

УДК 620.91

**П.Ф. Янчилин**

*(УО «Брестский государственный  
технический университет»,  
г. Брест, Республика Беларусь)*

## **ГЕЛИОУСТАНОВКА «ЛУЧ» ДЛЯ МАЛЫХ И СРЕДНИХ ТЕПЛОПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

### **Введение**

Солнечная энергетика – использование солнечного излучения для получения энергии в каком-либо виде. Солнечная энергетика использует возобновляющийся источник энергии и является экологически чистой, то есть не производящей вредных отходов. Сегодня солнечная энергетика широко применяется в случаях, когда малодоступность других источников энергии в совокупности с избытком солнечного излучения оправдывает ее экономически.

На сегодняшний день существует множество различных конструкций для улавливания энергии Солнца. Они являются дорогостоящими и сложными сооружениями, что препятствует их повсеместному использованию. Возрастающие потребности в энергии – электричестве и теплоте – заставляют, несмотря на многолетние и масштабные исследования, разработки, применения, искать дальнейшие пути развития гелиоустановок. Для укрепления позиций гелиоэнергетики в ряду других энергопроизводителей необходимо:

- снижать капитальные затраты на изготовление, монтаж, эксплуатацию солнечных установок (СУ);
- повышать энергетическую эффективность СУ (отношение поданной потребителю энергии к первоначальному солнечному потоку);
- решать вопрос аккумуляции энергии непостоянного восприятия солнечной энергии;
- предложить новые применения СУ для других технологий, кроме тепловой и электрической энергии.

Эти задачи следует решать как через изучение энергетических процессов, так и созданием новых принципиальных схем и конструкций СУ [1].

### **Использование солнечной энергии**

Солнце – центральное тело Солнечной системы, раскаленный плазменный шар, типичная звезда-карлик. Температура фотосферы 5770 К. Хромосфера и корона излучают в межпланетное пространство лучистую энергию и солнечный ветер. Планета Земля, находящаяся на расстоянии  $149 \cdot 10^6$  км от нее, получает  $2 \cdot 10^{17}$  Вт лучистой энергии. Суммарный поток солнечного излучения, проходящий через единичную площадку, перпендикулярную направлению солнечных лучей и находящуюся на расстоянии 1 астрономической единицы от Солнца, составляет  $1373 \pm 20$  Вт/м<sup>2</sup> [2]. Однако до поверхности Земли доходит существенно меньшая

доля этой энергии, что зависит от широты местности, погодных условий, суточных и сезонных изменений. Применительно к Республике Беларусь В.В. Кузьмич приводит следующие значения для некоторых месяцев года [3], представленные в таблицах 57 и 58.

*Таблица 57 – Действительные и возможные (при ясном небе) среднемесячные суммы солнечной радиации на горизонтальную поверхность в Минске, кВт·ч/м<sup>2</sup>*

Месяц	Прямая		Рассеянная		Суммарная	
	действительные суммы радиации	возможные суммы радиации	действительные суммы радиации	возможные суммы радиации	действительные суммы радиации	возможные суммы радиации
2	11,6	52,3	26,7	19,8	38,3	72,1
3	39,5	107,0	46,5	31,4	86,0	138,4
4	52,34	144,2	60,5	36,0	112,8	180,2
5	83,7	190,7	76,8	46,5	160,5	237,2
6	95,4	205,9	81,4	44,2	176,8	250,1
7	88,4	203,5	80,2	44,2	168,6	247,7
8	62,8	155,8	65,1	39,5	127,9	195,3
9	41,9	111,6	45,4	26,7	87,3	138,3
10	16,3	69,8	29,1	19,8	45,4	89,6

*Таблица 58 – Число солнечных дней*

Месяц	Полоцк	Гродно	Минск	Горки	Пинск	Василевичи
1	10	11	13	15	14	14
2	17	14	14	15	15	15
3	23	23	23	21	24	22
4	27	26	26	27	27	26
5	30	29	29	29	29	29
6	29	28	29	29	29	29
7	30	30	30	31	31	30
8	29	29	30	30	29	29
9	27	27	27	28	28	27
10	20	21	21	24	23	22
11	12	9	11	13	11	14
12	9	10	8	9	11	10
Год	258	257	261	263	271	266

Существует условная классификация «солнечных технологий» [4]:

1) активные – вместе с преобразователями солнечной энергии действуют и вспомогательные механизмы (электродвигатели, насосы и т.п.). Солнечная энергия используется для нагрева воды, освещения, вентиляции;

2) пассивные – отличаются от активных отсутствием в контурах систем каких-либо механизмов, движущих частей. Особенностью по-

строения пассивных солнечных структур для организации систем вентиляции, отопления являются подбор соответствующих по физическим параметрам строительных материалов, специфическая планировка помещения, размещение окон;

3) «прямые» или непосредственные – системы, преобразовывающие солнечную энергию в ходе одного уровня, этапа или цикла;

4) «непрямые» – системы, процесс функционирования которых включает в себя многоуровневые преобразования и трансформации для получения требуемой формы энергии.

Исходя из представленной классификации групп технологий солнечной энергетики, можно выделить наиболее подходящие для применения в сферах деятельности человека:

- использование солнечной энергии для производства электроэнергии с помощью фотоэлектрических установок;
- использование солнечной энергии для горячего водоснабжения и отопления с помощью солнечных нагревательных установок;
- использование солнечной энергии для естественного освещения с помощью светоприемников и световодов (применение пассивной технологии).

Солнечные нагревательные установки по принципу улавливания солнечной энергии делятся на два типа:

- гелиоколлекторы – легкие, компактные конструкции, собираемые по модульному принципу. Основой является пленочно-трубчатый адсорбирующий коллектор. В зависимости от конкретных условий можно получить установку любой производительности;

- гелиоконцентраторы – установки, фокусирующие параллельные солнечные лучи с помощью линзы в одной точке для выработки электричества или тепла. По причине дороговизны и сложности изготовления огромных линз используют массивы вогнутых зеркал (классические зеркальные панели или листы полированного алюминия).

Солнечные установки со следящими гелиоконцентраторами энергетически намного более эффективны, чем плоские неподвижные гелиоколлекторы. Согласно результатам [3] получено, что при ориентации по азимуту, т.е. когда поверхности оптимально ориентированы по двум углам (углу наклона к горизонту и азимутальному углу), среднедневной приход прямой солнечной радиации на тепловоспринимающую поверхность увеличивается на 28–30 % по сравнению с приходом на горизонтальную поверхность и на 18–20 % – по сравнению с тепловоспринимающей поверхностью южной ориентации.

В научно-исследовательской лаборатории «Пульсар» Брестского государственного технического университета под руководством профессора, доктора технических наук В.С. Северянина, автора многих разработок в области гелиотехники, к настоящему времени разработаны на

уровне изобретений различные конструкции солнечных установок, рассмотрены перспективные пути их применения.

Для решения задач, поставленных в начале данной статьи, разработана и совершенствуется гелиоустановка «Луч». Она предназначена для использования (в качестве дублера к основным «традиционным» системам) в системах отопления и горячего водоснабжения небольших по мощности потребителей (частные дома, агрогородки, теплицы, помещения цехов, складов, столовые, бани, различные объекты сельского хозяйства). Аналогично гелиоустановка используется и для нужд холодноснабжения тех же потребителей при ее соответствующей комплектации. Возможно также применение данной установки для систем освещения (теплоприемник выполняется из прозрачного материала).

Особенности этой установки – гелиоконцентратор в виде группы концентрических конусов, имеющих общий фокус на теплоприемнике, и ориентирование на Солнце специальным механизмом слежения [5]. Принципиальная схема гелиоустановки показана на рисунке 156.

Гелиоустановка состоит из четырех основных частей:

1) оптическая система – гелиоконцентратор, состоящий из комплекса конусов-зеркал, закрепленных на специальном каркасе на строго рассчитанном расстоянии друг от друга таким образом, чтобы их проекции на Солнце, не перекрывая друг друга, полностью, без пропуска, заполняли солнечный поток. При этом образуется продуваемая прочная пространственная конструкция;

2) система слежения за Солнцем – механизм поворота, суточный и сезонный механизмы подъема оптической системы, электрический привод (электромагнит), осуществляющий движение всей системы слежения, с автоматическим электронным блоком управления;

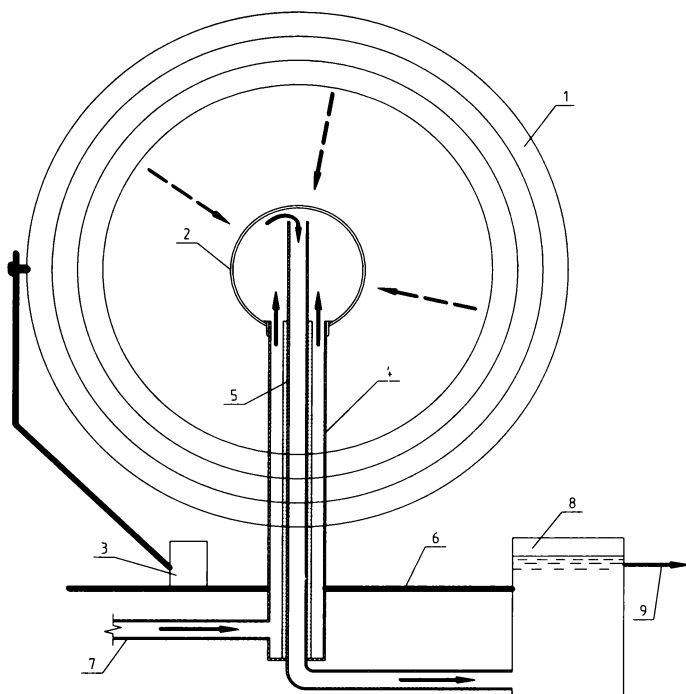
3) теплоприемник – сферический солнечный водонагреватель (полая сфера, установленная наверху колонны), система трубопроводов, бак-аккумулятор, запорно-регулирующая арматура;

4) основание – металлическая плита, швеллеры, подшипники. На нем монтируются все составляющие элементы гелиоустановки.

В гелиоустановке «Луч» основными и существенными отличиями от известных солнечных установок являются:

- неподвижность теплоприемника. При работе оптическая система движется вокруг него, что резко упрощает систему подачи и отвода теплоносителя;

- движение оптической системы учитывает не только суточное, но и сезонное изменение положения Солнца. Этот принцип реализуется при помощи простых механических элементов – копиров;



1 – гелиоконцентратор; 2 – теплоприемник; 3 – механизм поворота; 4 – колонна;  
 5 – выходная труба; 6 – основание; 7 – водопровод; 8 – бак-аккумулятор;  
 9 – выход теплоносителя к потребителю;  
 стрелки: сплошные – вода, пунктирные – солнечное облучение

*Рисунок 156 – Схема гелиоустановки «ЛУЧ»*

- зеркальная часть гелиоконцентратора представляет собой группу узких, отделенных друг от друга концентрических конусов в виде параболоида вращения, благодаря которым снижается ветровая нагрузка (поток воздуха свободно проходит сквозь щели между конусами) и упрощается изготовление и сборка зеркал, т.к. поверхности конусов имеют I степень кривизны; аналогичные же параболоидные поверхности существенно сложнее;

- в данной установке используются относительно дешевые материалы и изделия (хромированный алюминий – строительный материал – для изготовления оптических зеркальных конусов; основные узлы конструкции установки изготавливаются из обычной малоуглеродистой стали).

#### **Система концентрации**

При проектировании системы концентрации необходимо конусы дистанционировать друг относительно друга радиусами, при этом обра-

зуется продуваемая прочная пространственная конструкция. Радиусы – это плоские элементы с креплениями для конусов. Радиусы закреплены на кольцах, которые крепятся к стойкам [6].

В фокусе конусов расположен приемник лучистой энергии – это полая сфера, установленная наверху трубчатой колонны. Оптическая система гелиоустановки «Луч» состоит из трех основных элементов: радиусов, конусов, крепежных колец.

Радиусы имеют специально вырезанные формы, рассчитанные для крепления конусов под требуемым заданным углом, что является необходимым условием для наилучшего приема потока солнечных лучей.

Важно отметить, что конусы должны располагаться таким образом, чтобы угол падения солнечного луча был равен углу отражения, и в то же время чтобы конусы не перекрывали друг друга. Солнечные лучи, попадая на поверхность конуса, отражаются и фокусируются в виде прямой фокусной линии. Таким образом, солнечные лучи, попадая на каждый из конусов и отражаясь, фокусируются в виде размытого фокусного пятна на теплоприемнике.

На рисунке 157 схематично изображены сечения «верхних» и «нижних» конусов, схема падения и отражения солнечных лучей.

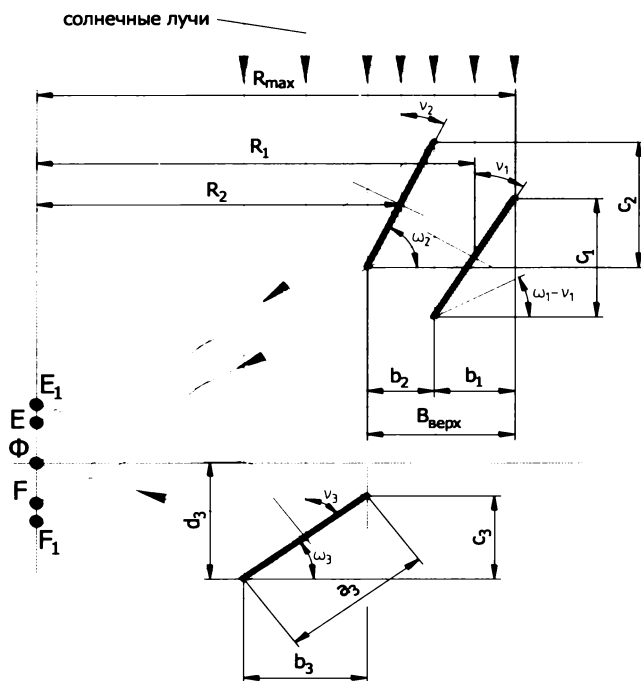


Рисунок 157 – Сечения «верхних» и «нижних» конусов

Из рисунка 157 видно, что фокусная линия  $d_3$  ( $E_1F_1$ ) от «нижнего» конуса несколько больше, чем фокусные линии ( $EF$ ) от «верхних» конусов. Обусловлено это тем, что мы принимаем ширину образующей конуса  $a$  равной для всех конусов, а фокусная линия зависит от величины  $a$  и косинуса угла падения солнечного луча на конус  $v$ . С изменением угла  $v$  меняется и  $\cos v$  – следовательно, фокусная линия для каждого конуса имеет свой размер. Соответственно, буквами  $b$ ,  $c$  обозначены проекции образующих конусов на горизонтальную и вертикальную плоскости, а углы наклона конусов относительно горизонта –  $\omega$ .

Формула для определения фокусной линии «верхних» и «нижних» конусов одинакова и имеет вид

$$d_i = \frac{a_i}{2 \cdot \cos v_i}. \quad (1)$$

По завершении расчета оптической системы мы получаем множество фокусных линий, меняющихся в диапазоне от  $EF$  до  $E_1F_1$ . Центры всех этих линий лежат в точке  $\Phi$ . В этой же точке должен располагаться теплоприемник, желателно сферической формы. Его размеры будут обуславливаться размерами полученных фокусных линий.

При помощи «верхних» конусов мы собираем площадь солнечного потока  $S_{с.л.}^*$ , образованную максимальным радиусом конуса  $R_{max}$  (площадь кругового кольца), равную

$$S_{с.л.}^* = \pi \cdot B_{сверх} \cdot (2R_{max} - B_{сверх}). \quad (2)$$

Осталось собрать площадь солнечного потока, заключенную внутри нашего кругового кольца. Так как «сверху» располагать далее конусы нецелесообразно, то остается вариант «нижнего» или «заднего» сбора солнечного потока относительно плоскости, перпендикулярной оси  $O\Phi$ . В итоге при помощи «нижних» конусов получим площадь  $S_{с.л.}''$ :

$$S_{с.л.}'' = S_{с.л.} - S_{с.л.}^* \quad (3)$$

Дальнейшее конструирование оптической системы осуществляется по схеме «к фокусу и вниз» при соблюдении условия: угол образующей конуса к его оси выбирается так, чтобы солнечный луч после отражения был направлен в фокус.

Используя выражения и зависимости, приведенные в [6], была рассчитана оптическая система гелиоконцентратора диаметром 2,4 м опытного образца гелиоустановки. Результаты приведены в таблице 59.

### Теплоприемник

Для теплоприемника важны следующие факторы: качество и оптические свойства поверхности, направленной на лучи; форма и размер поверхности, габариты; компоновка с другими элементами; подвод и отвод теплоносителя.

Таблица 59 – Геометрические размеры конусов гелиоконцентратора

№ конуса	Диаметр больший, $D_б$	Диаметр меньший, $D_м$	Ширина, $a$	Радиус развертки, $R_p$	Дуга развертки, $L$	Угол развертки, $\alpha$	$\beta = 360 - \alpha$
<b>«Верхние» конусы</b>							
1	2408	2204	150	1771	7565	115,3	244,7
2	2204	2012	150	1722	6924	129,6	230,4
3	2012	1836	150	1715	6321	148,8	211,2
4	1836	1672	150	1679	5768	163,2	196,8
5	1672	1528	150	1742	5253	187,2	172,8
6	1528	1384	150	1592	4800	187,2	172,8
7	1384	1252	150	1573	4348	201,6	158,4
<b>«Нижние» конусы</b>							
8	1260	1028	150	815	3958	81,7	278,3
9	1028	780	150	622	3230	62,5	297,5
10	792	516	150	430	2488	28,5	331,5
11	516	220	150	262	1621	5,5	354,5
12	220	0	110	110	691	0	360,0

Внешняя поверхность теплоприемника должна обладать следующими оптическими свойствами: максимально поглотить попавшее на нее солнечное излучение и минимально отразить его обратно в атмосферу. Для этого применяют специальное селективное покрытие для лучепоглощающей поверхности теплоприемника. Оно обладает высоким коэффициентом поглощения  $\alpha_c$  коротковолнового солнечного излучения (короче 2 мкм), низкой излучательной способностью  $\varepsilon_r$  в инфракрасной области (длиннее 2 мкм), стабильной величиной степени селективности  $\alpha_c/\varepsilon_r$ , способностью выдерживать кратковременный перегрев и хорошей коррозионной стойкостью. Для идеальной селективнопоглощающей поверхности  $\alpha_c = 1$  и  $\varepsilon_r = 0$  [7].

Поверхность «Н» теплоприемника (с гелиоконцентратором) по тепловой работе обусловлена степенью концентрации солнечного потока « $k$ » (отношение поперечного сечения солнечного потока « $F$ » ( $S_{c.n.}$  – площадь кругового кольца) к величине поверхности теплоприемника) [1].

При данном солнечном потоке  $F$  для определенной тепловой мощности  $Q$  справедливы соотношения:

$$k = \frac{F}{H}, Q = H \cdot q \Rightarrow q = \frac{Q \cdot k}{F}, \quad (4)$$

где  $q$  – удельный тепловой поток, падающий от гелиоконцентратора на теплоприемник (пропорционален степени концентрации  $k$ ).

Лучистый теплообмен между телами (Солнце и теплоприемник):

$$q_0 = \varepsilon_n C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт/м}^2, \quad (5)$$

где  $q_0$  – удельный тепловой поток,  $\text{Вт/м}^2$ , от Солнца (см. выше):



$$q = q_0 \cdot k, \text{ Bm/m}^2; \quad (6)$$

$T_1$  и  $T_2$  – температуры Солнца и теплоприемника соответственно;  
 $C_0$  – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела;  
 $\varepsilon_n$  – приведенная степень черноты системы:

$$\varepsilon_n = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}, \quad (7)$$

(здесь  $\varepsilon_1 = 1$ , а  $\varepsilon_2$  зависит от оптических свойств поверхности теплоприемника).

Воспринятая тепловая мощность  $Q$  утилизируется в теплоприемнике (нагрев теплоносителя, конструкции и т.п. –  $Q_H$ ) и частично теряется в окружающую среду через обратное излучение  $Q_{II}$  (уже в инфракрасной части спектра) и конвекцию  $Q_K$ , для стационарного режима верно условие:

$$Q = Q_H + Q_{II} + Q_K, \text{ Bm}; \quad (8)$$

$$Q_H = \Delta i \cdot G, \text{ Bm}, \quad (9)$$

где  $\Delta i$  – приращение энтальпии теплоносителя;

$G$  – расход теплоносителя.

$$Q_{II} = \varepsilon_2 C_0 \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \cdot H, \text{ Bm}; \quad (10)$$

$$Q_K = \alpha_K (T_2 - T_3) \cdot H, \text{ Bm}, \quad (11)$$

где  $\alpha_K$  – коэффициент конвективной теплоотдачи,  $\text{Bm/m}^2 \cdot \text{C}^\circ$ ;

$T_3$  – температура окружающей среды,  $\text{C}^\circ$ .

Исходя из равенства теплового потока, поступающего на теплоприемник, и теплового потока, принятого поверхностью теплоприемника, составим систему уравнений из (4–11):

$$\begin{cases} Q = Q_H + Q_{II} + Q_K, \text{ Bm}; \\ Q = F \cdot q_0, \text{ Bm}; \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Q = \Delta i \cdot G + \varepsilon_2 C_0 \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \cdot H + \alpha_K (T_2 - T_3) \cdot H, \text{ Bm}; \\ Q = F \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1} C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \text{ Bm}. \end{cases}$$

С помощью данной системы можно найти важные параметры для проектирования данной установки «Луч», такие как температура поверхности теплоприемника  $T_2$ , т.е. температура в фокусе концентратора, и оптимальный размер теплоприемника по его найденной поверхности  $H$ .

### Заключение

Предложенные лабораторией «Пульсар» разработки гелиоустройств дают примеры снижения капитальных и текущих затрат в солнечной энергетике, повышения эффективности действия солнечных установок, возможности сохранения и утилизации теплоты.

Разработан и совершенствуется опытный образец гелиоустановки «Луч», основными особенностями которой являются расщепление параболоида вращения на отдельные конусы и состоящий из них гелиоконцентратор (в виде группы концентрических конусов, имеющих общий фокус на теплоприемнике), ориентирование на Солнце механизмом слежения.

Дана качественная оценка энергетических процессов в солнечной установке, позволяющая оценить наиболее важные параметры – температуру, расход теплоносителя, величину поверхности теплоприемника.

«Луч» предназначен для использования (в качестве дублера к основным традиционным системам) в системах отопления и горячего водоснабжения, нужд хладоснабжения небольших по мощности потребителей (частные дома, агрогородки, теплицы, помещения цехов, складов, столовые, бани, различные объекты в сельском хозяйстве). Возможно применение данной установки для систем освещения (теплоприемник выполняется из прозрачного материала).

21.08.12

### Литература

1. Северянин, В.С. Некоторые пути развития гелиотехники / В.С. Северянин, П.Ф. Янчилин // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2012. – № 2: Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. – С. 43–50.
2. Советский энциклопедический словарь. – М., 1986. – 1632 с.
3. Кузьмич, В.В. Расчет гелиоводонагревательных систем и их применение в сельском хозяйстве / В.В. Кузьмич. – Минск: БелНИИСХМ, Препринт, 1997. – 87 с.
4. Северянин, В.С. О перспективах развития солнечной энергетики в Республике Беларусь / В.С. Северянин, П.Ф. Янчилин // Перспективы инновационного развития Республики Беларусь: сб. науч. статей II Междунар. науч. конф., Брест, БрГТУ, 19–21 мая 2011 г. – Брест, 2011. – С. 164–167.
5. Северянин, В.С. Гелиоустановка «Луч» для систем горячего водоснабжения / В.С. Северянин, П.Ф. Янчилин // Энергоэффективные технологии. Образование. Наука. Практика: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., Минск, БНТУ, 20–21 мая 2010 г.: в 3 т. – Минск, 2010. – Т. 3. – С. 27–30.
6. Северянин, В.С. Особенности расчета оптической системы гелиоустановки «Луч» / В.С. Северянин, П.Ф. Янчилин // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2010. – № 2: Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. – С. 74–77.
7. Харченко, Н.В. Индивидуальные солнечные установки / Н.В. Харченко. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.