. коллект}} - Q_{\text{остекл}} - Q_{\text{изол}}. \quad (6)$$

Повышение температуры теплоносителя при работе солнечного термального коллектора определяется следующим соотношением

$$\Delta t = \frac{Q_{\text{теплоносителя}}}{Gc}, \quad (7)$$

где G , кг/с – массовый расход теплоносителя; c , Дж/(кг·град) – удельная теплоемкость теплоносителя.

Следовательно, на стационарном режиме работы температура коллектора будет превышать температуру окружающей среды на величину, определяемую соотношением (7).

Исходными данными для модели являются следующие величины:

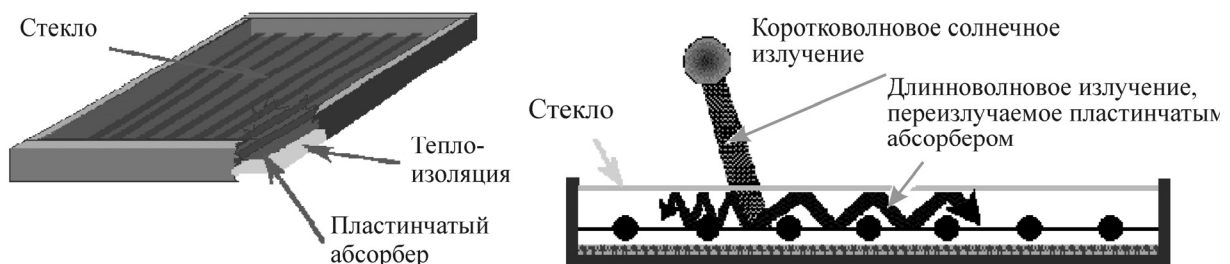


Рис. 3. Схема термального солнечного коллектора

- геометрические характеристики термального коллектора (длина и ширина);
- геометрические характеристики трубопровода теплоносителя (внутренний диаметр d , м);
- расход теплоносителя (производительность циркуляционного насоса);
- теплоемкость теплоносителя;
- толщина и теплопроводность теплоизоляционного материала;
- параметры остекления: количество и толщина стекол, теплопроводность стекла, толщина воздушных прослоек, теплопроводность воздуха, коэффициенты отражения и поглощения излучения для стекла;
- коэффициент поглощения излучения для пластины термального коллектора.

Основными путями повышения энергетической эффективности при проектировании термального солнечного коллектора являются следующие:

- применение теплоизоляционного материала с малой теплопроводностью;
- применение стекол с малой теплопроводностью и малыми коэффициентами отражения излучения;
- применение селективных покрытий пластины термального коллектора, позволяющих увеличить ее коэффициент поглощения излучения;
- применение теплоизоляционного материала и стекол большей толщины (с учетом конструктивных особенностей и экономической целесообразности).

3.2. Модель трубопроводов и запорной арматуры

Разработка математической модели трубопроводов и запорной арматуры заключается в выборе их параметров, согласованных с термальным коллектором и теплообменником.

В рассматриваемом техническом устройстве присутствуют: сопротивление трения, обусловленное вязкостью теплоносителя, и местные сопротивления, обусловленные различными местными препятствиями движению потока (сужение и расширение потока, повороты потока, запорные и регулирующие устройства). Если поток не является изотермическим (что соответствует условиям работы рассматриваемой системы солнечного теплоснабжения), то в трубопроводах присутствует сопротивление вследствие ускорения потока из-за его неизотермичности, и возникновения самотяги вследствие вертикального движения теплоносителя различной плотности, а также сообщения гидродинамической системы трубопроводов с атмосферой.

Таким образом, полный перепад давления, необходимый для движения жидкости в теплообменных аппаратах определяется соотношением [3, 4]:

$$\Delta p = \sum \Delta p_{п.т} + \sum \Delta p_{м.с} + \sum \Delta p_y + \sum \Delta p_c, \quad (8)$$

где $\sum \Delta p_{п.т}$, Па – сумма потерь давления за счет сопротивления трения на всех участках поверхности теплообмена; $\sum \Delta p_{м.с}$, Па – сумма потерь давления в местных сопротивлениях; $\sum \Delta p_y$, Па – сумма потерь давления, обусловленная ускорением потока; $\sum \Delta p_c$, Па – суммарная затрата давления на преодоления самотяги. Вследствие различной природы возникновения потерь их расчет может проводиться отдельно.

Потери давления на преодоление сил трения при течении несжимаемой жидкости в трубопроводе на участке безотрывного движения определяются соотношением

$$\Delta p_{п.т} = \xi \frac{l \rho w^2}{d}, \quad (9)$$

где l , м – полная длина канала; d , м – гидравлический диаметр ($d = 4(f/u)$, где f , м² – площадь поперечного сечения трубопровода; u , м – периметр поперечного сечения трубопровода); ρ , кг/м³ – средняя плотность жидкости в трубопроводе; w , м/с – средняя скорость жидкости в трубопроводе; ξ – коэффициент сопротивления трения.

Для использования соотношения (9) необходимо определить коэффициент сопротивления трения, значение которого различно для ламинарного и турбулентного режимов течения в трубопроводе. Тип режима течения устанавливается на основании значения критерия Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho w d}{\mu}, \quad (10)$$

где μ , кг/(м·с) – коэффициент динамической вязкости.

Для ламинарного неизотермического течения можно использовать следующее соотношение:

$$\xi = \frac{64\varphi}{Re_1} \left(\frac{\mu_c}{\mu_1} \right)^n, \quad (11)$$

где φ – коэффициент, учитывающий форму канала ($\varphi = 1,0$ для канала круглого сечения, $\varphi = 1,5$ для канала плоского сечения); μ_c , μ_1 – коэффициенты динамической вязкости при температуре стенки трубопровода и температуре жидкости на входе в трубопровод.

Значение показателя степени в соотношении (11) вычисляется по формуле

$$n = c \left(Re_1 \frac{d}{l} \right)^{-m} \left(\frac{\mu_c}{\mu_1} \right)^{-0,062}, \quad (12)$$

где $Pe_1 = \frac{w_1 \cdot d}{a}$, w_1 – скорость жидкости на входе в трубопровод;

$a = \frac{\lambda}{c\rho}$; $c = 2,3$ и $m = 0,3$ при $60 < Re_1 \cdot \frac{d}{l} < 1500$;
 $c = 0,535$ и $m = 0,1$ при $1500 < Re_1 \cdot \frac{d}{l} < 30000$.

В случае существования турбулентного течения коэффициент сопротивления трения вычисляется по формуле

$$\xi = \frac{1}{(1,821gRe_{ж-1,64})^2} \cdot \left(\frac{Pr_c}{Pr_{ж}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (13)$$

где Pr_c и $Pr_{ж}$ – число Прандтля ($Pr = \frac{\mu c}{\lambda}$, здесь c – теплоемкость жидкости) для температуры

Альтернативные источники энергии

стенки и средней температуры жидкости соответственно.

Местные гидравлические сопротивления определяются соотношением:

$$\Delta p_{\text{м.с}} = \zeta \frac{\rho w^2}{2}, \quad (14)$$

где ζ – коэффициент местного сопротивления.

3.3. Модель циркуляционного насоса

Циркуляционный насос служит для обеспечения принудительной циркуляции теплоносителя в системе солнечного теплоснабжения, обеспечивая заданный расход теплоносителя при имеющихся в сети гидравлических сопротивлениях. Гидравлическое сопротивление Δp , определенное по формуле (8), предопределяет мощность, необходимую для перемещения теплоносителя через теплообменные аппараты, в том числе термальный солнечный коллектор и теплообменник.

Мощность на валу насоса определяется соотношением

$$N = \frac{G \Delta p}{\rho \eta}, \quad (15)$$

где Δp , Па – полное гидравлическое сопротивление; ρ , кг/м³ – плотность теплоносителя; η – коэффициент полезного действия насоса.

3.4. Модели бака-аккумулятора тепловой энергии, теплообменника и теплоносителя

Модели бака-аккумулятора тепловой энергии, осуществляющего накопление тепловой энергии (горячей воды), и теплообменника, осуществляющего передачу тепловой энергии от солнечного термального коллектора к баку-аккумулятору, а также модель теплоносителя, являющегося рабочей

жидкостью солнечного термального коллектора, приняты в соответствии с известными моделями теплообмена, представленными, например в [5, 6].

4. Моделирование функционирования солнечного термального коллектора

4.1. Конструкции солнечных термальных коллекторов

Исследование эффективности конструкции солнечного термального коллектора производилось при помощи математического моделирования с использованием разработанной математической модели и CFD-пакета Flowsimulation (Cosmos Flowork 2010). Рассмотрен вариант конструкции солнечного термального коллектора с поглощающей поверхностью, выполненной из меди (рис. 4, 5), и двумя схемами движения теплоносителей.

4.2. Результаты математического моделирования

Моделирование работы солнечного коллектора осуществлялось для географических широт, соответствующих расположению г. Москвы, на 12 часов дня (полдень). Расход теплоносителя через коллектор составил 0,1 кг/с, площадь теплопринимающей поверхности – 2 м², температура окружающего воздуха 20 °С, температура теплоносителя на входе в коллектор 20 °С.

На рис. 6 представлены распределения температур по теплопринимающей поверхности (абсорберу) и по теплоносителю. Результаты математического моделирования солнечного термального коллектора сведены в таблицу.

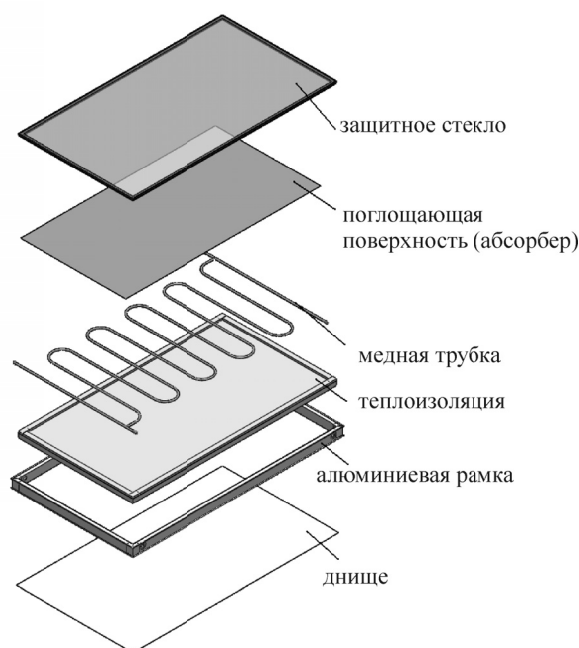


Рис. 4. Солнечный коллектор с медным абсорбером и змеевиковым каналом

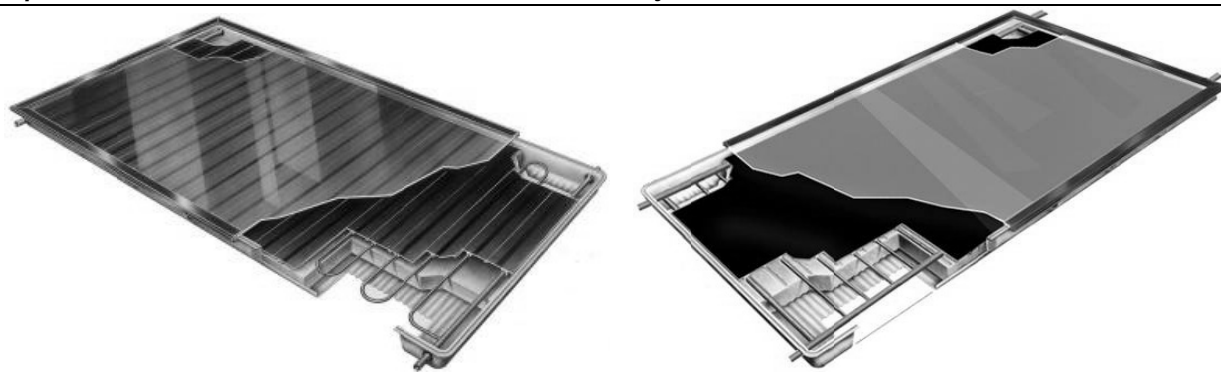
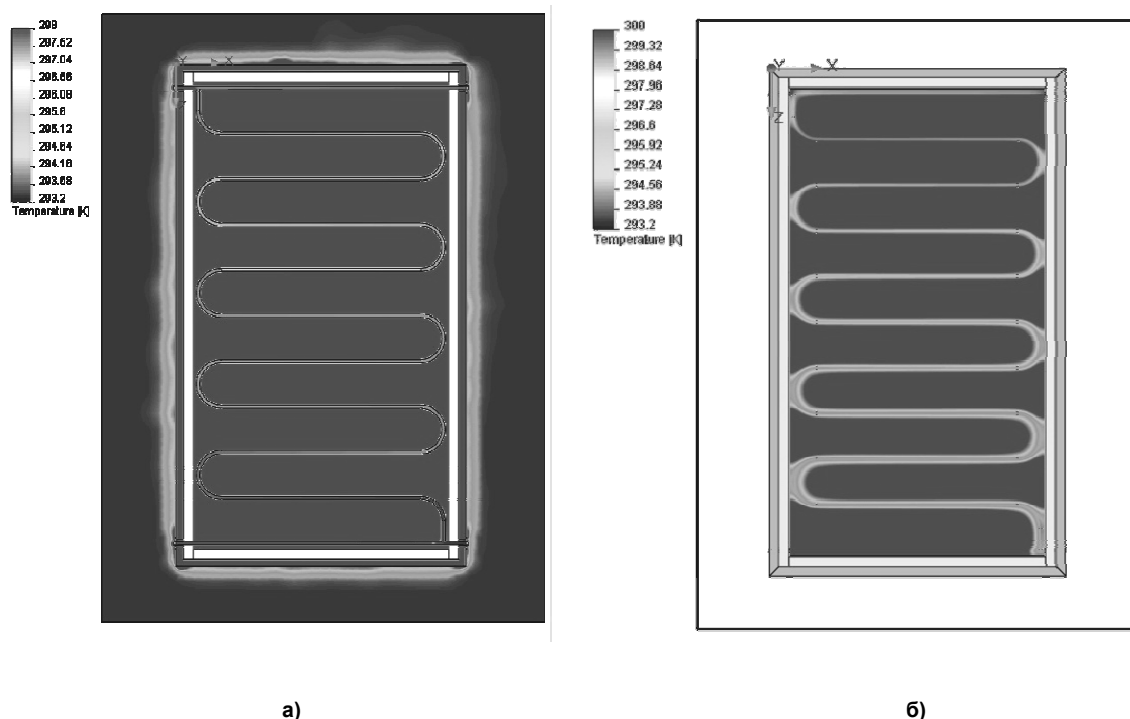


Рис. 5. Декомпозиция солнечного коллектора



а)

б)

Рис. 6. Поле температур в солнечном термальном коллекторе (а)
и изменение температуры (б) по абсорберу

Основные показатели солнечного коллектора

Конструкция солнечного термального коллектора	Температура рабочей среды, °С		Тепловой поток, Вт	Удельный тепловой поток, Вт/м ²	Масса абсорбера, кг
	вход	выход			
Остекление – двойное, плоский абсорбер, змеевиковый канал, материал – медь	20	25,2	2190	1095	13,76

Заключение

1. Разработана математическая модель установки автономного теплообеспечения на основе солнечного термального коллектора. Рассмотрены основные принципы построения математической модели. Разработана функциональная структура математической модели.

2. Разработано функциональное наполнение математической модели, включающее следующие модели: модель солнечного термального коллек-

тора, модель трубопроводов и запорной арматуры, модель циркуляционного насоса, а также модели бака-аккумулятора тепловой энергии, теплообменника и теплоносителя.

3. Проведено математическое моделирование функционирования солнечного термального коллектора и получено распределение температур по элементам конструкции коллектора.

4. Определены основные рабочие характеристики термального солнечного коллектора: тепло-

Альтернативные источники энергии

вой поток, удельный тепловой поток, температура рабочей среды, масса абсорбера коллектора.

5. Методами численного моделирования установлено, что наиболее эффективной является схема организации змеевикового течения теплоносителя, так как исключает застойные и непроточные зоны для теплоносителя.

Литература

1. СП 23-10-2004. Свод правил по проектированию и строительству. Проектирование тепловой защиты зданий.

2. СНиП 23-01-99. Строительные нормы и правила. Строительная климатология.

3. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1983. – 559 с.

4. Исаченко, В.П. Теплопередача: учебник для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.

5. Теплотехника, отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: учебник для вузов / В.М. Гусев, Н.И. Ковалев, В.П. Попов, В.А. Потрошков; под ред. В.М. Гусева. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отделение, 1981. – 343 с.

6. Лыков, А.В. Теплообмен: справочник / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.

Поступила в редакцию 20.06.2011 г.

Карташев Александр Леонидович – докт. техн. наук, профессор кафедры «Двигатели летательных аппаратов», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Область научных интересов – математическое моделирование и проектирование энергетических установок и сложных технических систем, исследование гидрогазодинамических процессов и процессов теплообмена в технических системах. Контактный телефон: 8 (351) 267-92-65.

Kartashev Alexander Leonidovich – Doctor of Science (Engineering), Professor of the Engines of Aircrafts Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: mathematical simulation and design of electric power installations and complex engineering systems, investigation of hydro-gas-dynamic processes and processes of heat exchange in engineering systems. Tel.: 8 (351) 267-92-65.

Сафонов Евгений Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Двигатели летательных аппаратов» Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Область научных интересов – проектирование энергетических установок, математическое моделирование гидрогазодинамических и тепловых процессов в технических системах. Контактный телефон: 8 (351) 267-92-65.

Safonov Evgeniy Vladimirovich – Candidate of Science (Engineering), assistant professor of «Engines of Aircrafts» department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: design of electric power installations, mathematical simulation of hydrogasdynamic and heat processes in engineering systems. Tel.: 8 (351) 267-92-65.

Карташева Марина Анатольевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Летательные аппараты и автоматические установки» Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Область научных интересов – математическое моделирование и проектирование энергетических установок и сложных технических систем, исследование гидрогазодинамических процессов и процессов теплообмена в технических системах.

Контактный телефон: 8 (351) 267-94-61.

Kartasheva Marina Anatolyevna – Candidate of Science (Engineering), assistant professor of the Aircrafts and automatic installations Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: mathematical simulation and design of electric power installations and complex engineering systems, investigation of hydrogasdynamic processes. Tel.: 8 (351) 267-94-61.