

УДК 620.92

## **Влияние геометрии вытяжной трубы на выходную мощность солнечной электростанции**

**Х. Семай, А. Бухджар**

*Центр развития возобновляемой энергии, Алжир, Алжир*

E-mail: hsemai@yahoo.com

Рассматривается турбулентное течение флюида под действием естественной конвекции внутри солнечной электростанции с вытяжной трубой. Исследование проводится путем численного моделирования с использованием программы Saturne, связанного с программой Sythes. Выход вытяжной трубы имеет геометрически модифицированный вид. На выходе труб предусмотрена расходящаяся конструкция из секций, имеющих разные углы раскрытия. Исследование проводится для двух типов солнечных электростанций с вытяжными трубами. В первой конфигурации в качестве системы аккумуляции тепла рассматривается только грунт под коллектором. Во второй система аккумуляции состоит из грунта и трубы толщиной 10 см, заполненной водой, которая покрывает всю поверхность коллектора. Граничные условия определяются в соответствии с метеорологическими данными дня, типичного для алжирской провинции Адрар. Полученные результаты позволяют изучить влияние системы аккумуляции на производительность солнечной электростанции и продолжительность её эксплуатации после захода солнца, а также определить влияние предлагаемой геометрической модификации на энергоэффективность станции.

**Ключевые слова:** турбулентное течение, естественная конвекция, теплоперенос, солнечная электростанция с вытяжной трубой.

### **Введение**

Посредством различных методов солнечное излучение может быть преобразовано в другую форму энергии, полезную для человеческой деятельности, а именно: в тепло и электричество. Существует множество процессов, где непосредственно используется эта энергия. Способы ее получения постоянно совершенствуются. В настоящей работе исследуется получение электроэнергии за счет солнечного излучения, в частности, рассматриваются солнечные электростанции с вытяжными трубами (SCPP). Данные устройства позволяют вырабатывать электроэнергию при низких затратах, без использования ископаемого топлива и без выбросов парниковых газов.

Солнечные электростанции с вытяжными трубами могут работать непрерывно, используя прямое и рассеянное солнечное излучение, полученное в течение дня. Даже при облачном небе SCPP может аккумулировать рассеянное излучение для выработки электроэнергии. Основная идея работы подобных электростанций заключается в производстве электричества с помощью гибридной системы, работающей на основе солнечного ветра и состоящей из трех частей: коллектора, аэрогенераторов и вытяжной трубы. Подобный принцип устройства электростанций был описан еще в 1931 году [1]. В состав солнечного коллектора входят прозрачная крышка и грунт. В центре коллектора расположен

вертикальный воздухопровод с отверстием в основании, через который воздух выходит из коллектора. Стык между прозрачной крышкой и основанием трубы герметичен. Воздух под прозрачной (из пластика или стекла) крышкой коллектора нагревается солнечными лучами, затем движется вверх из коллектора в вытяжную трубу. Принцип действия основан на том, что горячий воздух легче холодного, поэтому он поднимается вверх. Воздух нагревается благодаря парниковым эффектам в коллекторе и может распространяться горизонтально на несколько метров по поверхности земли.

Высота коллектора от нижней части до крышки может быть увеличена вдоль вытяжной трубы, что позволяет направлять движение воздуха по вертикали с минимальными потерями на трение [2–7]. При уменьшении поперечного сечения коллектора следует увеличить скорость потока флюида на входе в вытяжную трубу, чтобы его величина оставалась постоянной [8].

Вытяжная труба преобразует тепловой поток, создаваемый коллектором, в кинетическую энергию (конвективное течение) и потенциальную энергию (перепад давления в турбине). Таким образом, разница в плотности воздуха, вызванная повышением температуры в коллекторе, действует как движущая сила. За счет энергии воздушного потока аэрогенераторы, установленные на входе в вытяжную трубу, производят электричество.

Солнечные электростанции SCPP остаются работоспособными в течение длительного периода, потому что почва способна хранить тепло, полученное в течение дня, и отдавать его в соответствии с градиентом температуры почвы и воздуха и коэффициентами теплообмена.

Для увеличения емкости накопления тепла в работе [9] было предложено закрепить черные трубки, расположенные под крышкой коллектора и заполненные водой, вблизи поверхности земли. Трубки должны быть заполнены один раз и оставаться закрытыми во избежание испарения. В 1976 году два немецких инженера Йорг Шлайх и Рудольф Бергерманн предложили идею солнечных электростанций с вытяжными трубами (см. [10]). В 1979 году они построили в Мансанаресе (Испания) первый опытный образец с максимальной мощностью 50 кВт. Эта SCPP действовала с 1982 по 1989 год. Испытания показали, что установка работает надежно и концепция технически жизнеспособна [11, 12]. Энергетический баланс, критерии проектирования и анализ затрат обсуждались также в работе [11]. С тех пор было проведено много теоретических и численных исследований. Авторы [3] изучали влияние атмосферного поперечного потока и течения флюида внутри восходящей башни солнечной электростанции (SUT) в предположении, что течение внутри нее является сжимаемым.

В работе [13] исследовалось влияние сильного бокового ветра на выходную мощность системы на входе в коллектор и на выходе из вытяжной трубы. Результаты численного моделирования показали, что боковой ветер влиял на работу установки двоящим образом. С одной стороны, при сравнительно слабом боковом ветре направление потока может измениться, и выходная мощность электростанции уменьшится. С другой стороны, если боковой ветер достаточно силен, то он может даже увеличить массовый расход и выходную мощность установки. В работе [14] изучалось влияние различных параметров (входного зазора коллектора, наклона его крыши, диаметра и высоты трубы) на максимальную потенциальную выходную мощность солнечной электростанции с вытяжной трубой. Авторы [15] исследовали с помощью CFD-метода изменения свойств потока в зависимости от площади течения. Они обнаружили, что наклон крышки коллектора влияет на производительность установки. Также вытяжная труба с расширяющимся верхом приводит к значительному увеличению кинетической энергии у её основания. Подходящее сочетание крышки коллектора с определенным наклоном и вытяжной трубы с расходящимся верхом может позволить производить столько же энергии, сколько сотни обычных солнечных электростанций с вытяжной трубой. Авторы [16] построили опытную солнечную электростанцию с вытяжной трубой в южном кампусе универ-

ситета Дамаска (Сирия). Эксперимент показал, что любое изменение солнечной радиации и температуры окружающей среды оказывает прямое влияние на разницу между температурой воздуха на выходе коллектора и температурой окружающей среды. В работе [17] изучалось влияние наличия и геометрии направляющих стенок на выходную мощность солнечной электростанции. Площадь массового потока уменьшилась после добавления направляющей стенки в систему. Однако движущая сила и скорость потока значительно увеличивалась по мере увеличения высоты направляющей стенки. Авторы [18] представили концепцию извлечения энергии из естественного горнодолинного восходящего ветра с помощью коллектора SCPP. В этом случае солнечный коллектор был построен на верхнем склоне горы, что давало возможность использовать и тепло солнечного излучения, полученного с помощью коллектора, и дополнительное тепло от солнечного излучения, полученного нижней частью горы. В работе [19] изучалось влияние бокового ветра на выходе вытяжной трубы и на входе коллектора независимо от производительности SCPP. В работе [20] было представлено численное моделирование SCPP с круговой блокирующей стенкой, установленной в нескольких метрах от входа в коллектор с целью преодоления негативного влияния сильного бокового ветра на производительность электростанции. Авторы [21] использовали численную модель теплопередачи для сравнения производительности солнечной электростанции с обычной вытяжной трубой (CSCPP) и двух солнечных электростанций с наклонными вытяжными трубами (SSCPP), у которых коллектор был ориентирован под углами  $30^\circ$  и  $60^\circ$  соответственно. Авторы [22] разработали три численные модели для солнечной электростанции с восходящей трубой (SUPP) для изучения влияния бокового ветра на крупномасштабные SUPP. В работе [23] было проведено численное и экспериментальное исследование SCPP для изучения и улучшения характеристик потока внутри электростанции. В ходе исследований менялись размеры входного отверстия, высота и диаметр выхода коллектора, а также угол расходимости, входное отверстие и диаметр трубы, и были получены оптимальные значения, дающие наибольшую мощность.

Таким образом, можно видеть, что для солнечных электростанций с вытяжными трубами проводилось много теоретических и экспериментальных исследований. Основные задачи этих исследований сводятся к оптимизации эффективности SCPP, контролю явлений внутри электростанций (передачи тепла, излучения и накопления тепла). Было рассмотрено влияние на течение таких физических параметров, как высота и диаметр вытяжной трубы, размер коллектора и погодные условия (солнечная радиация и температура окружающей среды).

Цель настоящего исследования — изучение возможности повышения эффективности SCPP при использовании предлагаемой новой конфигурации геометрии вытяжной трубы. Известно, что расходящаяся труба приводит к увеличению кинетической энергии в ее основании [15, 24], но строительство трубы, расходящейся по всей высоте, является довольно сложной задачей по сравнению с трубой постоянного диаметра, поэтому будем рассматривать вытяжную трубу постоянного диаметра, за исключением только ее выхода, где она будет расходиться последние 2 м. Оптимальную конструкцию следует искать с учетом различных углов раскрытия.

Рассмотрим два случая. В первом случае системой накопления тепла будем считать почву под коллектором. Во втором случае система аккумуляции тепла будет состоять из грунта и труб, наполненных водой, покрывающих всю площадь под прозрачной крышкой.

## 1. Физическая модель электростанции

Рассматриваемая модель выходной трубы аналогична модели, построенной в Мансанаресе. Высота трубы составляет 200 м, её диаметр — 10 м, диаметр коллектора — 244 м, а расстояние между крышкой и поверхностью земли равно 2 м. Однако с учетом участка, расположенного на выходе трубы и имеющего расходящуюся форму из секций,

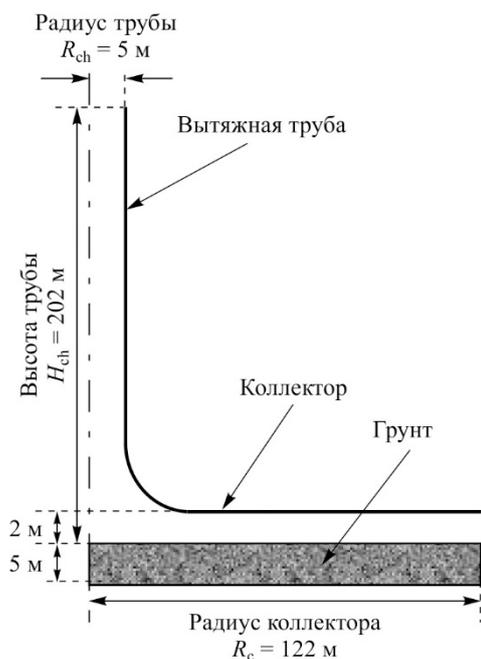


Рис. 1. Геометрическая модель солнечной электростанции с вытяжной трубой.

высота трубы будет увеличена на 2 м и составит 202 м (рис. 1). Эти размеры соответствуют обеим моделям электростанций: модели, использующей только грунтовую часть в качестве системы хранения (SCPP1), и модели, оснащенной дополнительной системой накопления тепла (SCPP2). Конфигурации исследуемых вытяжных труб с секциями, имеющими на выходе разные углы раскрытия, приведены в таблице.

## 2. Математическая модель и граничные условия

### 2.1. Определяющие уравнения

Упрощенный расчет числа Рэлея, определяемого как

$$Ra = g\beta(T_h - T_c)D_h^3/(\alpha\nu), \quad (1)$$

выбирается в силу того, что режим течения в SCPP можно считать турбулентным во всей системе, за исключением входа в коллектор [4]. Здесь  $T_h$  и  $T_c$  — максимальная и минимальная температуры системы,  $g$ ,  $\beta$ ,  $D_h$ ,  $\alpha$ ,  $\nu$  — гравитационное ускорение, коэффициент теплового расширения, гидравлический диаметр, температуропроводность и кинематическая вязкость соответственно.

Таблица

Конфигурации исследуемых электростанций SCPP

Обозначение	Описание
SCPP1	Система хранения состоит в основном из грунта и вытяжной трубы с прямым выпускным отверстием ( $\alpha = 0^\circ$ )
SCPP1 ( $\alpha = 10^\circ$ )	Система хранения состоит в основном из грунта и вытяжной трубы с наклонным выпускным отверстием ( $\alpha = 10^\circ$ )
SCPP1 ( $\alpha = 20^\circ$ )	Система хранения состоит в основном из грунта и вытяжной трубы с расходящимся выпускным отверстием ( $\alpha = 20^\circ$ )
SCPP1 ( $\alpha = 30^\circ$ )	Система хранения состоит в основном из грунта и вытяжной трубы с расходящимся выпускным отверстием ( $\alpha = 30^\circ$ )
SCPP1 ( $\alpha = 40^\circ$ )	Система хранения состоит в основном из грунта и вытяжной трубы с расходящимся выпускным отверстием ( $\alpha = 40^\circ$ )
SCPP2	Система хранения состоит в основном из грунта, водяной ванны и вытяжной трубы с прямым выпускным отверстием ( $\alpha = 0^\circ$ )
SCPP2 ( $\alpha = 10^\circ$ )	Система хранения состоит в основном из грунта, водяной ванны и вытяжной трубы с расходящимся выпускным отверстием ( $\alpha = 10^\circ$ )
SCPP2 ( $\alpha = 20^\circ$ )	Система хранения состоит в основном из грунта, водяной ванны и вытяжной трубы с расходящимся выпускным отверстием ( $\alpha = 20^\circ$ )
SCPP2 ( $\alpha = 30^\circ$ )	Система хранения состоит в основном из грунта, водяной ванны и вытяжной трубы с расходящимся выпускным отверстием ( $\alpha = 30^\circ$ )
SCPP2 ( $\alpha = 40^\circ$ )	Система хранения состоит в основном из грунта, водяной ванны и вытяжной трубы с расходящимся выпускным отверстием ( $\alpha = 40^\circ$ )

Для учета изменения плотности воздуха применяется приближение Буссинеска. Основные уравнения сохранения (массы, импульса и энергии) в дополнение к  $k$ - $\varepsilon$  модели, используемой для турбулентных течений, определяются как

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \left( \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) + \rho f_i, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j c_p T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + T \beta \frac{\partial P}{\partial t} + \varphi, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_k, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon, \quad (6)$$

где  $P$ ,  $\nu$ ,  $\lambda$ ,  $\varphi$ ,  $\mu$  и  $f_i$  — среднее давление, кинематическая вязкость, теплопроводность, рассеивание энергии, динамическая вязкость и объемные силы соответственно,  $G_k$  — величина генерации кинетической энергии турбулентности, определяемая градиентами средней скорости и имеющая вид  $G_k = -\overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$ ,  $G_b$  — генерация турбулентности за счет выталкивающей силы,  $S_k$  — дополнительные исходные условия для  $k$ ,  $S_\varepsilon$  — дополнительные исходные условия для  $\varepsilon$ ,  $\beta \approx 1/T$  — коэффициент теплового расширения.

Величины модельных постоянных выбраны аналогично работе [25]:  $C_\mu = 0,09$ ,  $C_{1\varepsilon} = 1,44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1,92$ ,  $\sigma_k = 1$  и  $\sigma_\varepsilon = 1,31$ , где  $\sigma_k$  и  $\sigma_\varepsilon$  — турбулентные числа Прандтля для турбулентной кинетической энергии  $k$  и скорости диссипации  $\varepsilon$  соответственно. Турбулентная вязкость моделируется как  $\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon}$ , где  $C_\mu$  — эмпирическая постоянная.

Электрическая мощность  $P_{el}$ , генерируемая потоком флюида через системы преобразования, рассчитывается из соотношения [13]

$$P_{el} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\eta g H_{ch}}{c_p T_\infty} A_{coll} I_s, \quad (7)$$

где  $\eta$ ,  $H_{ch}$ ,  $c_p$ ,  $T_\infty$ ,  $A_{coll}$  и  $I_s$  — КПД электростанции, высота вытяжной трубы, удельная теплоемкость, температура окружающей среды, площадь коллектора и интенсивность солнечного излучения соответственно.

## 2.2. Граничные условия

Граничные условия рассматриваемой задачи определяются исходя из погодных условий, характерных для места расположения Адраара (юго-западный регион Алжира), а также из соответствующих обычному дню параметров солнечного излучения, являющегося источником тепла, и температуры окружающей среды, значение которой равно значению температуры на входе в вытяжную трубу, указанному в работе [26] (рис. 2).

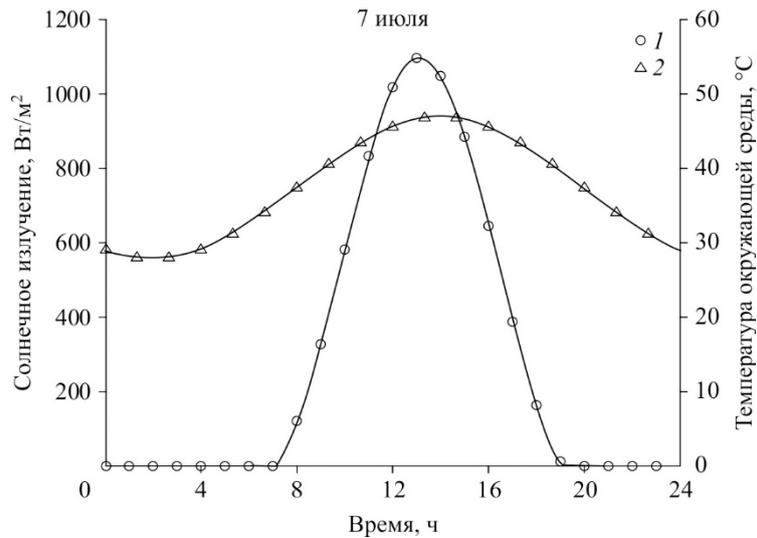


Рис. 2. Зависимость солнечной радиации (1) и температуры окружающей среды (2) от времени в июле.

Относительное статическое давление на входе коллектора равно нулю, а температура равна температуре окружающей среды:

$$p_{r, \text{inlet}} = 0, \quad T_{\text{inlet}} = T_{\infty}. \quad (8)$$

Граничное условие для слоя земли, накапливающего энергию, может быть выбрано как условие постоянной температуры, поскольку температура в этом месте изменяется незначительно. Температура почвы на глубине пяти метров считается постоянной и принимает значение 300 К. Коэффициент теплопередачи грунта определяется как

$$U_b = 2b/\sqrt{\pi t}, \quad (9)$$

где  $t$  — время от полуночи. Термический коэффициент проницаемости определяется как  $b = \sqrt{\lambda \rho c_p}$ , где  $\lambda$ ,  $\rho$  и  $c_p$  — теплопроводность, плотность и удельная теплоемкость соответственно. Крышка коллектора выполнена из прозрачного материала со средним коэффициентом пропускания  $\tau = 0,64$ .

Для стенки вытяжной трубы принимаются условия адиабатической стенки и отсутствия скольжения:

$$\partial T/\partial x = 0, \quad u = 0, \quad v = 0. \quad (10)$$

В системе аккумулирования тепла учитывалась только теплопроводность воды из-за малой толщины водного слоя (0,10 м), а также из-за его удержания в замкнутом пространстве (поверхность почвы снизу и прозрачная стена в качестве покрытия).

### 3. Численный метод и проверка достоверности

Для решения уравнений Навье–Стокса будет использоваться CFD-программа Saturne. Saturne — это параллельная программа с интерфейсом передачи сообщений MPI, который основан на совместно локализованной дискретизации конечного объема на структурированной или неструктурированной сетке. Дискретизация по времени основана на схеме предиктор-корректор для уравнений Навье–Стокса. Будем рассматривать решение системы однофазных нестационарных трехмерных уравнений Навье–Стокса для несжимаемой или слабо сжимаемой среды на основе временной дискретизации Эйлера неявного (первого) типа или Кранка–Николсона второго типа и пространственной совместно локализованной дискретизацией конечного объема. Для решаемой задачи в указанной программе за два шага в результате разложения операторов (метод дробных шагов) вычисляются переменные скорости и давления на заданном временном шаге.

Syrthes — программа общего назначения для численного разрешения проводимости и излучения в прозрачной среде. Эта бесплатная программа (относящаяся к открытым источникам информации) обладает большой мощностью для параллельных вычислений. Она может сочетаться со многими другими программами для моделирования физических проблем. Программа Syrthes позволяет рассматривать различные типы задач теплопроводности, теплового излучения и сопряженных переносов массы и температуры и используется во многих областях. Она является объемным тепловым модулем, который максимально разделен: жидкая и твердая области вычислений совершенно независимы. Единственное ограничение возникает при попытке максимально приблизиться к межфазной границе между жидкостью и твердым телом. Разрешение также разделено, что позволяет наилучшим образом использовать численные методы в каждой области. Вероятность внесения ошибок в программу при рассмотрении жидкости также сведена к минимуму. В программе Syrthes используется метод конечных элементов для решения общего теплового уравнения, где все свойства могут зависеть от времени, пространства или температуры:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + \Phi_V, \quad (11)$$

здесь  $T$  — температура,  $t$  — время,  $\Phi_V$  — исходное условие по объему,  $\rho$  и  $c_p$  — плотность и удельная теплоемкость соответственно,  $\lambda$  — теплопроводность среды (тензор, когда материал анизотропен). Тепловая связь между двумя программами является явной и выполняется на каждом временном шаге.

Пусть  $T_w$  — температура твердого тела в узле, принадлежащем границе раздела жидкости и твердого тела,  $T_f$  — температура потока в центре ячейки, расположенной на уровне потока, примыкающего к стенке. В момент времени  $t$  у Syrthes передает программе Saturne значение  $T_w^{(n)}$ . Затем программа Saturne вычисляет локальный коэффициент теплообмена  $h^{(n)}$ , соответствующий разности температур  $T_f^{(n)} - T_w^{(n)}$ , и отправляет информацию  $h^{(n)}$ ,  $T_f^{(n)}$  опять к программе Syrthes. Используя  $T_w^{(n)}$  и  $h^{(n)}$ , программа Saturne переходит к следующему временному шагу и вычисляет значение  $T_f^{(n+1)}$ . Параллельно со значениями  $h^{(n)}$  и  $T_f^{(n)}$  программа Syrthes обновляет температуру твердого тела и вычисляет  $T_w^{(n+1)}$  и так далее.

Для проверки результатов, полученных с помощью указанных программ, авторы провели численное исследование, используя прототипы данных Мансанареса из справочной работы по проверке достоверности [12]. Из данных, представленным на рис. 3–5, следует

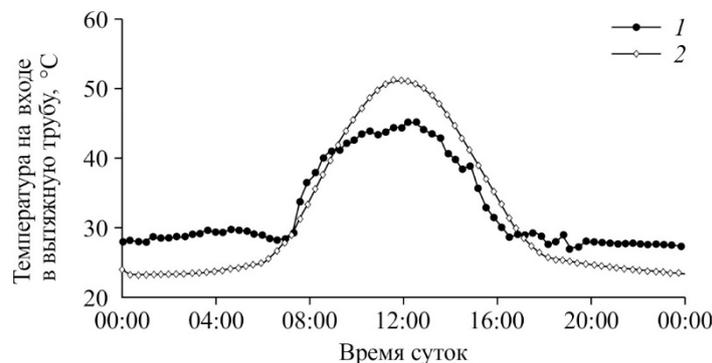


Рис. 3. Проверка данных, полученных с помощью используемых программ, по результатам работы [12] для температуры на входе в вытяжную трубу (на входе в ветряную турбину) в зависимости от времени.

1 — экспериментальные данные [12], 2 — результаты настоящего исследования.

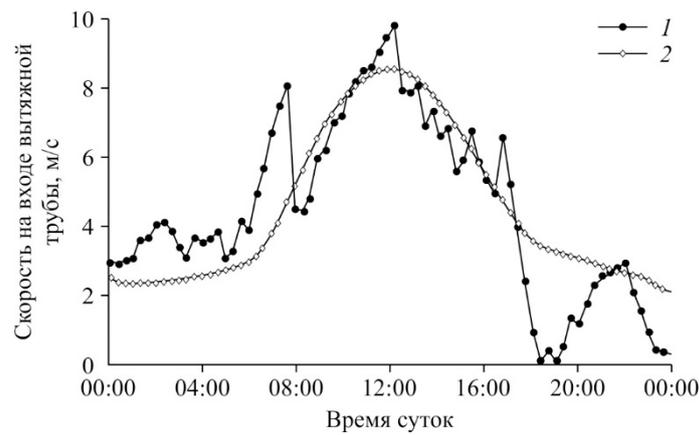


Рис. 4. Проверка данных, полученных с помощью используемых авторами программ, по результатам работы [12] для скорости на входе в вытяжную трубу (на входе в ветряную турбину) в зависимости от времени. Обозначения см. на рис. 3.

сделать вывод, что численную модель можно считать достоверной при успешном сравнении с экспериментальными данными, полученными на экспериментальной станции в Мансанаресе, показывает хорошее согласование.

#### 4. Результаты и интерпретация

Моделирование работы солнечной электростанции с вытяжной трубой проводилось с использованием CFD-программы Saturne в сочетании с программой Syrthes. Периодичность при моделировании указана для типичного дня в июле. Таким образом, рассматриваемые граничные условия зависят от метеорологических данных, определенных ранее.

Результаты, представленные на рис. 6–8, позволяют определить влияние двух систем сохранения тепла, рассмотренных в настоящем исследовании. Первая система состоит только из почвы (SCPP1), а вторая в дополнение к грунтовой части включает трубу толщиной 10 см, заполненную водой, которая покрывает всю поверхность коллектора.

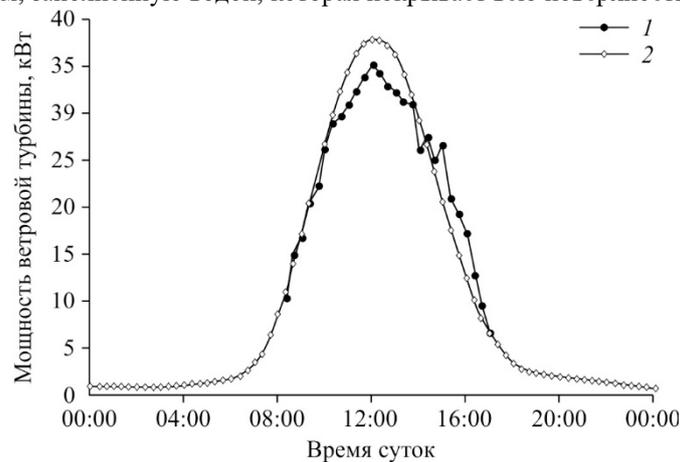


Рис. 5. Проверка данных, полученных с помощью численных кодов, по результатам работы [12] для мощности, передаваемой ветротурбиной в зависимости от времени. Обозначения см. на рис. 3.

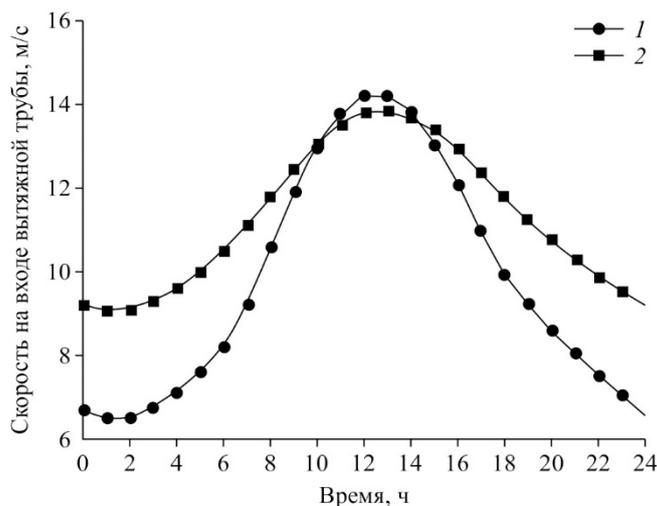


Рис. 6. Средняя скорость потока на входе в вытяжную трубу.

1, 2 — значения скорости потока соответственно для SCPP1 и SCPP2.

На рис. 6 показана суточная динамика средней скорости потока. Видно, что она меняется равномерно в течение дня. Изменение скорости соответствует изменению солнечной радиации. Максимальные значения скорости в течение дня получены на электростанции, где в качестве накопителя используется только почва (SCPP1). С другой стороны, в ночное время максимальные значения скорости получены на электростанции, которая оснащена дополнительной системой сохранения тепла (SCPP2).

Такая же закономерность характерна для энергии, передаваемой потоком флюида (рис. 7): дневная поставляемая мощность значительно выше на SCPP2, в то время как расширенная система сохранения тепла позволяет станции оставаться в рабочем состоянии долгое время после захода солнца. Это дает возможность повысить эффективность установки, как показано на рис. 8, рассчитанной в соответствии со следующим соотношением [27]:

$$\eta_{\text{sys}} = \frac{P_{\text{el}}}{I_s A_{\text{coll}}}, \quad (12)$$

где  $P_{\text{el}}$ ,  $I_s$  и  $A_{\text{coll}}$  — электрическая мощность, интенсивность солнечного излучения и площадь коллектора соответственно.

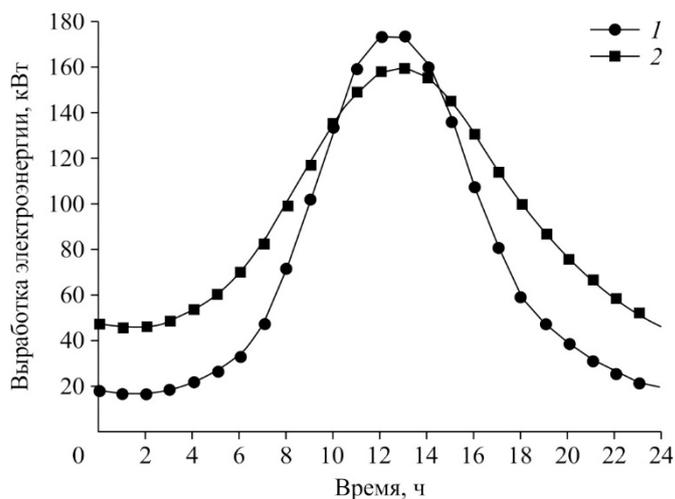


Рис. 7. Суточная выработка электроэнергии.

Обозначения см. на рис. 6.

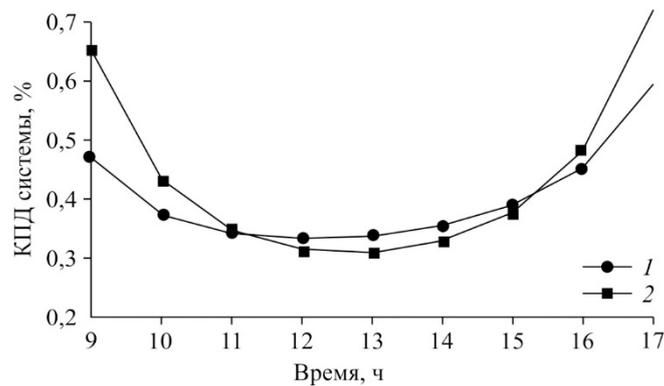


Рис. 8. Мгновенная эффективность.

Обозначения см. на рис. 6.

На следующих рисунках представлены результаты, полученные в соответствии с модификациями, выполненными на солнечной электростанции с вытяжной трубой без дополнительной системы сохранения тепла. Далее они будут сравниваться с данными системы стандартной конфигурации — SCPP1. Модификация состоит в увеличении длины установки на 2 м, на выходе трубы устанавливается расходящаяся форма с переменными выходными секциями. Разница выходных секций представлена углами открытия, указанными в таблице.

На рис. 9 показана средняя скорость потока флюида на входе в вытяжную трубу установки без дополнительного устройства сохранения тепла (SCPP1). Видно, что скорость регулярно увеличивается до максимума, а затем уменьшается до минимума в течение дня в зависимости от интенсивности солнечного излучения. Максимальные скорости получены для SCPP1 с расходящейся формой выхода вытяжной трубы с углами открытия  $10^\circ$  и  $20^\circ$ . Минимальная скорость характерна для SCPP1, имеющей расходящийся выход вытяжной трубы с углом открытия  $40^\circ$ . Увеличение скорости при  $\alpha = 10^\circ, 20^\circ$  можно

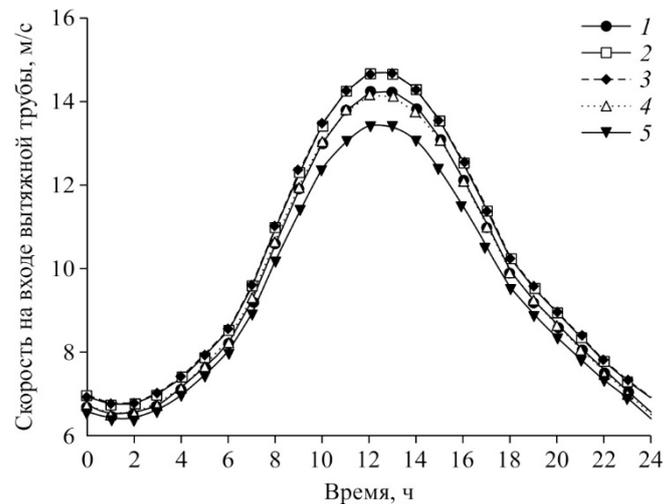


Рис. 9. Средняя скорость потока для различных конфигураций электростанций SCPP1 без дополнительного накопления тепла.

Электростанция с вытяжной трубой в отсутствие угла раскрытия (1) и с углами раскрытия  $\alpha = 10^\circ$  (2),  $20^\circ$  (3),  $30^\circ$  (4),  $40^\circ$  (5).

объяснить следующим образом. Из-за повышения температуры в коллекторе уменьшается плотность воздуха, что позволяет ему подниматься по трубе. Столб горячего воздуха, присутствующий во всей конструкции, связан с окружающей внешней средой коллектором на входе и вытяжной трубой на выходе. Вес этого столба воздуха легче, чем вес окружающего воздуха, что вызывает подъем горячего воздуха (эффект тяги). Действительно, горячий воздух внутри вытяжной трубы выталкивается в окружающую среду через выход вытяжной трубы, и, следовательно, на входе коллектора создается воздушная тяга. Расходящаяся форма воздуховода на выходе с соответствующим углом открытия, который в данном случае устанавливается между  $10^\circ$  и  $20^\circ$ , слегка усиливает расширение наружу горячего флюида, который имеет меньшую плотность, чем окружающий воздух. Это увеличивает скорость потока на выходе из вытяжной трубы и, следовательно, расход, влияние тяги и максимальную скорость потока на входе в вытяжную трубу, который является подходящим местом для расположения турбин.

В случае использования дополнительного водного резервуара часть солнечного излучения сохраняется в водном слое. Следовательно, меньше энергии используется для обогрева воздушного потока в дневное время. Скорость воздушного потока на выходе из вытяжной трубы в течение дня меньше по сравнению с SCPP1 и выше ночью, когда используется тепло, накопленное системой хранения.

Как и ожидалось, производство электроэнергии возрастает с увеличением солнечного излучения для всех конфигураций станции (рис. 10). Больше количество энергии генерируется установками, имеющими расходящийся выпускной патрубок с углом раскрытия  $10^\circ$  и  $20^\circ$ . Аналогично скоростям минимальная мощность соответствует конфигурации, имеющей угол раскрытия  $40^\circ$ . При этом для повседневного использования конфигурация установки, оснащенная дополнительными системами хранения тепла, дает максимальную энергию. Тем не менее, электростанции с углом раскрытия выходной части вытяжной трубы  $10^\circ$  и  $20^\circ$ , оснащенные дополнительным хранилищем (SCPP2), производят больше электроэнергии. При уменьшении максимальной мощности примерно на 10 % наблюдается ощутимое улучшение производительности при слабом или отсутствующем излучении (до 100 % с 06:00 до 09:00 часов следующего дня).

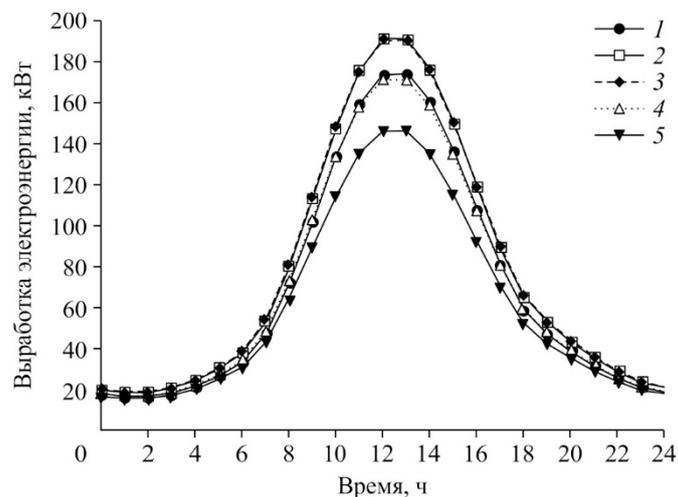


Рис. 10. Количество ежедневной выработки электроэнергии для конфигураций электростанций без дополнительного накопления тепла.

Обозначения см. на рис. 9.

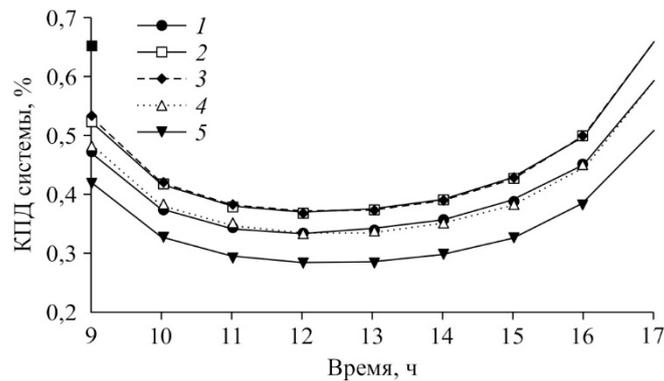


Рис. 11. Изменение мгновенной эффективности для конфигураций электростанций без дополнительного накопления тепла. Обозначения см. на рис. 9.

На рис. 11 показана мгновенная эффективность. Видно, что конфигурации, генерирующие максимальную мощность, ежедневно выдают максимальную эффективность. Производительность улучшается за счет использования резервуара для воды так же, как и в конфигурации с расходящимся выпускным отверстием с углом раскрытия  $10^\circ$  и  $20^\circ$ . Следует отметить, что эффективность повышается почти на 50 % при наличии слабого излучения или в его отсутствие, при этом ее снижение в дневное время составляет менее 20 %.

### Заключение

В работе проведено численное исследование турбулентного течения под действием естественной конвекции на солнечных электростанциях с вытяжными трубами. Цель исследования заключалась в оценке количества электроэнергии, которая может генерироваться солнечной электростанцией с вытяжной трубой, установленной в южном регионе Алжира и работающей в местных метеорологических условиях. Анализ результатов показывает следующее.

1. Производство электроэнергии связано с интенсивностью солнечного излучения.
2. Солнечная электростанция с вытяжной трубой (SCPP) может работать непрерывно в течение всего дня. Однако использование дополнительного аккумулятора улучшает выработку электроэнергии в течение ночного периода.
3. Геометрически расходящаяся на выходе вытяжная труба также улучшает работу электростанции. Следует отметить, что углы раскрытия от  $10^\circ$  до  $20^\circ$  соответствуют термодинамически наиболее эффективным конфигурациям.
4. Сочетание двух модификаций — расходящейся формы воздуховода на выходе с углом раскрытия  $10^\circ$  и  $20^\circ$  и дополнительного аккумулятора — позволяет оптимизировать конфигурацию системы, что повышает производительность почти на 100 % в течение периода с низким или отсутствующим солнечным излучением при снижении производительности в дневное время менее чем на 20 %.

### Список обозначений

$A$ — площадь, $\text{м}^2$ ,	$L$ — длина, м,
$b$ — коэффициент теплового проникновения, $\text{Вт}\cdot\text{с}^{1/2}\cdot\text{К}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$ ,	$P$ — давление, Па,
$c_p$ — удельная теплоёмкость, $\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ,	$P_{el}$ — электрическая мощность,
$D_h$ — гидравлический диаметр, м,	$P_r$ — число Прандтля,
$f$ — объемные силы, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-2}$ ,	$Ra$ — число Рейля,
	$Re$ — число Рейнольдса,

$g$  — гравитационное ускорение,  $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$ ,  
 $Gr$  — число Грасгофа,  
 $H_{ch}$  — высота трубы, м,  
 $I_s$  — интенсивность солнечного излучения,  
 $k$  — турбулентная кинетическая энергия,  
 $\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$ ,

$T$  — температура, К,  
 $\Delta T$  — перепад температур, К,  
 $t$  — время, с,  
 $u, v$  и  $w$  — компоненты скорости,  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ ,  
 $U_b$  — коэффициент теплообмена грунта,  $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$ .

### Греческие символы

$\lambda$  — теплопроводность,  $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ,  
 $\alpha$  — температуропроводность,  $\text{м}^2\cdot\text{с}^{-1}$ ,  
 $\nu$  — кинематическая вязкость,  $\text{м}^2\cdot\text{с}^{-1}$ ,  
 $\varepsilon$  — скорость турбулентной диссипации,  $\text{м}^2\cdot\text{с}^{-3}$ ,

$\mu$  — динамическая вязкость,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$ ,  
 $\beta$  — коэффициент термического расширения,  $\text{К}^{-1}$ ,  
 $\varphi$  — диссипация энергии, Вт,  
 $\eta$  — КПД электростанции.

### Подстрочные символы

$b$  — выталкивающая сила,  
 $c$  — cold, холодный,  
 $ch$  — вытяжная труба,  
 $coll$  — коллектор,  
 $el$  — электрический,  
 $h$  — hot, горячий,

$s$  — солнечное,  
 $sys$  — система,  
 $t$  — турбулентный,  
 $w$  — стена,  
 $g$  — генерация,  
 $\infty$  — окружающая среда.

### Список литературы

1. Schlaich J., Bergermann R., Schiel W., Weinreb G. Design of commercial solar updraft tower systems – Utilization of solar induced convective flows for power generation // J. Solar Energy Engng. 2005. Vol. 127, No. 1. P. 117–124.
2. Ghalamchia M., Kasaeian A., Ghalamchi M. Experimental study of geometrical and climate effects on the performance of a small solar chimney // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 43. P. 425–431.
3. Zhou X., Bernardes M.A. dos S., Ochieng R.M. Influence of atmospheric crossflow on solar updraft tower inflow // Energy. 2012. Vol. 42. P. 393–400.
4. Koonsrisuk A. Mathematical modeling of sloped solar chimney power plants // Energy. 2012. Vol. 47. P. 582–589.
5. Koonsrisuk A., Chitsomboon T. Mathematical modeling of solar chimney power plants // Energy. 2013. Vol. 51. P. 314–322.
6. Sangi R., Amidpour M., Hosseinizadeh B. Modeling and numerical simulation of solar chimney power plants // Solar Energy. 2011. Vol. 85. P. 829–838.
7. Ming T., Liu W., Pan Y., Xu G. Numerical analysis of flow and heat transfer characteristics in solar chimney power plants with energy storage layer // Energy Conversion and Management. 2008. Vol. 49, Iss. 10. P. 2872–2879.
8. Semai H., Bouhdjar A., Larbi S. Canopy slope effect on the performance of the solar chimney power plant // Intern. J. Green Energy. 2016. Vol. 14, Iss. 3. P. 229–238.
9. Kreetz H. Theoretische unter suchungen und auslegung einestempor // Diplomarbeit TU Berlin, Berlin, 1997.
10. Hoffmann P., Harkin T. Tomorrow's energy: hydrogen, fuel cells, and the prospects for a cleaner planet. Massachusetts: MIT Press, 2001. 289 p.
11. Haaf W., Friedrich K., Mayr G., Schlaich J. Solar chimneys. Part I: principle and construction of the pilot plant in Manzanares // Intern. J. Solar Energy. 1983. Vol. 2. P. 3–20.
12. Haaf W. Solar chimneys. Part II: preliminary test results from the Manzanares plant // Intern. J. Solar Energy. 1984. P. 141–161.
13. Ming T., Wang X., de Richter R.K., Liu W., Wu T., Pan Y. Numerical analysis on the influence of ambient crosswind on the performance of solar updraft power plant system // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. Vol. 16, Iss. 8. P. 5567–5583.
14. Shirvan K.M., Mirzakhani S., Mamourian M., Kalogirou S.A. Optimization of effective parameters on solar updraft tower to achieve potential maximum power output: a sensitivity analysis and numerical simulation // Applied Energy. 2017. Vol. 195. P. 725–737.
15. Koonsrisuk A., Chitsomboon T. Effects of flow area changes on the potential of solar chimney power plants // Energy. 2013. Vol. 51. P. 400–406.
16. Kalash Sh., Naimeh W., Ajib S. Experimental investigation of the solar collector temperature field of a sloped solar updraft power plant prototype // Solar Energy. 2013. Vol. 98, Pt 1. P. 70–77.
17. Hu S., Leung D.Y.C. Impact of guide wall geometry on the power output of solar chimney power plant // Energy. 2016. Vol. 88. P. 414–421.
18. Zhou X., Xu Y., Huang Y. Novel concept of enhancing the performance of sloped solar collector by using natural anabatic winds // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 102. P. 1356–1361.
19. Shena W., Ming T., Ding Y., Wu Y., de Richter R.K. Numerical analysis on an industrial-scaled solar updraft power plant system with ambient crosswind // Renewable Energy. 2014. Vol. 68. P. 662–676.

20. **Ming T., Gui J., de Richter R.K., Pan Y., Xu G.** Numerical analysis on the solar updraft power plant system with a blockage // *Solar Energy*. 2013. Vol. 98, Pt 1. P. 58–69.
21. **Cao F., Zhao L., Li H., Guo L.** Performance analysis of conventional and sloped solar chimney power plants in China // *Applied Thermal Engng.* 2013. Vol. 50. P. 582–592.
22. **Ming T., Wu Y., de Richter R.K., Liu W., Sherif S.A.** Solar updraft power plant system: a brief review and a case study on a new system with radial partition walls in its collector // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 69. P. 472–487.
23. **Ahmed M. R., Patel S.K.** Computational and experimental studies on solar chimney power plants for power generation in Pacific Island countries // *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 149. P. 61–78.
24. **Okada S., Uchida T., Karasudani T., Ohya Y.** Improvement in solar chimney power generation by using a diffuser tower // *ASME J. Sol. Energy Eng.* 2015. Vol. 137. P. 1–8.
25. **Шукла А.К., Деван А.** Теплообмен и течение при натекании плоской турбулентной струи на гладкую и оребренную поверхности // *Теплофизика и аэромеханика*. 2018. Т. 25, № 5. С. 747–766.
26. **Cardrou M.** Atlas solaire de l'Algérie. Algiers : University Publications Office, 1988. Vol. 1–3.
27. **Fei C., Zhao L., Guo L.** Simulation of a sloped solar chimney power plant in Lanzhou // *Energy Conversion and Management*. 2011. Vol. 52, Iss. 6. P. 2360–66.

*Статья поступила в редакцию 4 октября 2018 г.,  
после переработки — 20 ноября 2019 г.,  
принята к публикации 10 февраля 2020 г.*