

¹ А. И. Ценципер, канд. техн. наук
^{1,2} А. О. Костиков, д-р. техн. наук
¹ Н. А. Сафонов, канд. физ.-мат. наук
¹ Я. Н. Буштец

¹ Институт проблем машиностроения
 им. А. Н. Подгорного НАН Украины,
 г. Харьков, e-mail:

tsentsiper@ipmach.kharkov.ua

² Харьковский национальный университет
 имени В. Н. Каразина, г. Харьков, e-mail:
 kostikov@ipmach.kharkov.ua

Ключові слова: орієнтація, сферичний, плоский,
 сонячний, колектор, інтенсивність, сонячна енергія.

УДК 516.3, 516.65

К ОРИЕНТАЦИИ СФЕРИЧЕСКИХ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

Подана конструкція сферичного сонячного колектора та описаний принцип його роботи. Наведено ряд переваг геометрії сферичних колекторів у порівнянні з геометрією плоских. Зроблено чисельно-аналітичний розрахунок кількості сонячної енергії, яка сприймається сонячним колектором, залежно від його орієнтації відносно горизонту. Визначено оптимальний кут нахилу сферичного колектора, при якому він сприймає максимальну кількість сонячної енергії за рік і який залежить від географічної широти місцевості, на якій він встановлений.

Введение

В настоящее время в мировой практике для преобразования возобновляемой лучистой солнечной энергии широко используют гелиотехнические устройства. В частности, это солнечные коллекторы, которые непосредственно преобразуют лучистую энергию солнца в тепловую, пригодную для практического использования, чаще всего для горячего водоснабжения.

Как правило, они представляют собой плоские трубчатые коллекторы, которые устанавливаются стационарно и ориентируют воспринимающую поверхность к югу с уклоном к горизонту, и угол его наклона зависит от широты данной местности. В связи с сезонным изменением траектории прохождения солнца по небосклону этот угол корректируют: летом уменьшают на 5–10°, в зимний период примерно на эту же величину увеличивают [1].

Принципиальным недостатком всех существующих конструкций плоских солнечных коллекторов является необходимость иметь в их составе специальные механизмы, следящие за траекторией движения солнца как по высоте, так и по углу азимута в течение всего светового дня от восхода до захода. В идеальном случае плоский трубчатый солнечный коллектор, в буквальном смысле как подсолнух, должен следовать за солнцем, сохраняя оптимальное положение в течение всего дня. Применение такого солнечного коллектора, в котором происходит совмещение взаимодействия автоматического устройства суточного и годового слежения за солнцем и часового механизма с корректирующими устройствами, действительно даёт возможность реализовать его оптимальную ориентацию и вследствие этого получить максимальную тепловую энергию. Однако такие механизмы, кроме того, что они кинематически чрезвычайно сложны, требуют для их привода в действие подвода дополнительной энергии. Поэтому подвижные плоские солнечные коллекторы, следящие за траекторией солнца, вследствие высокой стоимости и громоздкости не получили широкого практического применения, и в настоящее время используются, в основном, только стационарные коллекторы [2].

Целью данной работы является определение количества солнечной энергии, воспринимаемой сферическими солнечными коллекторами, их ориентация относительно горизонта.

Конструкция сферического солнечного коллектора

В Институте проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины разработана и запатентована серия принципиально новых по геометрической форме объёмных солнечных коллекторов [3–8].

С целью снижения теплотерь и повышения энергоэффективности разработана оптимальная конструкция сферического солнечного коллектора [6], представленная на рис. 1.

Коллектор содержит теплоприёмник 1, который выполнен из навитой по сферической винтовой линии единой металлической трубки. Теплоприёмник 1 размещён внутри вакуумированной стек-

лянной сферы 2, состоящей из двух полусфер, герметично установленных в профильной прокладке 3 из вакуумной резины.

Внутри профильной прокладки 3 встроено вогнутое наружу сферическое зеркало 5 радиусом R , равным радиусу внутренней сферы теплоприёмника в виде шарового пояса высотой, равной высоте профильной прокладки.

Подводной и отводной патрубки теплоприёмника 1 герметично уплотнены во втулках 4 и также выполнены из вакуумной резины. Из внутренней полости сферы 2 откачан воздух со степенью вакуума, обычно достигаемой в промышленности.

Сфера 2 с размещённым внутри теплоприёмником 1, профильной прокладкой 3 и втулками 4 установлена в двуплечном кронштейне 6.

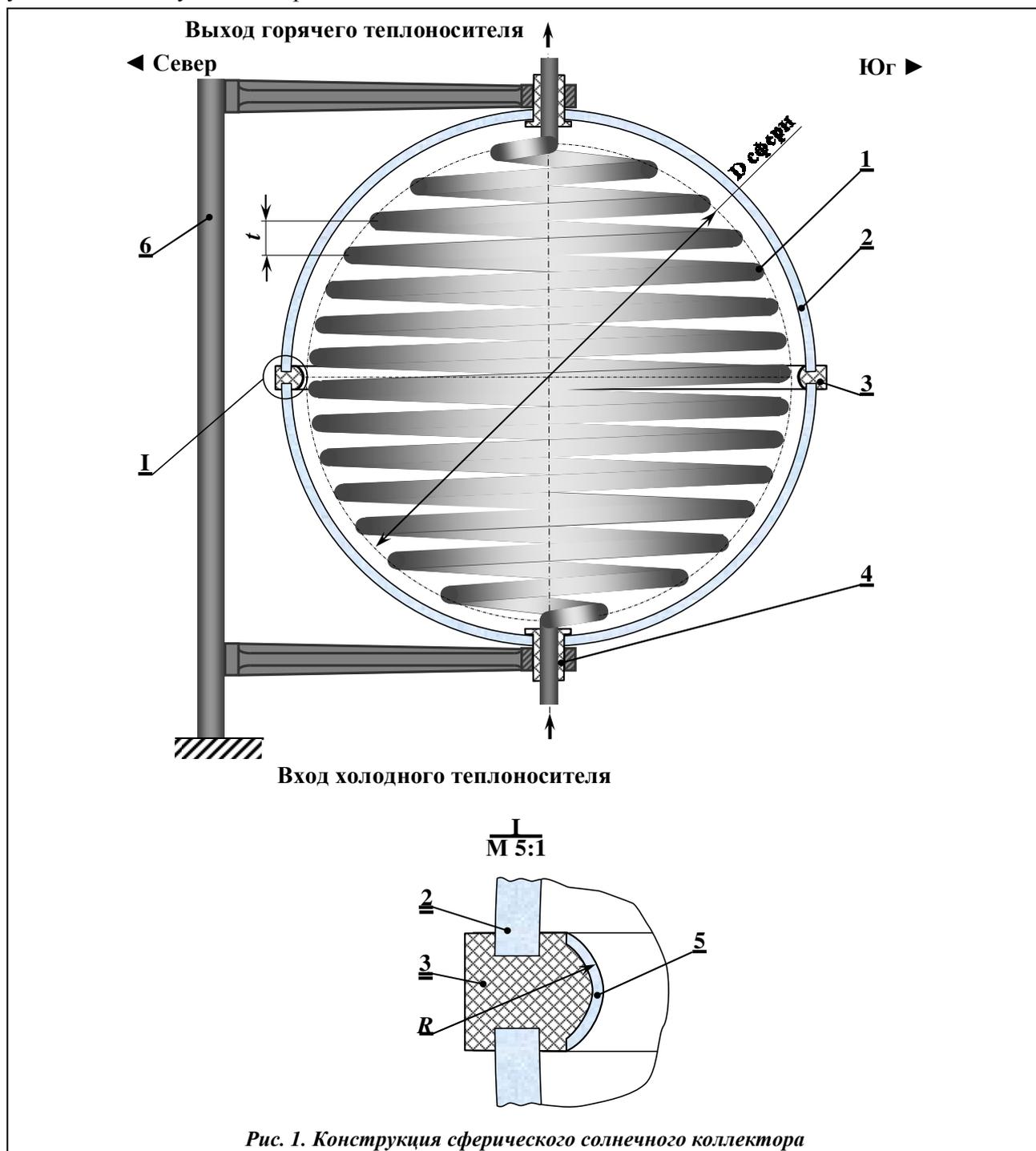


Рис. 1. Конструкция сферического солнечного коллектора

Сферический солнечный коллектор функционирует следующим образом.

На вход в подводящий патрубок теплоприёмника 1 подаётся холодный теплоноситель (например, техническая вода), который движется по винтовой линии единой металлической трубки. Во время движения теплоноситель постоянно нагревается лучистой солнечной энергией, воздействующей через прозрачную сферу 2 на трубчатый теплоприёмник 1. При этом солнечные лучи от восхода до захода солнца постоянно воздействуют на половину наружной сферической поверхности теплоприёмника 1, а также проникают через промежутки между витками теплоприёмника и нагревают половину противоположных внутренних тыльных поверхностей трубных витков теплоприёмника 1.

Кроме того, солнечные лучи в течение всего светового дня, проникая между витками теплоприёмника 1, постоянно воздействуют на различные участки вогнутого наружу сферического зеркала 5. При этом они отражаются в направлении внутренних затенённых участков витков теплоприёмника 1, на внешнюю поверхность которых в данный момент эти лучи направлены.

После прохождения по винтовой линии теплоприёмника 1 горячий теплоноситель поступает на выход в отводящий патрубок (направление движения теплоносителя показано стрелками на рис. 1) и затем направляется для дальнейшего потребления (бак-аккумулятор, отопление, горячее водоснабжение и т. п.). Вакуум в прозрачной сфере практически полностью исключает теплотери в теплоприёмнике 1.

Необходимо отметить ряд преимуществ геометрии сферических солнечных коллекторов по сравнению с геометрией плоских. Сравнение проводилось при одинаковых общей длине и диаметре металлической трубки коллекторов.

Как правило, плоские солнечные коллекторы выполняются в виде отдельных вакуумированных стеклянных трубок, концентрически надетых и закреплённых на металлических трубках. Трубки одним концом входят в приёмный патрубок, другим – в выходной патрубок. В сферическом коллекторе вакуумируется стеклянная оболочка, состоящая из двух полусфер, внутри которых расположен сферический теплоприёмник, выполненный из единой трубки.

Поскольку кривизна стеклянной сферы в десятки раз меньше кривизны стеклянных трубок, это снижает отражательную и повышает пропускательную способность сферы при воздействии солнечных лучей.

Сферическая форма не требует использования каких-либо дополнительных механизмов, чтобы следовать за движением солнца. Благодаря такой форме коллектор постоянно "следит" за ним, т. е. фактически одинаково воспринимает лучистую энергию солнца, когда оно проходит по небосводу на разной высоте и под разными углами азимута.

В сферическом коллекторе благодаря единому трубопроводу, выполненному в виде сферической винтовой линии, за счёт снижения местных сопротивлений и отсутствия входного и выходного патрубков гидравлическое сопротивление в 1,4–1,6 раза меньше, чем у плоского, выполненного в виде отдельных трубок.

Вес сферического коллектора в среднем в 2,5–3 раза меньше плоского.

Площадь под установку сферического коллектора в среднем в 1,5–2,5 раза меньше, чем требуется площадь под монтаж плоского коллектора.

Расчёт количества солнечной энергии, воспринимаемой коллектором

Расчёт количества солнечной энергии, воспринимаемой сферическим солнечным коллектором в течение одного дня, сводится к вычислению следующего интеграла [1]:

$$Q(d) = \int_{-t^*(d)}^{t^*(d)} \int_{\Gamma(t)} I \cos i \, d\Gamma dt, \quad 0 \leq d \leq 364, \quad (1)$$

где d – число дней, прошедшее со дня весеннего равноденствия (22 марта). Интервал времени от восхода солнца до захода $-t^*(d) \leq t \leq t^*(d)$ определяется величиной $t^*(d) = \frac{12}{\pi} \arccos(-\operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg}\delta)$. Здесь φ – географическая широта местности, а $\delta = 23,5^\circ \sin \frac{2\pi d}{365}$ – угол склонения [1, 2].

Поверхность $\Gamma(t)$ представляет собой освещённую часть внешней поверхности трубки коллектора в момент времени t , так как в каждый момент времени данная поверхность сама себя затеняет от солнца. Интенсивность солнца I зависит от его высоты h_s и представляет полную энергию, поступающую в единицу времени на единицу поверхности, обращённую непосредственно к солнцу, и в дискретном виде приведена в [1].

На рис. 2 представлена линейная аппроксимация зависимости интенсивности солнца от его высоты h_s .

Поскольку высота солнца зависит от времени суток и от дня в году, то отсюда получаем зависимость $I(t)$ для каждого дня. В формуле (1) величина $I(t)\cos i$ – интенсивность солнечного излучения, падающего на горизонтальную поверхность под углом i к нормали в определённой точке этой поверхности. Значение угла i также зависит от времени.

Чтобы оптимально ориентировать сферический солнечный коллектор, необходимо произвести сравнение общего количества полученной им энергии для различных его положений относительно горизонта.

Количество солнечной энергии, воспринимаемое коллектором за весь год, можно записать как

$$Q_\alpha = \sum_{d=0}^{364} Q(d), \quad (2)$$

где $Q(d)$ вычисляется по формуле (1).

Ориентацию солнечного коллектора относительно горизонта будем определять величиной угла наклона α вертикальной оси коллектора к горизонту. Начало отсчёта этого угла α производится от северного направления ($\alpha = 0^\circ$) и заканчивается южным ($\alpha = 180^\circ$).

В результате вычисления интеграла (1) для различных значений d получим усреднённую по всем дням года величину площади освещённой части поверхности сферического коллектора. Её значение можно записать как

$$S = B(\alpha) \cdot 2\pi r_0 L,$$

где $B(\alpha)$ – коэффициент, значение которого зависит от ориентации солнечного коллектора; r_0 – внешний радиус трубки; L – её длина [7].

Если функцию $I\cos i$ усреднить по пространству и времени за один день величиной $IC(d)$, то тогда интеграл (1) приближённо можно представить в виде

$$Q(d) \approx IC(d) \cdot 2t^*(d) \cdot B(\alpha) \cdot 2\pi r_0 L. \quad (3)$$

Ниже для двух отрезков изменения аргумента d функция $IC(d)$ представлена в виде приближения полиномами четвёртой степени для следующих значений: внешнего радиуса трубки

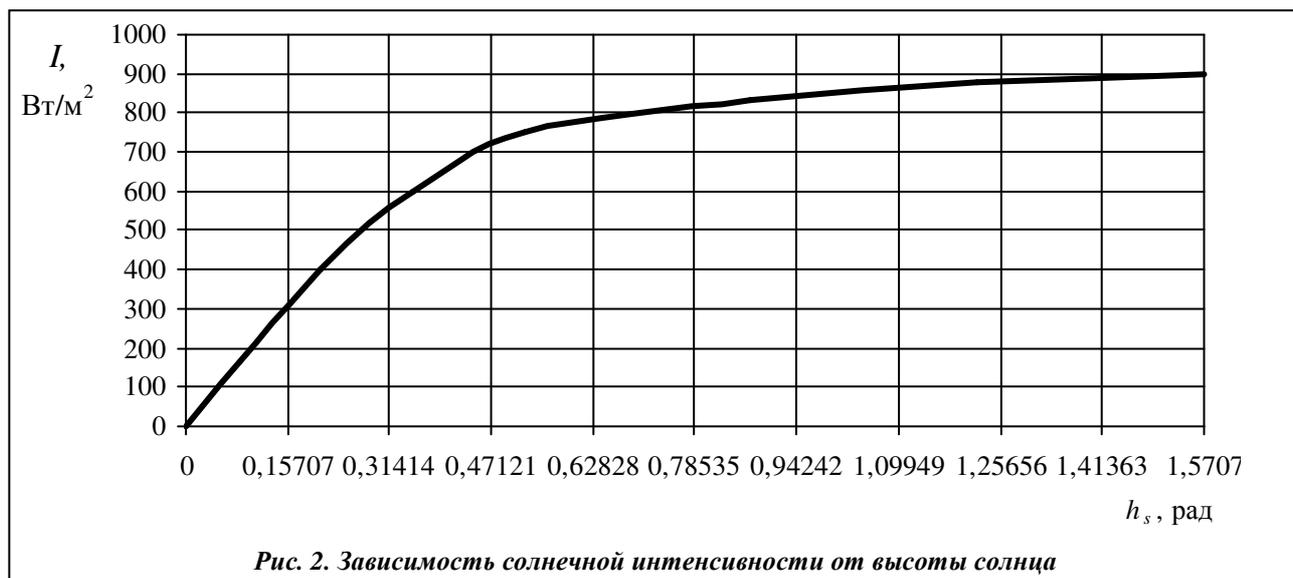
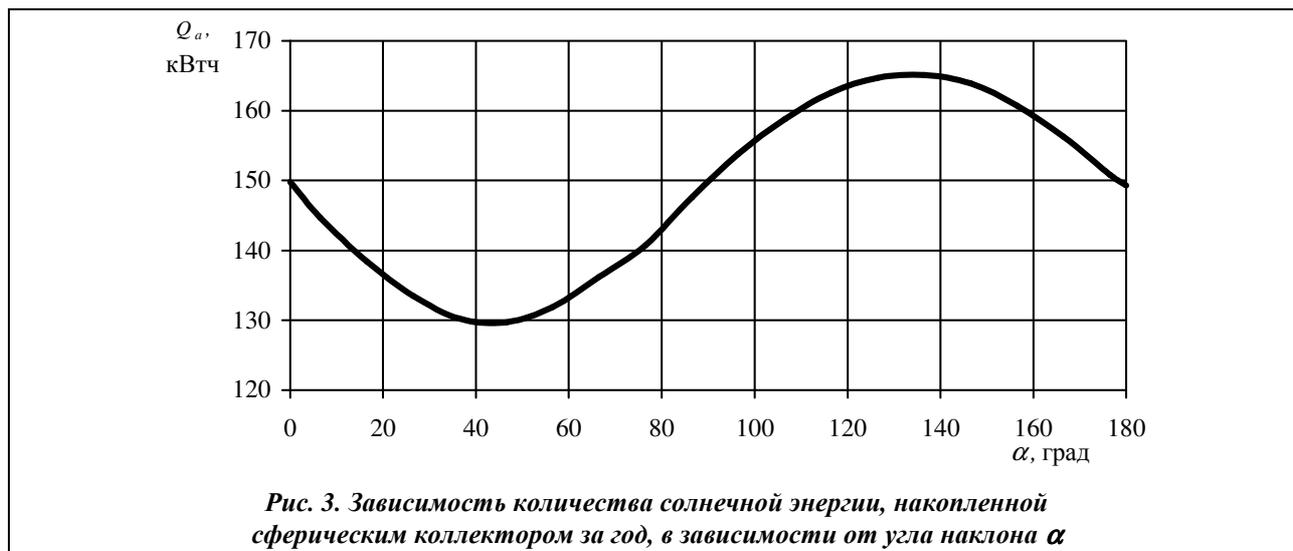


Рис. 2. Зависимость солнечной интенсивности от высоты солнца



$r_0 = 0,006$ м, радиуса сферы 0,15 м, количества витков 10, $\alpha = 90^\circ$ и для географической широты местности (г. Харьков) $\varphi = 50^\circ$

$$IC(d) = 289,297 + 1,431d - 0,0132d^2 + 5,824 \cdot 10^{-5} d^3 - 1,564 \cdot 10^{-7} d^4, \quad 0 \leq d \leq 200,$$

$$IC(d) = -6060,737 + 106,587d - 0,6417d^2 + 1,632 \cdot 10^{-3} d^3 - 1,489 \cdot 10^{-6} d^4, \quad 200 \leq d \leq 364.$$

Таким образом, формула (3) с учётом приведенной полиномиальной аппроксимации подынтегральной функции даёт возможность вычислять количество энергии, принятой солнечным коллектором в течение определённого дня года. Вычислив сумму (2), имеем количество тепла, получаемого коллектором за год при вертикальной ориентации оси коллектора

$$Q_{90} = \sum_{d=0}^{364} Q(d) = 150,27 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

На рис. 3 представлена зависимость количества тепловой энергии, накопленной солнечным коллектором за год, от угла наклона α . Расчёт проведен согласно формуле (2) с учётом аналогичной аппроксимации (3) для различных значений α . Для возможности практического использования полученных результатов приведём приближённые выражения для величины Q_α

$$Q_\alpha \approx \begin{cases} 150,059 - 51,135\alpha + 33,028\alpha^2, & 0 \leq \alpha < \frac{\pi}{2} \\ 22,252 + 122,108\alpha - 26,110\alpha^2, & \frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi \end{cases}. \quad (4)$$

Из рис. 4 видно, что оптимальное значение угла наклона сферического солнечного коллектора составляет $\alpha_{\text{opt}} \approx 135^\circ$, а приближение (4) даёт значение $133,97^\circ$.

Выводы

Определён оптимальный угол наклона сферического солнечного коллектора в зависимости от широты местности, на которой он установлен. Именно при таком угле наклона коллектора будет получено максимальное количество накопленной за год солнечной энергии.

Литература

1. Бринкворт, Б. Дж. Солнечная энергия для человека / Б. Дж. Бринкворт. – М.: Мир, 1976. – 286 с.
2. Даффи, Дж. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж. А. Даффи, У. А. Бекман. – М.: Мир, 1980. – 413 с.
3. Пат. 57323. Україна. Сфероїдний сонячний колектор / А. І. Ценципер, Ю. М. Мацевитий, С. Ф. Лушпенко, М. О. Сафонов, К. В. Казановська. – Опубл. 25.02.2011, Бюл. № 4.

4. Пат. 95578. Україна. Сфероїдний сонячний колектор / А. І. Ценципер, Ю. М. Мацевитий, С. Ф. Лушпенко, М. О. Сафонов, К. В. Казановська. – Оpubл. 10.08.2011, Бюл. № 15.
5. Пат. 102598. Україна. Сонячний колектор / А. І. Ценципер, Н. О. Сафонов, С. Ф. Лушпенко. – Оpubл. 25.07.2013, Бюл. № 14.
6. Пат.105112. Україна. Сферичний сонячний колектор / А. І. Ценципер, С. Ф. Лушпенко, М. О. Сафонов, Я. М. Буштець. – Оpubл. 10.04.2014, Бюл. № 7.
7. К построению сферического солнечного коллектора / Ю. М. Мацевитый, А. И. Ценципер, Н. А. Сафонов, С. Ф. Лушпенко // Пробл. машиностроения. – 2011. – Т. 14, № 2. – С. 46–51.
8. К созданию спирально-винтового трубчатого солнечного коллектора / Ю. М. Мацевитый, А. И. Ценципер, Н. А. Сафонов, С. Ф. Лушпенко // Пробл. машиностроения. – 2011. – Т. 14, № 5. – С. 35–40.

Поступила в редакцию 20.05.15