N E W S
OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES
ISSN 1991-346X
Volume 3, Number 307 (2016), 56 – 61

UDC 550.383

A LOW-POWER SOLAR THERMAL POWER STATION WITH THE MAXIMUM USE OF SOLAR ENERGY

D.T. Shigayev[1], T.M. Munsyzbay[2]

[1]«Institute of Ionosphere» JSC «National Center of Space Research and Technology», Almaty;
[2]Kazakh National Research Technical University named after K.I.Satpayev, Almaty,
dashigaev@gmail.com

Keywords: A low-power solar thermal power station, energy usage coefficient, collector, turbine, heat exchanger, electricity.

Abstract. This article is based on the physical and mathematical description of the energy conversion process, the Sun, the study of physical and mathematical model of the power converter and the description on the model low-power solar thermal power stations (PECC) with maximum use of solar energy.

In developed low-power design it allows to use STPS coefficient energy usage (CEU) the sun to 50%. STPS solves the problems associated with the shortage, the high cost of energy and the lack of energy resources in remote parts of the country, and will have no negative impact on the environment that is relevant at the moment.

УДК 550.383

МАЛОМОЩНАЯ СОЛНЕЧНАЯ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ С МАКСИМАЛЬНЫМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ СОЛНЦА

Д.Т. Шигаев[1], Т.М. Мунсызбай[2]

[1]ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ», Алматы;
[2]Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И.Сатпаева, Алматы.

Ключевые слова: солнечная теплоэлектростанция, коэффициент использования энергии, коллектор, турбина, теплообменник, электричество.

Анотация. Данная статья основана на физико-математическом описании процесса преобразования энергии Солнца, исследование физико-математической модели преобразователя энергии и описании на самой модели маломощной солнечной теплоэлектростанций (СТЭС) с максимальным использованием энергии Солнца.

В разрабатываемой конструкции маломощной СТЭС позволит использовать коэффициент использования энергии (КИЭ) Солнца до 50%. СТЭС разрешит проблемы, связанные с дефицитом, высокой стоимостью энергоресурсов и отсутствием энергоресурсов в отдаленных местах страны, а также не окажет негативное воздействие на окружающую среду, что является актуальным на данный момент.

Введение. Маломощная солнечная теплоэлектростанция с максимальным использованием энергии Солнца является коллекторного образца. В настоящее время существуют солнечные электростанции башенного или модульного типа, которые используют оптические концентраторы солнечных лучей для нагрева рабочего тела. В этих установках лучи фокусируется на котлах, в которых полученный пар рабочего тела под давлением передается на турбину, которая вращает электрический генератор.

Принцип действия этих электрических станций основывается на термодинамических циклах, в которых работа совершается за счёт увеличения объема рабочего тела при повышении температуры и давления. Это не даёт максимально использовать полученную от Солнца тепловую энергию, так как, давление и температура являются результатом хаотического движения молекулы

газа. Кроме того, в этих установках конструкция турбины разработанные в соответствии с турбореактивными двигателями, используемых в авиации, создающими реактивную силу, а 10-12% энергии используется для вращения вала турбины.

Предполагается, что в результате выполнения данной работы КИЭ Солнца может увеличиться до 50%. Это достигается благодаря пара, образующегося непосредственно в гелиоколлекторе, проходящей через специальное сопло, организовывающей направленное ламинарное движение молекул пара. Это позволяет достижение высокой скорости молекул пара, обладающих значительной кинетической энергией и попадающих на лопасти турбины, вращающей электрический генератор. Так же планируется выбрать специальный материал, который эффективно поглощающего энергию Солнца.

Существующие проблемы в электроэнергетике связаны с себестоимостью получаемой электроэнергии, конструктивными сложностями, низким коэффициентом использования энергии энергоносителя и коэффициентом полезного действия (КПД) преобразователей энергии, а также проблемы поставки электроэнергии. Так, например, для малонаселённых мест южного региона Республики строительство линий электропередач (ЛЭП) и подстанций (ПС), а также существующих стационарных ветроэнергетических и гелиоэнергетических установок не выгодно из-за потерь электроэнергии в электрических сетях, большого расхода черных и цветных металлов, а также значительных трудозатрат в обслуживании.

Главное преимущество автономной системы электроснабжения - независимость от сетей. Потребитель не зависит от повышения цен на электроэнергию, аварии в сетях, обрывы в линиях электропередач, ухудшение качества электроэнергии из-за перегрузок в сетях. Еще одним плюсом данной системы является то, что автономная генерация стимулирует использовать энергию максимально эффективно. Несоединенные с сетью системы не загрязняют окружающую среду, что в современных условиях является очень важным критерием при проектировании объектов электроэнергетики.

Поэтому для малонаселенных пунктов, занимающих значительную часть территории Республики, желательно использование маломощных СТЭС с повышенной энергоэффективностью, основанной на использовании энергии Солнца.

Настоящая статья посвящена краткому обзору имеющихся в настоящее время предложений по преобразованию солнечной энергии в тепло и электричество и тех физических принципов, на которых эти предложения базируются. Основное внимание уделяется возможности реализовать максимального использования энергии Солнца при создании маломощных тепловых энергоустановок.

Методы. Температура нагрева солнечным излучением T ограничивается двумя процессами – тепловым излучением нагреваемого тела и теплоотдачей в окружающую среду. В условиях равновесия

$$S\alpha P_c = S'(\varepsilon\sigma T^4 + h\Delta T), \qquad (1)$$

где P_c – поток солнечного излучения, α – поглощательная способность, ε – излучательная способность, σ=5,67·10-5 эрг/мс2сек·град, h – коэффициент теплоотдачи, ΔT – разность температуры тела и окружающей среды, S – освещаемая поверхность, S' – полная поверхность тела [1]. Коэффициент теплоотдачи h зависит от размеров тела, состояния атмосферы и может меняться в довольно широких пределах, h≅2·103–3·10-5 эрг/мс2сек·град. В интервале температур T≅400–900°K (ΔT ≅100–600°) при ε~1 и максимальном значении h получим $\varepsilon\sigma T^4 \approx h\Delta T$. Опустим второй член в (1) и оценим предельную температуру нагрева, определяемую потерями на тепловое излучение, положив Pc = 106 эрг/см2сек (10 3 вт/м2), что соответствует потоку на сороковой параллели в середине дня:

$$T \le \left(\frac{P_c}{\sigma}\right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{\alpha}{\varepsilon}\cdot\frac{S}{S'}\right)^{\frac{1}{4}} = 365\left(\frac{\alpha}{\varepsilon}\cdot\frac{S}{S'}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (°K), \qquad (2)$$

Увеличить температуру нагрева можно двумя путями — за счет применения концентраторов солнечного излучения и за счет фактора а/г. Вторая из этих возможностей связана с тем, что в (2) входит отношение поглощательной способности ос и излучательной способности е для разных областей спектра. Основная часть солнечного потока сосредоточена в в видимой и ближней

инфракрасной областях спектра λ~0.35-1.2 *мкм.* Тепловое же излучение при температурах T < 1000 °K расположено в инфракрасной области $\lambda \geq 2$ *мкм*. Поэтому оптимальные условия реализуются в тех случаях, когда нагреваемое тело эффективно поглощает солнечное излучение и вместе с тем обладает высокой прозрачностью или большим коэффициентом отражения в инфракрасной области λ~2–10 *мкм* [2].

Нетрудно найти предельную температуру нагрева, которая может быть получена при максимально благоприятных обстоятельствах. Пусть нагреваемое тело (например, газ) обладает только одной полосой поглощения на частоте ω, расположенной в области максимума солнечного спектра (широким спектром). Тогда тепловое равновесие между телом и солнечным потоком (поглощаемая энергия равна излучаемой) устанавливается при температуре *T*, которая связана с эффективной температурой Солнца T_c соотношением

$$\frac{4\pi}{\exp(\hbar\omega/kT)-1} = \frac{\Delta O_c}{\exp(\hbar\omega/kT_c)-1} \tag{3}$$

где ΔO_c – телесный угловой размер Солнца. Поскольку в максимуме солнечного спектра $\hbar\omega \approx 2{,}82\ kT_c$, имеем $\exp(\hbar\omega/kT) \gg 1$, $\exp(\hbar\omega/kT_c) \gg 1$ и

$$\frac{\hbar\omega}{kT} \approx \frac{\hbar\omega}{kT_c} + \ln\frac{4\pi}{\Delta O_c} \tag{4}$$

Коллекторная установка (рис.1) состоит сама из соединительной трубки (1), силиконового уплотнителя (2), уплотнителя (3) для вакуумной трубки из ударопрочного бромосиликатного стекла (4) концентратора (5) которая закреплена в рамке коллектора (6) и закрыта стеклом селективного покрытия (7) «тепловой и световой ловушки». Нагреваемое тело будет из легкокипящей жидкости с широким спектром солнечной частоты.

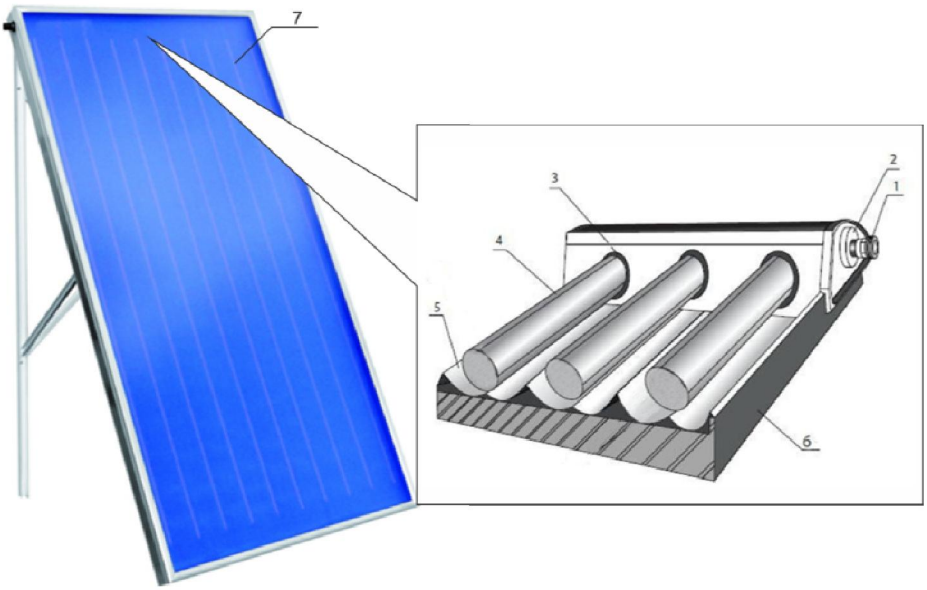

Рисунок 1 – Солнечный коллектор

Рассмотрим для конкретности нагрев цилиндрического объема с радиусом *R*, помещенного в фокус цилиндрического концентратора, перекрывающего пучок солнечного излучения с поперечным размером *D*. В этом случае $S' = \pi S$, а левая часть (1) должна быть домножена на фактор концентрации $\zeta = D/2R$ [3]. В результате получим

$$T \leq \left(\frac{P_c}{\sigma}\right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{\alpha}{\varepsilon}\cdot\frac{\zeta}{\pi}\right)^{\frac{1}{4}} = 365\left(\frac{\alpha}{\varepsilon}\cdot\frac{\zeta}{\pi}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (°K), \tag{5}$$

Пусть концентратор расположен вдоль земной параллели, т. е. в направлении восток – запад, таким образом, что его плоскость симметрии перпендикулярна оси вращения Земли. В этом случае направление на Солнце n_c отклонено от плоскости симметрии концентратора на угол θ, где

$$\sin\theta = \sin\delta\cos\psi = 0.39\cos\psi \tag{6}$$

здесь δ – угол между плоскостью земного экватора и плоскостью земной орбиты, равный 23°, углом if задается годовое движение Земли вокруг Солнца, причем $\psi = \pm \pi/2$ в дни равноденствия. Как видно, в течение года величина sin θ меняется в пределах ±0,39. Соответствующее смещение фокуса концентратора заключено в пределах ±0,39 *f*, где *f* – фокусное расстояние. Для того чтобы в течение всего года весь солнечный поток перекрывался нагреваемым объемом, необходимо потребовать выполнения неравенства $R > 0{,}39\,f$ [4].

Хорошо известен принцип «тепловой ловушки», основанный на так называемом парниковом эффекте. Нагреваемое тело закрывается оболочкой, прозрачной в видимой области спектра и поглощающей в инфракрасной области (стекло или специальные пленки). Такая оболочка пропускает солнечное излучение и вместе с тем частично ослабляет тепловое излучение нагреваемого тела наружу. Можно использовать не один, а несколько защитных слоев. В таких устройствах удается несколько повысить эффективность нагрева, причем как за счет уменьшения потерь на тепловое излучение, так и за счет уменьшения конвективной теплоотдачи.

Другой подход основан на применении селективных покрытий, обеспечивающих эффективное поглощение солнечного излучения и вместе с тем маленькие значения излучательной способности ε в инфракрасной области спектра. Существует несколько различных методов получения нужной селективности [5].

Во-первых, имеется ряд материалов, хорошо поглощающих или пропускающих солнечное излучение и обладающих большим коэффициентом отражения *r* в инфракрасной области. В соответствии с законом Кирхгофа излучательная способность таких материалов мала, $\varepsilon = 1 - r$. Например, карбид гафния HfC в области 4–10 *мкм* имеет коэффициент отражения $r \approx 0{,}8$–$0{,}9$, а в видимой области ≈ 0,25. Отражение в видимой области может быть уменьшено, если на поверхность HfC нанести слой прозрачного диэлектрика. С помощью таких материалов можно получить значения $\alpha/\varepsilon \approx 4$–$5$.

Для повышения селективности можно использовать более сложные многослойные покрытия, например трехслойные – диэлектрик, полупроводник, металл. Поглощение происходит в слое металла. Первые два слоя прозрачны для солнечного излучения. Их назначение – ослабить тепловое излучение за счет большого коэффициента отражения полупроводника в инфракрасной области [6].

Наконец, могут применяться и многослойные интерференционные покрытия, аналогичные тем, что используются для просветления оптики.

При использовании селективных покрытий с малым значением е существенно возрастает относительная роль теплообмена с окружающей средой (второй член в правой части (1)). Предельные температуры нагрева, допускаемые потерями на тепловое излучение, могут быть реализованы только при условии, что тепловые потери меньше потерь на излучение. Тепловые потери можно снизить до необходимого уровня, заключив нагре-ваемое тело в прозрачную вакуумированную оболочку [7,8].

Ожидаемые результаты. Вкупе солнечный коллектор плотно связан с турбиной «Әлемсақ», которая в свое время увеличивает КИЭ пара с легкокипящей жидкости. Увеличение КИЭ пара (газа) осуществляется за счёт того, что пар (газ) поступающий из сопла на турбину, ударяется на рабочие лопатки диска с большим радиусом и приводит ее во вращение. Дальше, отражаясь от рабочих лопаток и направляющих (отражателей), выполненных в виде воронки, переходящей в сопло и вырезанные в теле неподвижной части турбины пар (газ) с меньшей скоростью ударяется по рабочим лопаткам меньшего радиуса. Далее, отражаясь от рабочих лопаток меньшего радиуса и направляющих (отражателей) с меньшим радиусом, выполненных в виде воронки, переходящей в сопло и вырезанные в теле неподвижной части турбины пар (газ) с ещё меньшей скоростью ударяется по рабочим лопаткам ещё меньшего радиуса и выходит из турбины. Благодаря направленному движению пара (газа) на рабочие лопатки, организованными направляющими (отражателями), выполненными в виде воронки, переходящей в сопло и вырезанные в теле неподвижной части турбины использование кинетической энергии пара (газа) достигается максимальной величины [9].

На рисунке 2 показана маломощная солнечная теплоэлектростанция с максимальным использованием энергии Солнца, которая состоит из гелиоколлектора (испаритель) 1 с

легкокипящей жидкостью и турбины «Әлемсақ» 3 соединенные через трубопроводы 2. Вал турбины подключен к генератору 4. Остаток тепла поступает в теплообменник 5.

Маломощная солнечная теплоэлектростанция с максимальным использованием энергии Солнца работает следующим образом.

Солнечные лучи нагревают гелиоколлектор 1 и получают пар легкокипящей жидкости, который через трубопровод 2 попадает в сопло турбины «Әлемсақ» 3, ускоряется и, ударяя по лопастям турбины, приводит его в движение. Полученная механическая энергия передается в генератор 4. Пар, на выходе из сопла и в самой турбине, расширяясь, охлаждается в теплообменние 5. Охлажденный пар, после совершения работы, через трубопровод 2 обратно попадает в гелиоколлектор 1, и цикл повторяется [10].

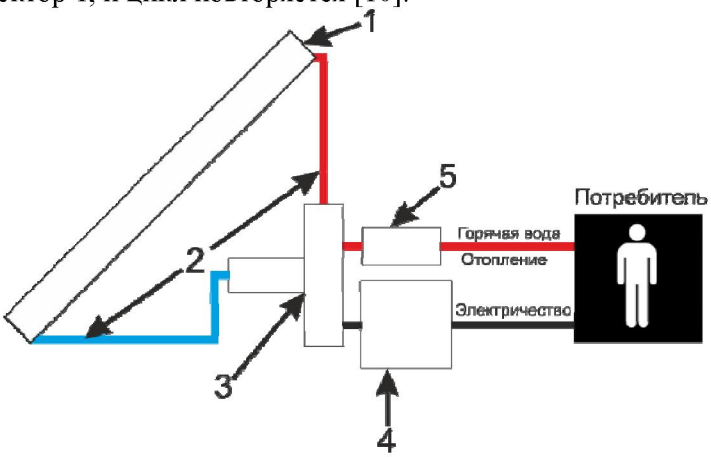

Рисунок 2 – Маломощная солнечная теплоэлектростанция
с максимальным использованием энергии Солнца

Выводы. Поставленная цель использования энергии Солнца достигается за счёт коллекторной установку, которая улавливает широкий спектр излучения Солнца и организации направленного движения молекул рабочего тела на турбине «Әлемсақ».

Так же планируется разработка конструкции СТЭС максимального использования энергии Солнца при возможности непосредственного преобразования в механическую энергию.

Создание лабораторного образца СТЭС, основанной на использовании энергии Солнца, выполняется в следующей последовательности:

- разработка теоретической базы эффективного использования энергии Солнца;
- выбор специального материала, эффективно поглощающего энергию Солнца;
- расширение свойств устройства по преобразованию солнечной энергии в тепловую и механическую энергии;
- разработка конструкции СТЭС, преобразующую энергию Солнца в механическую на базе турбины «Әлемсақ».

Заключение. Математический анализ технологии использования энергии Солнца окажет влияние на развитие методов преобразования энергии из одного вида в другое. Использование данной установки в отдаленных хозяйствах от источников энергии и энергосистем позволит сделать электроэнергию более доступным. Данный работа позволит увеличить КИЭ энергоносителя и КПД конструкции за счет максимального использования энергии Солнца, уменьшить себестоимость полученной электроэнергии и т.д. Результат этой работы даст новое направление в развитии преобразователей энергии энергоносителей и положительный экономический эффект в сфере энергетики. Отсутствие выбросов вредных веществ в атмосферу, значительно улучшит экологию окружающей среды. Кроме того, снизится стоимость товаров народного потребления из-за отсутствия затрат энергоносителей. Ожидаемый социальный и экономический эффект может повыситься до двух и более раз по сравнению с существующим социальным и экономическим эффектом [11,12].

На сегодняшний день практически все страны мира придерживаются пути развития «зеленой» экономики. В Казахстане разработана концепция развития «зеленой» экономики, в реализацию

которой входит оптимизация использования ресурсов и повышение эффективности природоохранной деятельности, создание «зеленой» инфраструктуры, внедрение возобновляемой энергетики на базе высоких технологий. В связи с этим эта работа приобретает большую заинтересованность в сфере «зеленой» экономики и индустриализации в целом [13,14].

ЛИТЕРАТУРА

[13] Васильев А.М., Ландцман А.П., Полупроводниковые фотопреобразователи, М., «Сов. радио», 1971.
[14] Умаров Г.Я., Ершов А.А., Солнечная энергетика, М., «Знание», 1974.
[15] Михеев М.А., Основы теплопередачи, М., Госэнергоиздат, 1956.
[16] F.Kreith, In: Tri-state Fossil Fuels Energy Conference Denver, Colorado, June 1974.
[17] Колтун М. М., Гелиотехника (АН Узб. ССР), №5, 38 (1972).
[18] Фокин В.М. Теплогенерирующие установки систем теплоснабжения, М.: Издательство Машиностроение 1, 2006.
[19] Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки, М.: Энергоатомиздат 1982.
[20] Ахмедов Р.Б. Технология использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, М.: ВИНИТИ, 1987.
[21] Инновационный патент №24005 на изобретение «Турбина Әлемсақ». Приоритет от 08.07.2010г.
[22] Инновационный патент № 28598 на изобретение «Устройство по преобразованию солнечной энергии» от 06.02.2013.
[23] Стребков Д.С. Роль солнечной энергии в энергетике будущего. Гелиотехника, 2005, №1, С. 12-23.
[24] Возобновляемые источники энергии и энергосбережения.: Коллектив авторов. под ред. Н.Искакова. Астана, 2008. 354 с.
[25] Инновационный патент №24005 на изобретение «Турбина Әлемсақ». Приоритет от 08.07.2010г.
[26] Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии: учеб. Пособие, М.: ИП РадиоСофт, 2008, 228 с.

REFERENCES

[13] Vasiliev A.M., Landtsman A.P., Semiconductor photovoltaics, M., "Sov. Radio "1971.
[14] Umarov G.Y., Ershov A.A., Solar Power, M., "Znaniye", 1974.
[15] Mixeev M.A., Fundamentals of heat transfer, M., Gosenergoizdat 1956.
[16] F.Kreith, In: Tri-state Fossil Fuels Energy Conference Denver, Colorado, June 1974.
[17] Koltun M.M., Solar technology (AN Uzb. SSR), №5, 38 (1972).
[18] Fokin V.M. Heat-generating installation of heating systems. M.: Publisher Engineering. 1 2006.
[19] Kharchenko N.V. Individuals solar installations. MM.: Energoatomisdat 1982
[20] Akhmedov R.B. The technology of using alternative and renewable energy sources. M.: VINITI 1987.
[21] Innovative patent №24005 for the invention "Turbine Alemsak". Priority of 08.07.2010g.
[22] Innovative patent number 28598 for the invention "Device for the conversion of solar energy" from 06.02.2013.
[23] Sterbkov D.S. The role of solar energy in future power industry. Heliumtechnic, - 2005, №1, P. 12-23.
[24] The renewable energy resource and energysaving.: Collective authors. under wording N.Iskakova. Astana, 2008, 354 p.
[25] Innovative patent №24005 an innovation «Alemsak Turbine». The priority of the 08.07.2010y.
[26] Bahvalov U.A. Mathematical modeling: study guide for uni– Novocherkassk: URGTU(NPI), 2010, 142p.

КҮН ЭНЕРГИЯСЫН БАРЫНША КӨП ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП АЗ ҚУАТТЫ КҮН ЖЫЛУ ЭЛЕКТР СТАНЦИЯСЫ

Д.Т. Шигаев[1], Т.М. Мунсызбай[2]

[1] ЕЖШС «Ионосфера институты», [1]«Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығы» АҚ, Алматы;
[2]Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы

Түйін сөздер: күн жылу электр станциясы, энергия пайдалану коэффициенті, коллектор, турбина, жылу алмастырғыш, электр көзі.

Аннотация. Бұл мақалада күн энергиясын түрлендіру процесінің физикалық және математикалық сипаттамасы, физикалық және математикалық электр энергиясын түрлендіргіштен моделі мен күн энергиясын барынша пайдаланумен моделі аз қуатты күн жылу электр станциялары (КЖЭС) бойынша сипаттау зерттеу негізделген.

Жобалауда аз қуатты күн жылу электр станциясы күннің 50% энергия пайдалануға мүмкіндік береді. КЖЭС көптеген мәселелерді шешеді, энергетика жоғары құны мен еліміздің шалғай бөліктерінде электір көзін болмауын шешеді, сондай-ақ қазіргі уақытта өзекті болып табылатын қоршаған ортаға ешқандай теріс әсер тигізбейді.

Поступила 17.06.2016 г.