

ОПТИМИЗАЦИЯ УГЛА НАКЛОНА ПРИЕМНОЙ ПЛОЩАДКИ И ТЕПЛОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ Г. КРАСНОЯРСКА

А.В. Бастрон, М.Р. Муратов

Приведены результаты моделирования прихода солнечной радиации на произвольно ориентированную приемную площадку, представлен расчет теплопроизводительности солнечного коллектора при его оптимальном угле наклона для эксплуатации в климатических условиях г. Красноярска.

Ключевые слова: теплоснабжение, солнечная энергетика, солнечная водонагревательная установка, солнечный коллектор, теплопроизводительность, моделирование, Excel, оптимизация.

Снижение энергозатрат на теплоснабжение сельских бытовых потребителей в климатических условиях Сибири в настоящее время, и тем более в ближайшей перспективе, возможно и целесообразно за счет использования солнечной энергии [1, 2].

Главный недостаток солнечного излучения как источника энергии - это неравномерность его поступления на земную поверхность в течение года. Ошибки при проектировании могут привести к простоям солнечных водонагревательных установок (СВУ) при пиках поступления солнечной радиации (СР) в летние месяцы и недостаточной теплопроизводительности зимой. В связи с этим, важным параметром СВУ является угол наклона солнечного коллектора (СК), изменение которого в течение года позволит оптимизировать теплопроизводительность СВУ для конкретного сезонного режима работы, что повысит эффективность использования солнечной энергии [3].

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО УГЛА НАКЛОНА ПРИЕМНИКА СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

Количество солнечной энергии на поверхности Земли зависит от многих факторов, и, в первую очередь, от геометрического расположения приемной площадки (ПП) относительно Солнца. Схема движения Солнца по небосводу (а) и углы, определяющие положение ПП на земной поверхности относительно солнечных лучей (б), приведены на рис. 1.

Для эффективного использования прямой составляющей солнечной радиации необходимо нормальное расположение к ней ПП в любой момент времени, т.е. необходимо непрерывное слежение за Солнцем. В то же

время, для максимального использования диффузной составляющей СР наиболее эффективно горизонтальное постоянное расположение ПП [4].

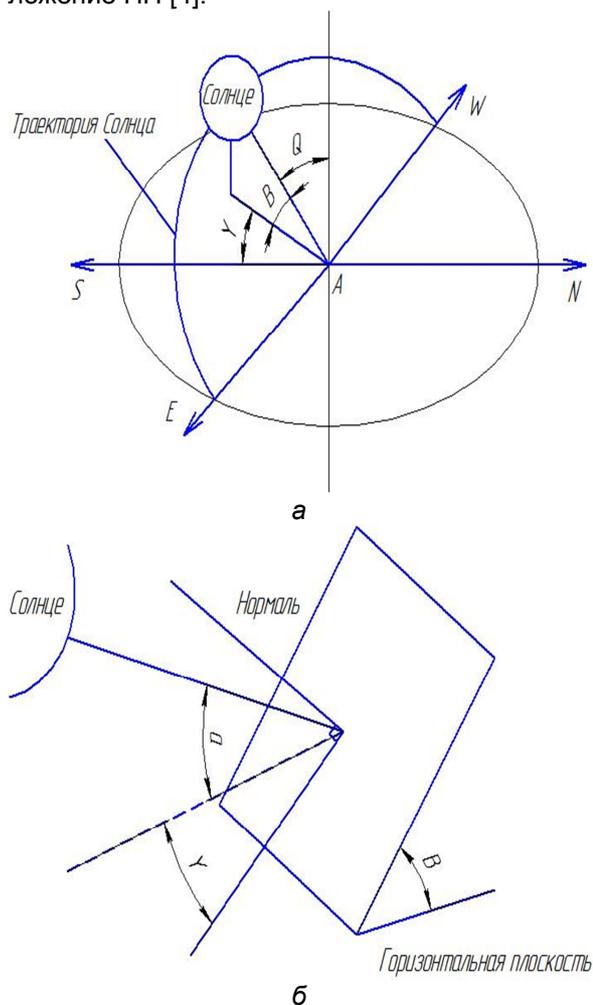


Рисунок 1 - Геометрия Солнца (а) и приемной площадки на Земле (б)

Однако системы слежения являются весьма дорогими для применения на практике. Наиболее распространенным в мировой практике является постоянное в течение всего года (сезона или каждого месяца в отдельности) расположение ПП относительно Солнца [4].

Для территорий Земли, близких к экватору ($-30^\circ \text{ ю. ш.} \leq \varphi \leq 30^\circ \text{ с. ш.}$), основной составляющей СР, как правило, является прямая. В этом случае валовой приход солнечного излучения на произвольно ориентированную ПП будет определяться выражением [4]:

$$\mathcal{E}_{\text{год}}^\beta = \int_0^{T_{\text{год}}} R_{\text{пр}}(t) \cos\theta(t) dt, \quad (1)$$

где $R_{\text{пр}}$ – прямая составляющая солнечной радиации для абсолютно ясного неба;

$\cos\theta$ – косинус угла падения Солнца, град., на произвольно ориентированную ПП.

Для ПП, направленной строго на юг ($\gamma=0$), косинус угла падения Солнца можно определить из выражения [4, 6]:

$$\begin{aligned} \cos\theta &= \sin(\varphi - \beta) \sin\delta + \\ &+ \cos(\varphi - \beta) \cos\delta \cos\omega, \end{aligned} \quad (2)$$

где φ – широта местности;

β – угол наклона ПП, град;

δ – склонение Солнца, град;

ω – часовой угол Солнца, град.

Тогда для оптимальной в течение года ориентации ПП к Солнцу (при условии, что $\gamma=0$) следует реализовать условие [4]:

$$\cos\theta(t) \Rightarrow \max. \quad (3)$$

Решение данной задачи широко известно в научной литературе и соответствует условию, когда постоянный в течение года угол наклона ПП β при $\gamma=0$ равен широте местности [3], т.е.

$$\beta(t) = \varphi = \text{const}. \quad (4)$$

В ряде источников приводится и другой вид записи [4, 5]:

$$\beta(t) = (0,9-1,1) \varphi = \text{const}. \quad (5)$$

Подобные условия расположения ПП справедливы, когда практически всю долю валового прихода $\mathcal{E}_{\text{год}}$ составляет прямая составляющая $\mathcal{E}_{\text{пр}}$ солнечного излучения. В тех же случаях, когда существенную долю $\mathcal{E}_{\text{год}}$ занимает рассеянная радиация, а это наиболее характерный случай для России, в настоящее время предложены несколько эмпирических формул по пересчёту прихода СР с горизонтальной ПП на наклонённую к солнцу [4].

В настоящее время в мировой практике наибольшее распространение получила формула С.А. Клейна, в соответствии с которой можно пересчитать среднесуточный (среднемесячный) приход СР с горизонталь-

ной на наклонённую ПП (при условии, что $\gamma=0 \pm 45^\circ$) [4]

$$\mathcal{E}_{\Sigma}^\beta(t) = \mathcal{E}_{\Sigma}^\gamma(t) \cdot K_{\Sigma}^\beta, \quad (6)$$

где K_{Σ}^β – эмпирический коэффициент С.А. Клейна, зависящий от многих факторов, т.е.:

$$K_{\Sigma}^\beta = K_{\Sigma}^\beta(\text{месяц года}, \varphi, \beta, K_0, \rho, \delta, \omega) = \frac{\mathcal{E}_{\Sigma}^\beta}{\mathcal{E}_{\Sigma}^\gamma} \quad (7)$$

при допущении об изотропности, т.е. равномерном распределении диффузной солнечной радиации по небосводу.

В уравнении (7) коэффициент K_{Σ}^β можно вычислить по формуле [4, 5, 6]:

$$K_{\Sigma}^\beta = (1 - K_D^\gamma) K_{\text{пр}} + K_D^\gamma \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + \rho \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right), \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{где } K_D^\gamma &= \frac{\mathcal{E}_D^\gamma(\Delta t)}{\mathcal{E}_{\Sigma}^\gamma(\Delta t)} = 1,39 - 4,03 \cdot K_0 + 5,53 \cdot K_0^2 + \\ &+ 3,11 \cdot K_0^3; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} K_{\text{пр}} &= \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos\delta \sin\omega_3^\beta + \\ &+ \frac{\pi}{180} \omega_3^\beta \cos(\varphi - \beta) + \\ &+ \frac{\pi}{180} \omega_3^\beta \sin\varphi \sin\delta}, \end{aligned} \quad (10)$$

где ω_3^β и ω_3^β – часовые углы захода (восхода) Солнца на горизонтальной и наклонной ПП соответственно, определяемые по формулам:

$$\omega_3^\beta = \arccos(-\text{tg}\varphi \text{tg}\delta); \quad (11)$$

$$\omega_3^\beta = \min\{\omega_3^\beta; \arccos(-\text{tg}(\varphi - \beta) \text{tg}\delta)\}. \quad (12)$$

В (7) входят также следующие параметры солнечной радиации:

$$K_0(\Delta t) = \frac{\mathcal{E}_{\Sigma}^\gamma(\Delta t)}{\mathcal{E}_{\Sigma}^0(\Delta t)}, \quad (13)$$

где ρ – альbedo отражающей поверхности, на которой находится ПП, определяемая по формуле (14) или представлена в климатических справочниках.

$$\rho = \frac{R_{\text{отп}}}{R_{\text{прих}}}, \quad (14)$$

где $R_{\text{отп}}$ – отражённая от поверхности СР, Вт/м²;

$R_{\text{прих}}$ – приходящая на поверхность СР, Вт/м².

ВОСПРИНИМАЕМЫЕ И ВЫРАБАТЫВАЕМЫЕ СК ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ

Основным элементом СБУ является солнечный коллектор. Для расчета теплопроизводительности плоского СК необходимо определить: располагаемое количество солнечной энергии $\mathcal{E}_{\Sigma}^\beta(t)$, поступающей на его наклонную светопрозрачную поверхность; приведенную поглощательную способность тепловоспринимающей пластины τ_a и эффек-

ОПТИМИЗАЦИЯ УГЛА НАКЛОНА ПРИЕМНОЙ ПЛОЩАДКИ И ТЕПЛОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ Г. КРАСНОЯРСКА

тивный коэффициент теплопотерь коллектора $\eta_{СК}$ [3].

Важной характеристикой СК является его эффективный коэффициент теплопотерь η , который определяется как отношение теплопроизводительности СК к падающему на абсорбер потоку солнечной радиации. Зависимость эффективного коэффициента теплопотерь солнечного коллектора от разности температур нагреваемого в нём теплоносителя и наружного воздуха при расчётных условиях определяется по формуле [3, 7]:

$$\eta_{СК} = \eta_0 - \frac{k_1 \cdot (t_k - t_0)}{\mathcal{E}_{\Sigma}^{\beta}(\Delta t)} - \frac{k_2 \cdot (t_k - t_0)^2}{\mathcal{E}_{\Sigma}^{\beta}(\Delta t)}, \quad (15)$$

где η_0 – коэффициент эффективности или внутренней конверсии коллектора, характеризующий эффективность переноса поглощённого абсорбером солнечного излучения к потоку теплоносителя в трубах, зависящий главным образом от конструкции коллектора;

k_1 – линейный коэффициент теплопередачи;

k_2 – квадратичный коэффициент теплопередачи (η_0 , k_1 , k_2 приводятся производителем в технических данных СК);

t_k – средняя температура теплоносителя в СК (определяется при проектировании гелиоустановки);

t_0 – средняя температура окружающего воздуха в дневные часы расчётного месяца.

Удельный тепловой поток, воспринимаемый абсорбером солнечного коллектора $Q(\Delta t)$, Вт/м², определяется по формуле [3]:

$$Q(\Delta t) = \mathcal{E}_{\Sigma}^{\beta}(\Delta t) \cdot \eta_k \cdot \eta_1 \cdot \eta_2, \quad (16)$$

где η_1 – коэффициент, учитывающий степень прозрачности атмосферы (от 0,8 - в промышленных районах до 1 в курортной зоне, для горных курортов $\eta_1 = 1,1$;

η_2 – коэффициент, учитывающий потери тепла от СК до потребителя, величина этого коэффициента колеблется от 0,85 для крупных централизованных систем до 0,98 для локальных систем, или определяется расчётом в зависимости от теплоизоляции трубопроводов и температуры теплоносителя.

Количество тепловой энергии, кВт·ч/м², выработанное одним квадратным метром солнечного коллектора при реальных условиях облачности, вычисляется отдельно для каждого месяца работы по формуле [3]:

$$Q_{СК}^{mec} = n \cdot Q_{cym} \cdot K_D \cdot \eta_3 \cdot 10^{-3}, \quad (17)$$

где n – количество дней в месяце (учитывается если производился расчёт Q за каждые сутки);

η_3 – коэффициент, учитывающий потери, обусловленные нестационарным теплообменом при переменной облачности рекомендуется принимать = 0,9;

K_D – коэффициент, учитывающий реальные условия облачности, приводится выше.

Годовая удельная выработка тепла $Q_{СК}^{год}$, кВт·ч/м², определяется как суммарное количество тепловой энергии, выработанной в каждом месяце:

$$Q_{СК}^{год} = \sum Q_{СК}^{mec}. \quad (18)$$

РАСЧЕТ ТЕПЛОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СК ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ Г. КРАСНОЯРСКА

Для исследования зависимости приведенной поглотительной способности α абсорбера от угла падения солнечных лучей был взят плоский СК Vitosol 200-F (производитель Viessmann) [7, 8]. При этом проводилось определение оптимального угла наклона солнечного коллектора для двух режимов эксплуатации: круглогодичного использования гелиосистемы и использования в течение отопительного периода (с сентября по май).

Вычисления выполнялись с помощью программы Excel.

Максимальная теплопроизводительность СВУ достигается при оптимальном значении угла наклона СК β , который вычислялся методом итераций данных при помощи надстройки «Поиск решения». Критерием выбора оптимальной величины угла наклона было наименьшее отклонение $\mathcal{E}_{год}^{\beta}$ при выставленном угле наклона от величины $\mathcal{E}_{год}^{\beta_{опт}}$ при оптимальном расположении СК в каждом месяце. Месячные величины валового прихода солнечной энергии $\mathcal{E}_{\Sigma}^{\beta}$, падающей на 1 м² наклонной плоскости поверхности СК и удельного теплового потока Q , воспринимаемого абсорбером коллектора для данных углов наклона СК представлены на рис. 2 и 3.

На рис. 3 приведены ежемесячные графики удельной теплопроизводительности СК в зависимости от угла наклона при реальных условиях облачности. Как видно из графиков, максимальная теплопроизводительность СК Vitosol 200-F при круглогодичном использовании достигается при угле наклона в 45° при реальных условиях облачности в г. Красноярске. В случае, если СВУ будет использоваться только в течение отопительного периода - под углом в 58°.

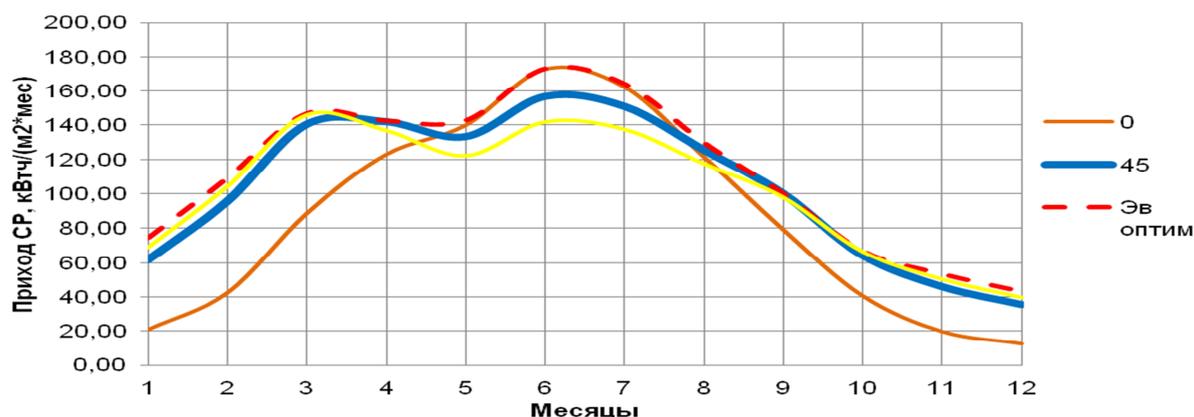


Рисунок 2 – Графики прихода солнечной энергии на 1 м² приемной площадки

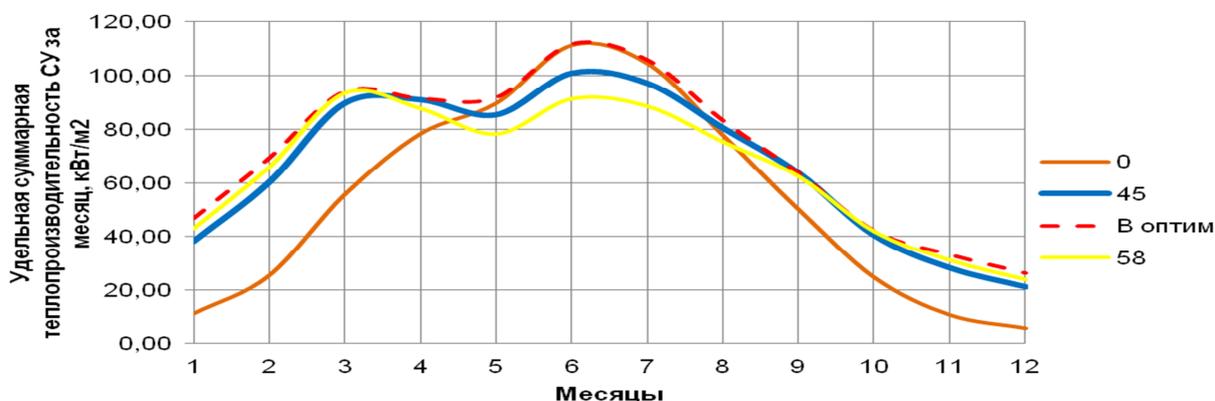


Рисунок 3 – Зависимость удельной теплопроизводительности СК от угла наклона

Значение оптимального угла β наклона СК, определенное традиционно принятым способом для систем круглогодичного действия равно широте местности ϕ (56°). Различие между углом, найденным в результате моделирования и значением угла, равным широте местности можно объяснить тем, что используемая методика позволяет учесть дополнительные условия, при которых работает СВУ, (реальные условия облачности,

изменение оптического КПД от угла падения солнечных лучей на плоскость и др.) Анализируя графики на рис. 4, можно сделать вывод, что установка СК под оптимальным углом в 45° и углом, равным широте местности не даст существенно больших различий между величинами прихода солнечной энергии и удельной теплопроизводительности СК (всего на 1,2 - 1,3%).

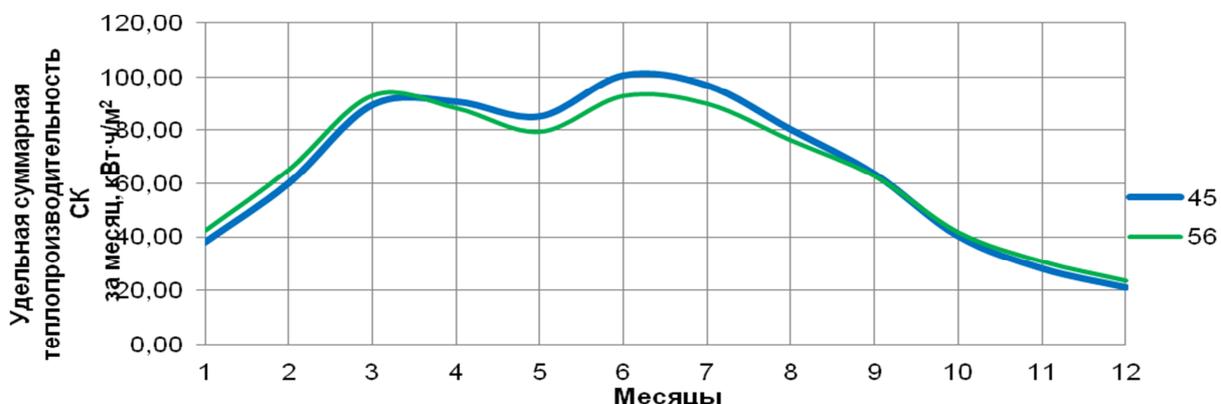


Рисунок 4 – Графики удельной теплопроизводительности СК при углах наклона равных $\beta = 45^\circ$ и $\beta = 56^\circ$

ОПТИМИЗАЦИЯ УГЛА НАКЛОНА ПРИЕМНОЙ ПЛОЩАДКИ И ТЕПЛОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ Г. КРАСНОЯРСКА

Таблица 1 – Определение оптимального угла наклона ПП

Месяц	Эβ, кВт.ч/(м ² .мес)										Эβ опт	β опт
	Угол наклона β											
	0	20	36	40	45	56	58	60	80	90		
1	20,7	41,2	55,3	58,3	61,8	68,2	69,01	74,4	74,8	74,4	74,9	82
2	42,2	69,5	87,7	91,5	95,8	103,3	104,28	109,6	109,6	107,8	109,6	78
3	88,4	116,9	133,9	137,1	140,6	145,7	146,16	145,7	144,3	138,7	147,2	66
4	122,7	138,1	142,7	142,8	142,1	138,2	137,20	122,6	118,3	106,1	142,8	38
5	139,8	143,0	138,7	136,6	133,4	124,3	122,57	101,5	96,1	82,0	143,1	17
6	172,6	172,2	164,5	161,4	156,9	144,7	142,41	115,6	109,0	91,8	173,5	10
7	162,2	163,8	157,6	155,0	151,0	140,1	138,03	113,4	107,2	91,1	164,3	14
8	121,4	129,2	128,7	127,6	125,6	119,2	117,85	100,8	96,3	83,9	129,8	27
9	79,1	93,4	99,2	99,8	100,1	98,7	98,19	89,5	86,8	78,6	100,1	45
10	40,4	53,8	61,6	63,0	64,5	66,5	66,68	65,7	64,8	61,7	66,9	63
11	19,6	33,0	42,1	44,0	46,2	50,0	50,55	53,5	53,6	52,9	53,6	80
12	12,3	23,9	31,9	33,7	35,7	39,4	39,84	43,1	43,3	43,2	43,3	84
Год	1021	1178	1243	1251	1254	1238	1232,79	1135	1104	1012	1349	45
Откл-е	-24,2	-12,6	-7,7	-7,3	-7,1	-8,2	-8,6	-15,8	-18,2	-24,9		

Таким образом, оптимальным углом наклона СК при круглогодичном использовании СВУ на территории г. Красноярск является угол в 45°.

Значения годовой суммарной теплопроизводительности одного квадратного метра СК при этом находятся в пределах от 21 до 101 кВт.ч/м².

Представленная методика расчёта оптимальных углов наклона распространяется на все плоские солнечные коллекторы различных производителей.

В результате расчёта в электронных таблицах Excel были получены следующие оптимальные углы наклона СК в зависимости от режима эксплуатации: при работе СВУ с сентября по май – 580, при работе круглый год – 450.

эксплуатации// АКВА-ТЕРМ, ноябрь-декабрь 2012. – С. 66 - 70.

4. Виссарионов, В.И. Солнечная энергетика: учебное пособие для вузов/ В.И. Виссарионов, Г.М. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин; под ред. В.И. Виссарионова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 276 с.

5. Бекман У. и др. Расчет систем солнечного теплоснабжения Пер.: с англ./ У. Бекман, С. Клейн, Дж. Даффи М.: Энергоиздат, 1982 - 80 с.

6. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки. М.: Энергоатомиздат, 1991. – 206 с.

7. Viessmann. Vitosol. Инструкция по проектированию. 2010 – 148 с. [Электронный ресурс] URL: <http://www.viessmann.ru>.

8. Viessmann. Книга о «Солнце». Руководство по проектированию систем солнечного теплоснабжения. Киев: «Злато-Граф», 2010. – 193 с. или [Электронный ресурс] URL: <http://www.viessmann.ru>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цугленок, Н.В. Рациональное сочетание традиционных и возобновляемых источников энергии в системе электроснабжения сельскохозяйственных потребителей / Н.В. Цугленок, С.К. Шерязов, А.В. Бастрон; Красноярск. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2012. – 360 с.

2. Делягин, В.Н. Оптимизация параметров систем энергообеспечения сельскохозяйственных потребителей (тепловые процессы)/ В.Н. Делягин. – Новосибирск: РАСХН Сиб. отд-ние. СибИМЭ, 2005. – 300 с.

3. Маркин А., Мысливец А. Производительность гелиоколлектора при различных режимах

Бастрон А.В.- ФГБОУ ВПО «Красноярский государственный аграрный университет», заведующий кафедрой «Электроснабжение сельского хозяйства», к.т.н., доцент,

E-mail: abastron@yandex.ru,

тел. (3912)27-10-62

Муратов М.Р. - ФГБОУ ВПО «Красноярский государственный аграрный университет», студент 2 курса магистратуры института энергетики и управления энергетическими ресурсами АПК,

E-mail: abastron@yandex.ru,

тел. (3912)27-10-62