

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОДУЛЯ
ПОГЛОЩЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ
АВТОНОМНОГО ЭНЕРГО-
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО
ПРОИЗВОДСТВА**

**MATHEMATICAL MODEL OF THE OPTICAL
ENERGY ABSORPTION MODULE OF THE
INTEGRATED SYSTEM OF AUTONOMOUS
POWER HEATING SUPPLY OF
AGRICULTURAL PRODUCTION**

Газалов Владимир Сергеевич
ведущий научный сотрудник отдела
электроэнергетики
*Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение Северо-Кавказский научно-
исследовательский институт механизации и
электрификации сельского хозяйства (ФГБНУ
СКНИИМЭСХ),*

Gazalov Vladimir Sergeevich
senior researcher
*Federal State financed scientific institution North
Caucasus scientific- research institute of
mechanization and electrification of agriculture
(FSBSI NCSRIMEA),*

д-р техн. наук, профессор кафедры энергетики
*Азово-Черноморский инженерный институт
ФГБОУ ВПО ДГАУ в г.Зернограде, Зерноград,
Россия*

Dr.Sci.Tech., professor of the Energy department
*Azov-Black sea engineering Institute FSBEI DSAU in
Zernograd, Zernograd, Russia*

Брагинец Андрей Валерьевич
аспирант, младший научный сотрудник отдела
электроэнергетики
*Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение Северо-Кавказский научно-
исследовательский институт механизации и
электрификации сельского хозяйства (ФГБНУ
СКНИИМЭСХ), Зерноград, Россия*

Braginets Andrey Valeryevich
postgraduate student, junior researcher
*department Federal State financed scientific institution
North Caucasus scientific- research institute of
mechanization and electrification of agriculture
(FSBSI NCSRIMEA), Zernograd, Russia*

Выполнена энергетическая оценка поглощаемых
потоков солнечного излучения с учетом
рассеянного солнечного излучения, проходящего
через стеклопакет, к прямоугольному плоскому
излучателю. При разработке модели принято
допущение, что прямое солнечное излучение
является излучением точечного источника.

In the article we have performed an energy estimation
of absorbed solar fluxes with a glance of diffuse
insolation which passes through double-glazing unit to
the right-angled planar radiator. While designing the
model it was conceded to assume that direct solar
radiation is the radiation of a point source

Ключевые слова: СОЛНЕЧНЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ,
ГЕЛИОВОДОНАГРЕВ, ГЕЛИОРАДИАЦИЯ,
ГЕЛИОТЕХНИКА

Keywords: SOLAR COLLECTORS, HELIO-WATER
HEATING, HELIO-RADIATION, HELIO-
TECHNICS

Количество солнечной радиации, достигающее поверхности Земли, зависит от различных атмосферных явлений и от положения Солнца, как в течение дня, так и в течение года. Облака - основное атмосферное явление, определяющее количество солнечной радиации, достигающей поверхности Земли [1-4].

Поэтому с точки зрения светотехники прямое излучение солнца следует отнести к излучению точечного источника (рисунок 1). Рассеянное излучение, проходящее через стеклопакет к прямоугольному плоскому излучателю. Тогда вектор излучения в любой точке O на плоскости коллектора от поля точечного излучателя, расположенного в точке O' (рисунок 2)

$$\vec{\varepsilon} = \frac{I_{\alpha\beta}}{l^2} \cdot \vec{i}_{\alpha\beta}^0 = \varepsilon_x \cdot \vec{i} + \varepsilon_y \cdot \vec{j} + \varepsilon_z \cdot \vec{k} \quad (1)$$

где $\vec{i}_{\alpha\beta}^0$ – единичный вектор направления излучения;

$I_{\alpha\beta}$ – сила света точечного источника по направлению оси OO'

Ортогональные проекции вектора излучения ε_x , ε_y и ε_z будут раны:

$$\left. \begin{aligned} \vec{\varepsilon}_x &= \frac{I_{\alpha\beta}}{l^2} \cdot \cos \vartheta_x ; \\ \vec{\varepsilon}_y &= \frac{I_{\alpha\beta}}{l^2} \cdot \cos \vartheta_y ; \\ \vec{\varepsilon}_z &= \frac{I_{\alpha\beta}}{l^2} \cdot \cos \vartheta_z \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

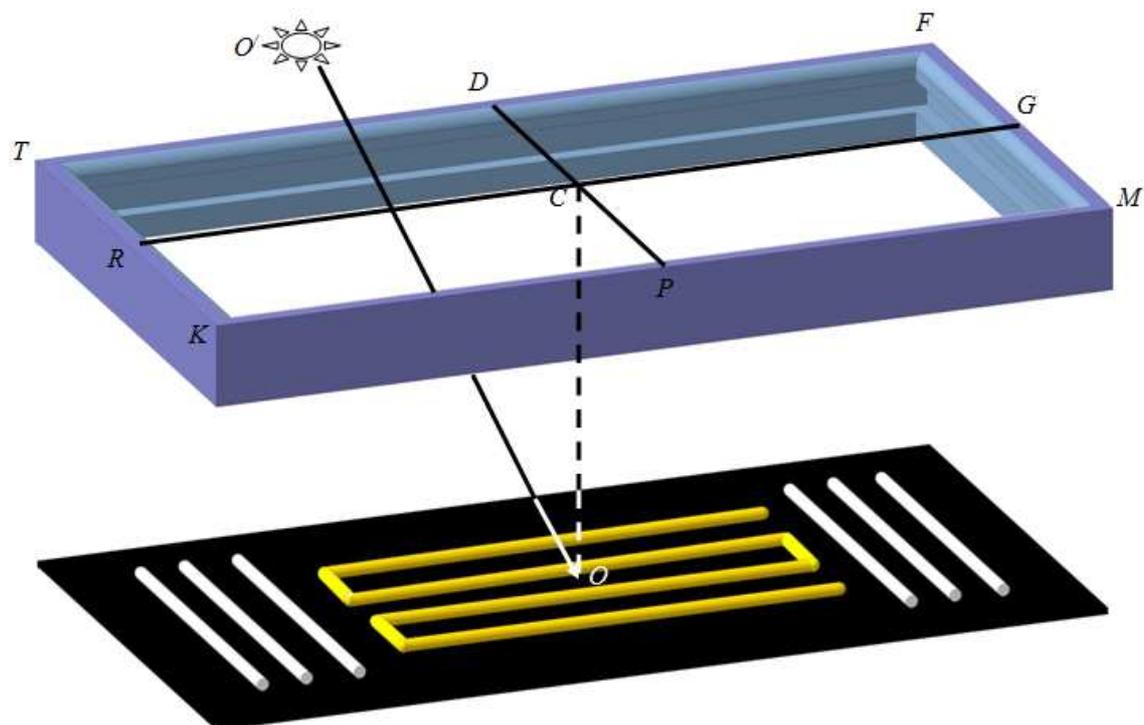


Рисунок 1 – Схема поступления гелиоизлучения на поверхность коллектора

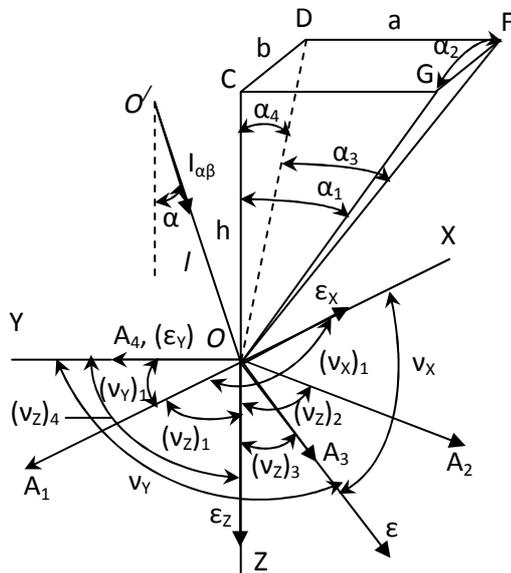


Рисунок 2 – Гелиооблученность поверхности коллектора от точечного т. O' и плоского CDFG прямоугольного излучателей

Отношения значений интегральных характеристик поля прямого излучения солнца равны:

$$\frac{|\vec{\mathcal{E}}|}{E_{4\pi}} = \frac{\frac{I_{\alpha\beta}}{i^2}}{0,25 \cdot \frac{I_{\alpha\beta}}{i^2}} = 4; \quad \frac{|\vec{\mathcal{E}}|}{E_{\Pi}} = \frac{\frac{I_{\alpha\beta}}{i^2}}{\frac{1}{\pi} \cdot \sin \cdot \frac{I_{\alpha\beta}}{i^2}} = \sin \alpha \quad (3)$$

Определим ортогональные проекции вектора излучения поля равнояркого прямоугольного плоского излучателя (от стеклопакета до принимающей поверхности коллектора).

Для упрощения расчета поля излучения равнояркого прямоугольника так расположим исследуемую точку, при котором проекция ее на излучатель совпадает с одной из его вершин (рисунок 1).

Согласно принятому условию расположения исследуемой точки относительно излучателя углы α_i определяются следующими равенствами:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 = \operatorname{arctg} \frac{\alpha}{h}; \quad \alpha_2 = \operatorname{arctg} \frac{b}{\sqrt{\alpha^2 + h^2}}; \quad (4) \\ \alpha_3 = \operatorname{arctg} \frac{b}{\sqrt{b^2 + h^2}}; \quad \alpha_4 = \operatorname{arctg} \frac{b}{h}. \end{aligned} \right\}$$

В соответствии с теми же условиями векторы A_i поверхностей всех четырех граней пирамиды располагаются в координатных плоскостях: A_1 – по оси X, A_4 – по оси Y, A_2 – в плоскости YOZ под углом $\pi - \alpha_1$ к оси Y и A_3 – в плоскости YOZ под углом $\pi - \alpha_4$ к оси X.

При этом углы ϑ_i между векторами A_i и осями координат:

$$\left. \begin{aligned} (\vartheta_X)_1 = \pi; \quad (\vartheta_X)_2 = \frac{\pi}{2}; \quad (\vartheta_X)_3 = \pi - \alpha_4; \quad (\vartheta_X)_4 = \frac{\pi}{2}; \\ (\vartheta_Y)_1 = \frac{\pi}{2}; \quad (\vartheta_Y)_2 = \pi - \alpha_1; \quad (\vartheta_Y)_3 = \frac{\pi}{2}; \quad (\vartheta_Y)_4 = 0; \\ (\vartheta_Z)_1 = \frac{\pi}{2}; \quad (\vartheta_Z)_2 = \frac{\pi}{2} - \alpha_1; \quad (\vartheta_Z)_3 = \frac{\pi}{2} - \alpha_4; \quad (\vartheta_Z)_4 = \frac{\pi}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Используя значения углов ϑ_i для исследуемой точки поля и

ортогональные проекции вектора излучения, получаем:

$$\varepsilon_x = \frac{L}{2} \cdot (\alpha_1 - \alpha_2 \cdot \cos \alpha_4); \quad (6)$$

$$\varepsilon_y = \frac{L}{2} \cdot (\alpha_4 - \alpha_2 \cdot \cos \alpha_1); \quad (7)$$

$$\varepsilon_z = \frac{L}{2} \cdot (\alpha_2 \cdot \sin \alpha_1 + \alpha_3 \cdot \sin \alpha_4); \quad (8)$$

где L – яркость прямоугольника CDFG (рисунок 2).

Подставляя в полученные равенства значения углов α_i , имеем окончательно:

$$\varepsilon_x = \frac{L}{2} \cdot \left(\operatorname{arctg} \frac{\alpha}{h} - \frac{h}{\sqrt{b^2 + h^2}} \cdot \operatorname{arctg} \frac{\alpha}{\sqrt{b^2 + h^2}} \right); \quad (9)$$

$$\varepsilon_y = \frac{L}{2} \cdot \left(\operatorname{arctg} \frac{b}{h} - \frac{h}{\sqrt{\alpha^2 + h^2}} \cdot \operatorname{arctg} \frac{b}{\sqrt{\alpha^2 + h^2}} \right); \quad (10)$$

$$\varepsilon_z = \frac{L}{2} \cdot \left(\frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + h^2}} \cdot \operatorname{arctg} \frac{b}{\sqrt{\alpha^2 + h^2}} + \frac{b}{\sqrt{b^2 + h^2}} \cdot \operatorname{arctg} \frac{\alpha}{\sqrt{b^2 + h^2}} \right); \quad (11)$$

Согласно определению вектора излучения для рассмотренного частного случая расположения исследуемой точки проекции вектора излучения на координатные оси численно равны значениям облученности координатных плоскостей в точке O :

$$\varepsilon_x = E_{yoz}; \quad \varepsilon_y = E_{xoz}; \quad \varepsilon_z = E_{xoy}. \quad (12)$$

Эти равенства определяются тем, что при исследуемом расположении точки O координатные плоскости не пересекают прямоугольного излучателя. В тех случаях, когда проекции исследуемой точки поля на плоскость излучателя не совпадают с одной из вершин, необходимо пользоваться теми же расчетными уравнениями, производя расчет по одной из схем, указанных на рисунке 3.

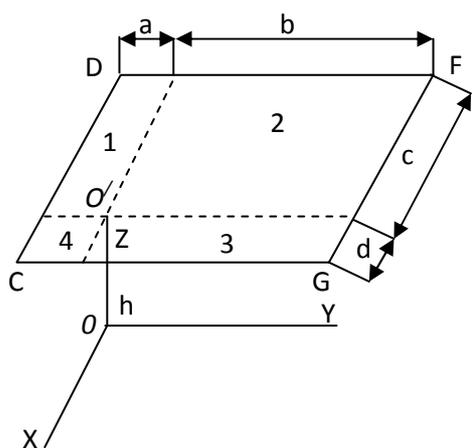


Схема 1

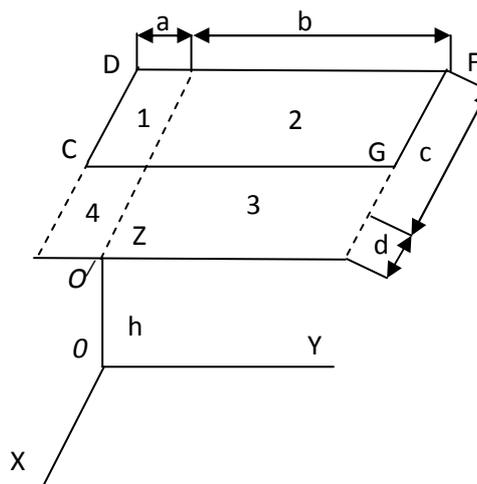


Схема 2

Рисунок 3 – Варианты расчета проекции вектора излучения принимающей поверхности коллектора рассеянным излучением проходящим через стеклопакет

Для случая, когда проекция исследуемой точки на плоскость излучателя попадает внутрь его контура (схема 1), проекция вектора излучения на ось Z определится как:

$$\epsilon_z = (\epsilon_z)_1 + (\epsilon_z)_2 + (\epsilon_z)_3 + (\epsilon_z)_4, \quad (13)$$

где $(\epsilon_z)_{1-4}$ – проекции на ось Z вектора излучения, создаваемого прямоугольниками 1-4.

Для случая, когда проекция исследуемой точки на плоскость излучателя лежит за пределами его контура (схема 2), проекция вектора излучения на ось Z определится как:

$$\epsilon_z = (\epsilon_z)_{1-4} + (\epsilon_z)_{2-3} - (\epsilon_z)_3 - (\epsilon_z)_4, \quad (14)$$

где $(\epsilon_z)_{1-4}, (\epsilon_z)_{2-3}, (\epsilon_z)_3, (\epsilon_z)_4$ – проекции на ось Z вектора излучения, создаваемого прямоугольниками 1-4, 2-3, 3 и 4.

Проекции вектора излучения на оси X и Y при расположении исследуемой точки по схеме 1 определяются разностью значений облученности с двух сторон плоскостей YOZ и XOZ (рисунок 3):

$$\varepsilon_X = (\varepsilon_X)_1 + (\varepsilon_X)_2 - (\varepsilon_X)_3 - (\varepsilon_X)_4, \quad (15)$$

$$\varepsilon_Y = (\varepsilon_Y)_2 + (\varepsilon_Y)_3 - (\varepsilon_Y)_1 - (\varepsilon_Y)_4. \quad (16)$$

При расположении исследуемой точки по схеме 2 расчет проекции вектора излучения на ось Y следует производить по уравнению:

$$\varepsilon_Y = (\varepsilon_Y)_{2-3} - (\varepsilon_Y)_{1-4} - (\varepsilon_Y)_3 + (\varepsilon_Y)_4. \quad (17)$$

Расчет проекции вектора излучения на ось X в это случае проводится аналогично расчету ε_Z , так как излучающая плоскость не пересекается плоскостью YOZ.

Для расчета средней сферической облученности принимающей поверхности коллектора в поле равнояркого излучателя определим телесный угол излучателя.

Общий вид уравнения, определяющего телесный угол, получаем интегрированием выражения элементарного телесного угла по поверхности излучателя:

$$\Omega = \int_{\Omega} d\Omega = \int_A \frac{\cos \theta}{l^2} dA. \quad (18)$$

Значение средней полусферической облученности, создаваемой равноярким прямоугольником, при ориентации основания полусферического приемника параллельно плоскости излучающего прямоугольника определится как:

$$E_{2\pi} = E_{4\pi} + 0,25 \cdot \varepsilon_Z = 0,25 \cdot (L \cdot \Omega + \varepsilon_Z), \quad (19)$$

Значение средней сферической облученности, создаваемой всем прямоугольником, определится интегрированием по его площади:

$$E_{4\pi} = 0,25 \cdot L_0 \cdot \int_A \frac{\cos^n \alpha \cdot \cos \theta}{4l^2} \cdot dA. \quad (20)$$

Значение средней цилиндрической облученности при ориентации приемного цилиндра перпендикулярно плоскости излучающего прямоугольника определится:

$$E_{ц} = \frac{L_0}{\pi} \cdot \int_A \frac{\cos^n \alpha \cdot \cos \theta}{4l^2} \cdot dA. \quad (21)$$

При $n=1$ уравнение (21) определит значение $E_{ц}$, создаваемой в рассматриваемой точке поля излучения равноярким прямоугольником.

Выразив значения $\cos \alpha$ и $\cos \theta$ и l через h , x и y (рисунок 2), получим при $n=1$:

$$E_{ц} = \frac{L \cdot h}{\pi} \cdot \int_{x=0}^{x=b} \int_{y=0}^{y=a} \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{(h^2 + x^2 + y^2)} \cdot dx \cdot dy, \quad (22)$$

где L – яркость равнояркого прямоугольника.

Ортогональные проекции вектора излучения, создаваемые прямоугольником (рисунок 2) с распределением излучения элементарного участка его поверхности $dI_{\alpha\beta} = dI_0 \cdot \cos^n \alpha$, определяются в соответствии с уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_X &= L_0 \cdot \int_A \frac{\cos^n \alpha \cdot \cos \theta_X}{l^2} \cdot dA, \\ \varepsilon_Y &= L_0 \cdot \int_A \frac{\cos^n \alpha \cdot \cos \theta_Y}{l^2} \cdot dA, \\ \varepsilon_Z &= L_0 \cdot \int_A \frac{\cos^n \alpha \cdot \cos \theta_Z}{l^2} \cdot dA. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Модуль вектора излучения на внешней стороне стеклопакета, создаваемого атмосферой, как равнояркой бесконечно большой плоскостью, или равнояркой полусферой, например в центре ее основания, определится:

$$|\vec{E}| = E_{\text{макс}} = L \cdot \int_{2\pi} \cos \alpha \cdot d\Omega_A = 2\pi L \cdot \int_0^{\pi/2} \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha = \pi \cdot L, \quad (24)$$

где α – угол между направлением $d\vec{E}$ от элементарного участка поверхности излучателя и направлением вектора излучения \vec{E} в исследуемой точке поля излучения.

Направление вектора излучения, создаваемого бесконечно большой равнояркой плоскостью или равнояркой полусферой в центре ее основания, ориентировано перпендикулярно излучающей плоскости основания излучающей полусферы.

Отношения значений интегральных характеристик поля излучения в этом случае будут равны:

$$\frac{|\vec{E}|}{E_{4\pi}} = \frac{\pi L}{0,5\pi L} = 2, \quad \frac{|\vec{E}|}{E_{\text{ц}}} = \frac{\pi L}{0,5\pi L} = 2. \quad (25)$$

На основании выполненных теоретических выкладок следуют выводы, что средняя сферическая облученность принимающей поверхности коллектора является функцией точки поля с заданным распределением яркости в облучаемом пространстве; средние полусферическая и цилиндрическая облученности, а так же облученность плоскости принимающей поверхности коллектора являются функциями не только точки, но и направления (нормаль к основанию сферы, ось цилиндра или нормаль к его оси и нормаль к освещаемой плоскости); соотношение значений горизонтальной, средней сферической, средней полусферической и средней цилиндрической облученностей принимающей поверхности коллектора определяются не только формой приемников, но и функцией распределения яркости в пространстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Газалов В.С. Всесезонный электрогелиоводоподогреватель для сельскохозяйственных потребителей/ В.С. Газалов, Е.Ю. Абеленцев// Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2011. – №8. – С.28-29
2. Газалов В.С. Параметры и режимы работы солнечного коллектора всесезонного электрогелиоводоподогрева для сельскохозяйственных потребителей/ В.С. Газалов, А.В. Брагинец// Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: материалы 6-й Междунар. науч.-практ. конференции в рамках 16-й Междунар. агропромышленной выставки «Интерагромаш-2013» (г. Ростов-на-Дону, ВЦ «ВертолЭкспо», 26 февраля – 1 марта 2013 г.). – Ростов н/Д: Донской ГТУ, 2013. – С.441-444.
3. Газалов В.С. Энергосберегающий всесезонный электрогелиоводонагреватель для сельскохозяйственных потребителей/ В.С. Газалов, Е.Ю. Абеленцев, А.В. Брагинец // Инновационные пути развития агропромышленного комплекса: задачи и перспективы: донская агропромышленная науч.-практ. конф. посвященная 75-летию Ростовской области (24-26 октября 2012г., г. Зерноград Ростовская обл., ФГБОУ ВПО АЧГАА). – Зерноград, 2012. – С.143-147.
4. Стребков, Д.С. Использование солнечной энергии в АПК / Д.С. Стребков // Техника и оборудование для села. – 2011. – №1. – С. 12–15.

REFERENCES

1. Gazalov V.S. Vsesезonnyj jelektrogeliovodopodogrevatel' dlja sel'skohozjajstvennyh potrebitelej/ V.S. Gazalov, E.Ju. Abelencev// Mehanizacija i jelektifikacija sel'skogo hozjajstva. – 2011. – №8. – S.28-29
2. Gazalov V.S. Parametry i rezhimy raboty solnechnogo kollektora vsesezonного jelektrogeliovodopodogreva dlja sel'skohozjajstvennyh potrebitelej/ V.S. Gazalov, A.V. Braginec// Sostojanie i perspektivy razvitija sel'skohozjajstvenного mashinostroenija: materialy 6-j Mezhdunar. nauch.-prakt. konferencii v ramkah 16-j Mezhdunar. agropromyshlennoj vystavki «Interagromash-2013» (g. Rostov-na-Donu, VC «VertolJekspo», 26 fevralja – 1 marta 2013 g.). – Rostov n/D: Donskoj GTU, 2013. – S.441-444.
3. Gazalov V.S. Jenergoberegajushhij vsesezonnyj jelektrogeliovodonagrevatel' dlja sel'skohozjajstvennyh potrebitelej/ V.S. Gazalov, E.Ju. Abelencev, A.V. Braginec // Innovacionnye puti razvitija agropromyshlennого kompleksa: zadachi i perspektivy: donskaja agropromyshlennaja nauch.-prakt. konf. posvjashhennaja 75-letiju Rostovskoj oblasti (24-26 oktjabrja 2012g., g. Zernograd Rostovskaja obl., FGBOU VPO AChGAA). – Zernograd, 2012. – S.143-147.
4. Strebkov, D.S. Ispol'zovanie solnechnoj jenerгии v APK / D.S. Strebkov // Tehnika i oborudovanie dlja sela. – 2011. – №1. – S. 12–15.