

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА ОСНОВЕ ТОЧНЫХ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

А. Акулинин, В. Смыков
Институт прикладной физики АН Молдовы

Аннотация: На основе полученных точных измерений солнечной радиации в Кишиневе получена оценка количества падающей солнечной энергии, перехватываемая солнечной панелью. Определены оптимальная ориентация солнечных панелей и ожидаемый объем выработки электроэнергии солнечными панелями.

Ключевые слова: солнечная радиация, солнечная энергетика.

EVALUAREA POSIBILITĂȚILOR ENERGETICII SOLARE PE BAZA MĂSURĂRILOR PRECISE A RADIAȚIEI SOLARE TERESTRE

А. Aculinin, V. Smîcov
Institutul de Fizică Aplicată al Academiei de Științe a Moldovei

Rezumat: Pe baza măsurărilor radiației solare în mun. Chișinău a fost obținută o apreciere justă a cantității energiei solare incidente pe un panou solar și interceptat de acesta. S-a determinat orientarea optimă a panourilor solare și cantitatea de energie posibil de obținut cu ele.

Cuvinte cheie: radiația solară, energia solară.

EVALUATION OF OPPORTUNITIES OF SOLAR ENERGETICS ON THE BASIS OF ACCURATE GROUND-BASED MEASUREMENTS OF SOLAR RADIATION

А. Aculinin, V. Smicov
Institute of Applied Physics of the Academy of Sciences of Moldova

Abstract: Expected quantity of a solar energy received by solar panel is estimated on the basis of accurate measurements of solar radiation in Kishinev. Optimal orientation of solar panels and apparent volume of the electric power generated by solar panels are determined.

Keywords: solar radiation, solar power.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время все больше возрастает интерес к использованию солнечной энергии. Ее использование является одним из весьма перспективных направлений энергетики. Экологичность, возобновляемость ресурсов, отсутствие затрат на капремонт фотомодулей как минимум в течение первых 30 лет эксплуатации - всё это является сильными сторонами солнечной энергетики. Быстрое развитие гелиоэнергетики стало возможным благодаря снижению стоимости фотоэлектрических преобразователей в расчете на 1 Вт установленной мощности с 1000 долларов в 1970 году до нескольких долларов США в настоящее время. Правда из-за дефицита солнечного кремния впервые за долгое время цена солнечных батарей несколько выросла. В реально действующих структурах с гетеропереходами КПД достигает на сегодняшний день более 30% , а в однородных полупроводниках типа монокристаллического кремния - до 18%. Среднее значение КПД в солнечных батареях на монокристаллическом кремнии сегодня около 15%. Потенциальные возможности энергетики, основанной на использовании непосредственно солнечного излучения,

чрезвычайно велики. Использование всего лишь 0.0125 % энергии Солнца могло бы обеспечить все сегодняшние потребности мировой энергетики, а использование 0.5 % - полностью покрыть потребности на перспективу.

Обычно потенциальные возможности для получения и преобразования солнечной энергии для каждого конкретного пункта на земном шаре определяются путем расчетов. При этом используются данные по солнечной радиации из климатических справочников, не учитывающие местные особенности и характер облачности, не поддающейся расчетам. Поэтому результат получается приблизительный. Располагая точными наземными измерениями солнечной радиации в г. Кишиневе за несколько лет, мы получили численные значения количества солнечной энергии, падающей на поверхности с разным наклоном к горизонту.

2. МОНИТОРИНГ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

Для решения задач, связанных с долговременным непрерывным мониторингом радиационных свойств атмосферы и накоплением наборов данных измерений солнечной радиации в широком спектральном диапазоне, впервые в Молдове был создан многофункциональный радиометрический измерительный комплекс (см. рис. 1). Комплекс расположен на крыше здания Института прикладной физики АН Молдовы в городской черте Кишинева.



Рис. 1. Многофункциональный измерительный комплекс

Автоматизированный многофункциональный измерительный комплекс создан на базе электронно-механических элементов и датчиков излучения, серийно выпускаемых компанией Kipp&Zonen (Нидерланды). Все датчики радиации и отдельные элементы измерительного комплекса имеют сертификат ISO 9001 и сертифицированы в соответствии с требованиями Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) [1] для использования на сетевых станциях. Используемые датчики солнечного излучения имеют вторичный стандарт (Secondary Standard) и первый класс (First Class). Данный комплекс позволяет проводить непрерывные измерения солнечной радиации в широком спектральном диапазоне: от ультрафиолетовой (UV-B) до инфракрасной (IR) границы спектра в отдельных спектральных поддиапазонах. Выбранные поддиапазоны соответствуют спектральным характеристикам датчиков излучения (см. Таблицу 1).

Таблица 1. Датчики излучения, используемые в измерительном комплексе

| Тип датчика | Измеряемые компоненты | Тип радиации | Спектральный диапазон |
|-------------|-----------------------|--|-----------------------|
| UV-S-B-C | диффузная, глобальная | UV-B радиация | 280 – 315 нм |
| UV-S-A-C | глобальная | UV-A радиация | 315 – 400 нм |
| PAR Lite | глобальная | фотосинтетически активная радиация (PAR) | 400 – 700 нм |
| SP Lite | глобальная | видимое и ближнее инфракрасное излучение | 400 – 1100 нм |
| CM-11 | диффузная, глобальная | солнечная радиация | 305 – 2800 нм |
| CH-1 | прямая | солнечная радиация | 200 – 4000 нм |
| CG-1 | глобальная | собственное излучение атмосферы | 4,5 – 42 мкм |

Комплекс позволяет проводить непрерывные измерения диффузной, прямой и глобальной солнечной радиации. Измерения диффузной и прямой компонент солнечной радиации проводятся с использованием датчиков CM-11 и CH-1, которые расположены на подвижной платформе автоматической системы 2AP BD слежения за солнцем.

Остальные датчики расположены на стационарной платформе и используются для измерения глобальной компоненты солнечного излучения. Выбор типов датчиков излучения, их спектральные характеристики, схемы расположения датчиков по типу платформ, места наблюдения и методов измерений солнечного излучения в различных спектральных поддиапазонах определялся в соответствии с требованиями ВМО [1], и

руководствами по проведению измерений, которые используются Global Atmospheric Watch (GAW) и Baseline Surface Radiation Network (BSRN) [2,3].

Поток исходных данных измерений, осредненных за 1 минуту, накапливается в модуле CR10x SM4M и считывается удаленным (на 20 м от комплекса) компьютером. Структура комплекса и метод измерения подробно описаны в работе [4] и представлены на сайте <http://arg.phys.asm.md>. Таким образом, в нашем распоряжении имеются точные измерения прямой солнечной радиации на перпендикулярную плоскость, диффузной и глобальной радиации на горизонтальную плоскость с временным разрешением -1 минута.

Спектральный диапазон чувствительности кремниевых солнечных элементов составляет 0.4–1.1 мкм, в котором заключено ~94% энергии из солнечного спектрального диапазона 0.3-3.0 мкм. Поэтому были использованы данные от датчиков СН-1 для прямой и СМ-11 для диффузной и глобальной радиации. На рис. 2 приводятся средние месячные суммы прямой, диффузной и глобальной радиации за три года, с 2005 по 2007г.г. Годовые суммы диффузной, глобальной и прямой солнечной радиации составляют 1950, 4720 и 4900 МДж/м², соответственно.

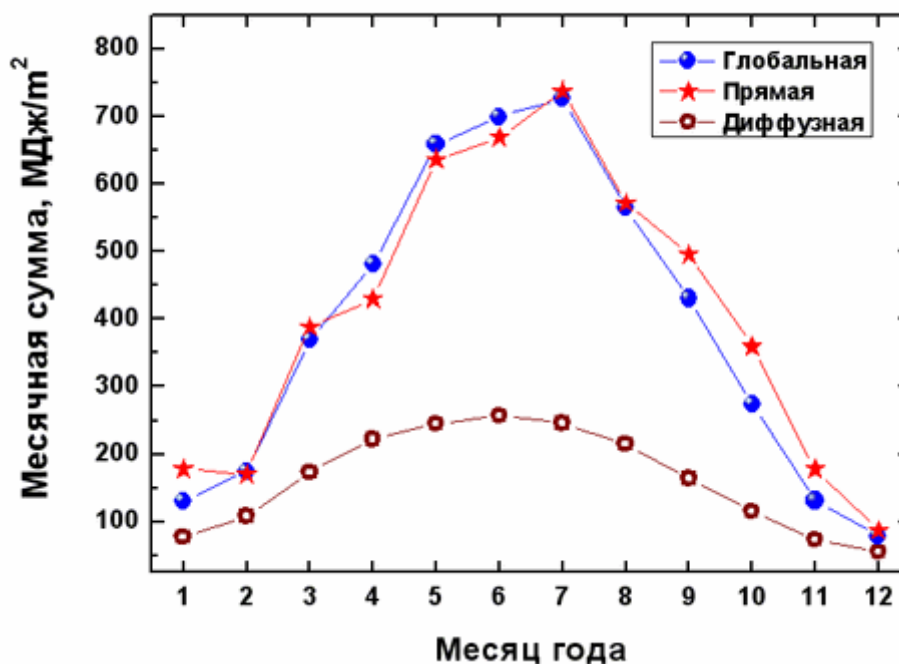


Рис. 2. Средние месячные суммы прямой, диффузной и глобальной радиации за период 2005-2007 г.г.

Доля диффузной радиации составляет от 34% в июле до 70% в декабре, а в среднем за год 41%. Поэтому при подсчетах количества солнечной радиации,

падающей на наклонные поверхности, необходимо учитывать не только прямую радиацию, падающую под соответствующим углом, но и диффузную. Особенно это касается зимних месяцев.

3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ И ОПТИМАЛЬНАЯ ОРИЕНТАЦИЯ

Солнечная радиация, падающая на произвольно ориентированную поверхность, складывается из **прямой** радиации от Солнца, **диффузной** от неба и **отраженной** от поверхности земли. В свою очередь диффузная радиация от неба состоит из **ореольной** диффузной радиации, то есть радиации из зоны неба, находящейся непосредственно вокруг диска солнца, и **фоновой** диффузной радиации, которую считают равномерно распределенной по всему полусферическому небосводу.

Для солнечных электрических панелей или коллекторов важно знать оптимальный угол наклона к плоскости горизонта для получения максимального количества энергии. Для этого мы вычислили месячные суммы солнечной радиации, падающей на плоскость с углом наклона к горизонту от 10° до 90° с шагом в 10° , направленную на юг, а также на плоскость, все время ориентированную перпендикулярно направлению на Солнце.

Прямая радиация R_{dir} вычислялась по формуле:

$$R_{dir} = R_{CH} \cdot \cos i, \quad (1)$$

где i – угол между нормалью к поверхности солнечной панели и направлением на Солнце, R_{CH} – измеренная прямая солнечная радиация на перпендикулярную плоскость.

$$\cos i = \cos \alpha \cdot \sin h + \sin \alpha \cdot \cos h \cdot \cos A, \quad (2)$$

где α - угол наклона поверхности к горизонту, h – высота Солнца, A – разность азимутов Солнца и проекции нормали к поверхности на горизонтальную плоскость [5].

Экспериментально установлено, что **ореольная** радиация на поверхности приблизительно составляет 7% прямой солнечной радиации на этой поверхности. Таким образом, интенсивность **ореольной** радиации R_{or} составляет $0.07R_{dir}$.

Фоновая радиация прямо пропорциональна той части небесного свода, к которой обращена поверхность. Например, вертикальная поверхность обращена только к половине небесной полусферы. Поэтому фоновая радиация на вертикальной поверхности составляет половину радиации на горизонтальной поверхности. Поверхность, наклоненная к горизонтали под углом α , будет обращена к $0.5(1 + \cos\alpha)$

части полусферического свода. Поэтому **фоновая** радиация на наклонной поверхности равна:

$$R_F = 0.5 \cdot (1 + \cos \alpha) \cdot (R_{dif} - 0.07 \cdot R_{dir}) \quad (3)$$

где R_{dif} – измеренная диффузная радиация на горизонтальную плоскость.

Наклонная плоскость получает радиацию также и от окружающей земной поверхности. Она пропорциональна $0.5(1 - \cos \alpha)$ части земной поверхности, к которой обращена плоскость. **Отраженная** радиация от земли выражается следующим уравнением:

$$R_{ref} = 0.5 \cdot Al \cdot R_{gl} \cdot (1 - \cos \alpha), \quad (4)$$

где R_{gl} – измеренная глобальная радиация на горизонтальную плоскость, Al – коэффициент отражения поверхности земли, называемый альбедо. Так как на нашем комплексе альбедо не измеряется, мы использовали среднемесячные многолетние значения для Кишинева из [6].

Таким образом, полная радиация на наклонную плоскость составит

$$R_{sum} = R_{dir} + R_{or} + R_F + R_{ref}. \quad (5)$$

Для каждого измеренного минутного значения прямой, диффузной и глобальной радиации вычислены высота и азимут Солнца и по формулам (1)-(5) вычислены суммарные значения радиации для углов наклона от 10° до 90° . Далее для каждого из углов посчитаны месячные суммы. Кроме того, для плоскости, все время ориентированной перпендикулярно солнечным лучам, т.е. снабженную гелиостатом, аналогичные вычисления производились по формуле:

$$R_{norm} = 1.07 \cdot R_{CH} + R_F + R_{ref}.$$

Для проверки точности применяемых формул мы также вычислили суммы радиации для угла наклона в 0° и сравнили их с измеренными значениями глобальной радиации на горизонтальную плоскость. Разница не превышает 0.5% и в среднем составляет 0.2%, что меньше ошибок измерений.

Далее вычислялись среднемесячные суммы за 3 года (2005-2007г.г.). Они представлены в таблице 2. Все суммы падающей солнечной радиации выражены в киловатт-часах на квадратный метр ($\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$), что более удобно для энергетиков-практиков. В трех последних строках даны суммы за год (1-12), в теплую половину года с апреля по сентябрь (4-9) и в холодную половину с октября по март (10-3).

Таблица 2. Среднемесячные суммы солнечной радиации (кВт·ч/м²), падающей на наклонные плоскости солнечных панелей.

| Наклон Месяц | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | гелиостат |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|
| 1 | 34.73 | 41.56 | 47.68 | 52.91 | 57.12 | 60.17 | 61.96 | 62.43 | 61.53 | 59.27 | 68.26 |
| 2 | 48.64 | 54.49 | 59.43 | 63.30 | 65.99 | 67.43 | 67.55 | 66.34 | 63.82 | 60.03 | 74.08 |
| 3 | 102.37 | 112.05 | 119.48 | 124.45 | 126.81 | 126.48 | 123.43 | 117.72 | 109.47 | 98.89 | 151.49 |
| 4 | 133.16 | 139.84 | 143.63 | 144.43 | 142.20 | 137.00 | 128.94 | 118.24 | 105.17 | 90.14 | 175.03 |
| 5 | 182.58 | 187.36 | 188.22 | 185.19 | 178.34 | 167.84 | 153.95 | 137.11 | 117.84 | 96.84 | 241.14 |
| 6 | 194.00 | 196.21 | 194.47 | 188.89 | 179.62 | 166.91 | 151.10 | 132.70 | 112.35 | 90.97 | 254.19 |
| 7 | 201.44 | 205.32 | 204.94 | 200.35 | 191.67 | 179.11 | 163.03 | 143.91 | 122.41 | 99.39 | 270.93 |
| 8 | 156.85 | 163.78 | 167.22 | 167.09 | 163.38 | 156.18 | 145.67 | 132.13 | 115.95 | 97.64 | 215.04 |
| 9 | 119.53 | 130.17 | 137.98 | 142.74 | 144.29 | 142.57 | 137.59 | 129.46 | 118.35 | 104.57 | 179.94 |
| 10 | 76.00 | 86.82 | 95.79 | 102.63 | 107.16 | 109.22 | 108.72 | 105.66 | 100.07 | 92.08 | 128.71 |
| 11 | 36.32 | 42.88 | 48.60 | 53.31 | 56.87 | 59.19 | 60.17 | 59.78 | 58.00 | 54.87 | 66.54 |
| 12 | 21.88 | 25.35 | 28.43 | 31.01 | 33.04 | 34.45 | 35.19 | 35.24 | 34.58 | 33.21 | 37.35 |
| | | | | | | | | | | | |
| 1-12 | 1307.5 | 1385.8 | 1435.9 | 1456.3 | 1446.5 | 1406.6 | 1337.3 | 1240.7 | 1119.5 | 977.9 | 1862.7 |
| 4-9 | 987.6 | 1022.7 | 1036.5 | 1028.7 | 999.5 | 949.6 | 880.3 | 793.6 | 692.1 | 579.6 | 1336.3 |
| 10-3 | 319.9 | 363.2 | 399.4 | 427.6 | 447.0 | 456.9 | 457.0 | 447.2 | 427.5 | 398.4 | 526.4 |

На рис. 3 представлены среднемесячные суммы солнечной радиации для разных углов наклона плоскости солнечной панели к горизонту. Верхняя кривая соответствует плоскости, всегда перпендикулярной к лучам Солнца, на которую падает наибольшее количество солнечной энергии. Как видно из рисунка, больше всего радиации, кроме перпендикулярной плоскости, поступает на поверхности, наклоненные под углами от 0° до 30°.

Проведенные расчеты позволяют определить оптимальный угол наклона солнечной панели в разное время года. На рис. 4 представлены зависимости месячных сумм солнечной радиации от угла наклона поверхности к горизонту для каждого месяца года. Оптимальный угол наклона варьируется от 10° в июне до 70° в декабре – январе, что наглядно демонстрирует рис. 5.

На практике постоянно менять угол наклона солнечной панели неудобно и трудоемко, особенно если панели большие или их много. Поэтому целесообразно рассмотреть применение одного из трех вариантов:

- а) гелиостат, когда специальное устройство следит за Солнцем и ориентирует панель всегда перпендикулярно солнечным лучам;
- б) дважды в год изменяется наклон панели – с летнего на зимний и обратно;
- в) угол наклона панели в течение года не меняется.

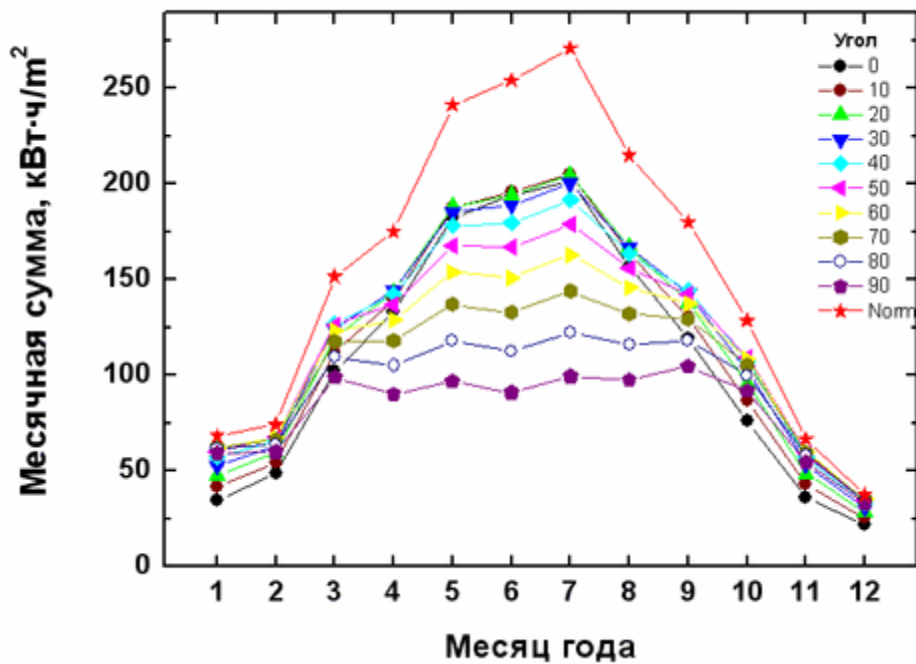


Рис. 3. Приток солнечной радиации для разных углов наклона плоскости солнечных панелей относительно горизонта

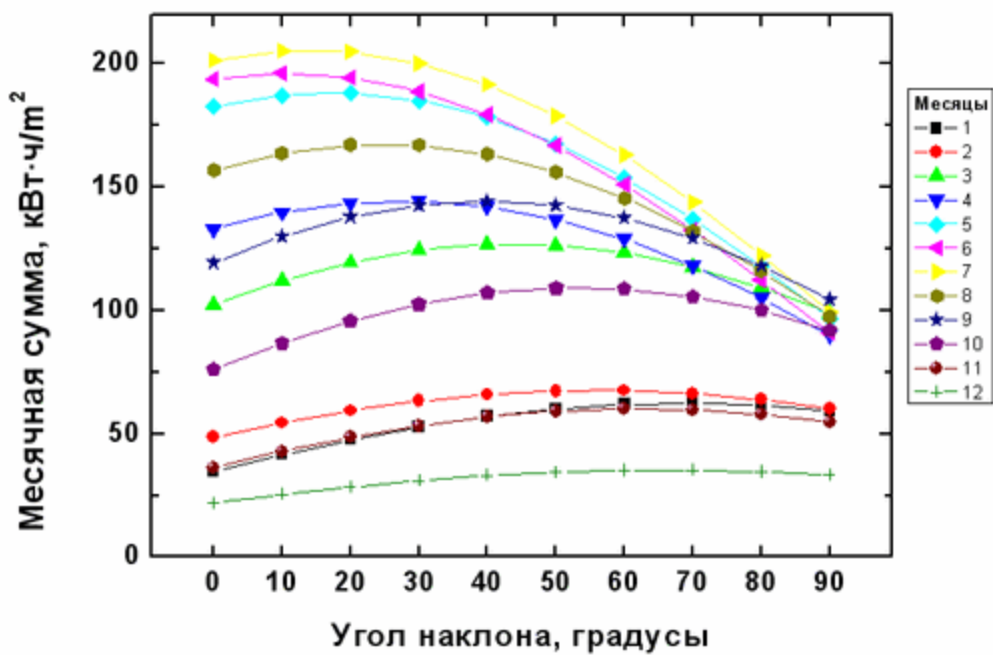


Рис. 4. Зависимости месячных сумм солнечной радиации от угла наклона поверхности солнечной панели

При первом варианте можно получить максимальное количество энергии, но часть ее потребляется гелиостатом и повышается стоимость. Второй вариант дешевле и

проще, особенно для небольших панелей. Третий вариант вообще не требует обслуживания и поэтому самый надежный и экономичный.

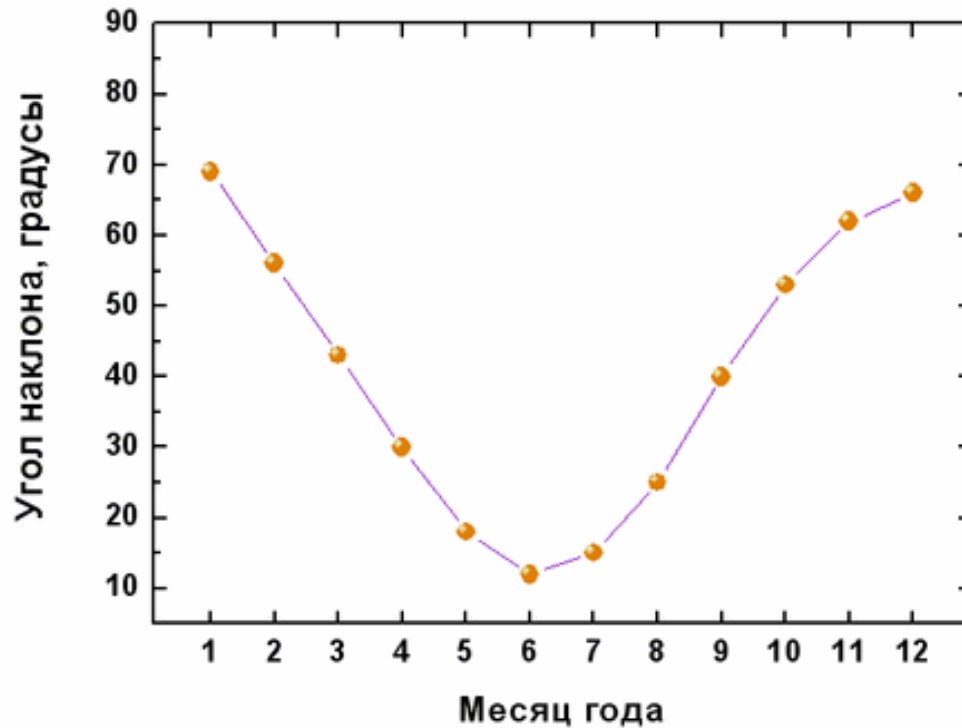


Рис. 5. Оптимальный угол наклона солнечной панели в течение года

На рис. 6 показаны суммарные количества радиации за год, летний и зимний полугодия при разных углах наклона солнечной панели. Верхняя кривая соответствует третьему варианту и оптимальным углом для него является угол в 32° . Средняя и нижняя кривые соответствуют второму варианту. Для летнего периода оптимальным является угол около 20° , для зимнего периода – 55° . Следует заметить, что эти углы являются оптимальными именно для Кишинева за последние 3 года. Для других пунктов с такой же широтой они могут несколько отличаться в зависимости от характера облачности.

Количество солнечной энергии, получаемой за год одним квадратным метром, равно 1.863 МВт·ч для первого варианта, 1.493 МВт·ч для второго и 1.456 МВт·ч для третьего. Как видим второй и третий варианты мало отличаются, поэтому экономически более целесообразно использовать стационарные солнечные панели, ориентированные на юг под углом около 32° к горизонту круглый год. Что касается варианта с гелиостатом, то здесь необходимо знать количество энергии, потребляемой самим гелиостатом. Если потребление меньше 400 кВт·ч в год с 1 м^2 площади солнечных панелей, то вполне оправдано использовать гелиостат.

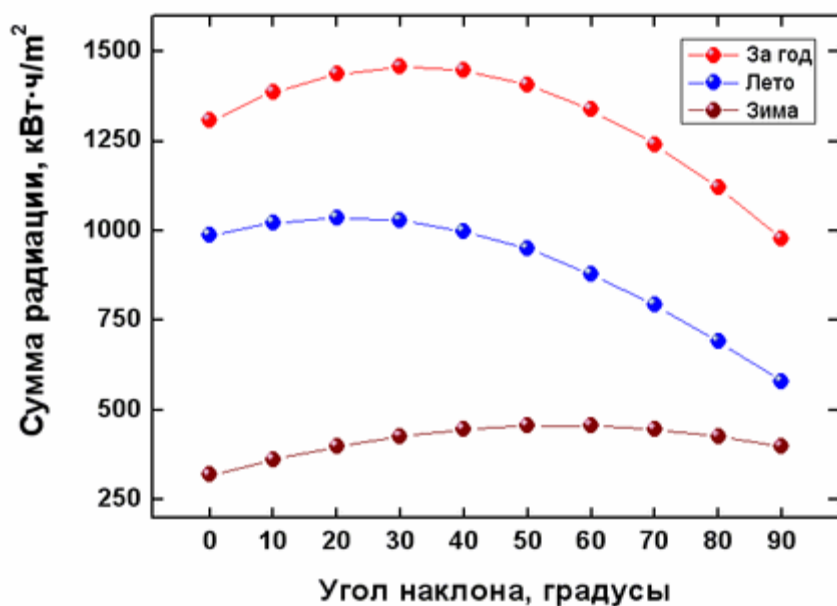


Рис. 6. Суммарные количества радиации за год, летний и зимний полугодия при разных углах наклона солнечной панели

Приняв КПД солнечных панелей в среднем за 15% можно в течение года с одного квадратного метра получить от 218 кВт·ч при постоянном положении панели до 280 кВт·ч с использованием гелиостата. Следует также учесть, что приход солнечной энергии на поверхность земли неравномерно распределен в течение года. За 2/3 года с марта по октябрь приходит 86% этого количества и всего 14% за 4 месяца с ноября по февраль.

4. ВЫВОДЫ

- По точным измерениям солнечной радиации в Кишиневе годовые суммы диффузной, глобальной и прямой солнечной радиации составляют 1950, 4720 и 4900 МДж/м² соответственно.
- Оптимальный угол наклона солнечных панелей к горизонту по реальным высокоточным измерениям в Кишиневе для летнего периода около 20°, для зимнего периода – 55°.
- При неизменяемом угле наклона оптимальным является угол в 32°.
- В течение года с одного квадратного метра солнечной панели можно получить 218 кВт·ч электроэнергии при постоянном положении панели,

224 кВт·ч при изменении угла наклона с летнего на зимний и обратно,
280 кВт·ч при использовании гелиостата.

Литература

1. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation/ Sixth edition; WMO-No. 8, 1996.
2. Global Atmosphere Watch (GAW) Measurements Guide, WMO TD No. 1073, July 2001.
3. Baseline Surface Radiation Network (BSRN) Operations Manual (Version 1.0 – Reprinted, December 2000), World Climate Research Programme// Ed. by L. J. B. McArthur, WMO/TD-No. 879, February 1998.
4. А. Акулинин, А. Смирнов, В. Смыков, Т. Эк, А. Поликарпов, “Наземный многофункциональный измерительный комплекс для мониторинга атмосферной радиации в Кишиневе, Молдова”- Международный симпозиум стран СНГ "Атмосферная радиация" (МСАР-04), 22-25 июня 2004 г., С. Петербург, Россия (2004). http://arg.phys.asm.md/paper/aculinin_1.pdf.
5. К. Я. Кондратьев «Актинометрия», Л., Гидрометеорологическое издательство, 1965.
6. «Климат Кишинева», под ред. В.Н. Бабиченко и Г.Н. Шевкун, Л., Гидрометеоиздат, 1982, с. 11.

Александр Акулинин, д.т.н., вед. н. с. Института прикладной физики АН Молдовы. Области научных интересов: оптика атмосферы, атмосферный аэрозоль, УФ радиация, озон. Опубликовано 50 научных работ. E-mail: akulinin@phys.asm.md

Владимир Смыков, н.с. Института прикладной физики АН Молдовы. Области научных интересов: астрономия, оптика атмосферы, прикладное программирование. Опубликовано 60 научных работ. E-mail: smicov@phys.asm.md