

ОСОБЕННОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Для оценки энергетического потенциала солнечной энергии района установки солнечной электростанции предложена методика определения энергетического потока солнечной радиации, основанная на комбинации метода применения дневного профиля поступления солнечной радиации при абсолютно чистом небе и актинометрических данных электронной базы NASA, с последующей идентификацией характеристик энергетического потока методами разделения переменных и аппроксимации. Методика учитывает географические координаты, реальные атмосферные условия, обладает высокой точностью и вычислительной эффективностью.

Ключевые слова: солнечная энергия, географические координаты, атмосферные условия, энергетический поток, идентификация.

В последние годы использование возобновляемых источников энергии, в частности солнечной энергии, получило широкое развитие. Это связано с уменьшением выбросов вредных веществ из-за сокращения потребления дефицитного ископаемого топлива, повышением тарифов на электрическую энергию, введением экономических и политических стимулов привлечения инвестиций в сектор возобновляемой энергетики. Однако до сих пор одними из основных проблем остаются высокая себестоимость выработанной электрической энергии, а также необходимость аккумулирования или резервирования электроснабжения из-за непостоянства характеристик приходящей первичной (солнечной) энергии. Более точная оценка потенциала солнечной энергии позволит спрогнозировать достоверно выработку электрической энергии, а, следовательно, и оценить величину ее себестоимости.

В настоящее время при проектировании солнечных электростанций для определения интенсивности солнечной радиации наибольшее распространение получили методики: с наличием полной информации и при ограниченном объеме информации [1]. В первом случае в качестве исходных используются результаты актинометрических измерений, полученные на метеостанциях и занесенные в климатические справочники и электронные базы данных, за выбранный период осреднения, что позволяет дать статистически оправданные оценки потенциала инсоляции. Однако получить достоверную информацию о распределении поступающей радиации достаточно сложно, из-за небольшого количества и неравномерного расположения актинометрических станций по территории Украины. Существующие справочные данные весьма ограничены [2]. Практически все существующие сейчас электронные базы данных (E.S.R.A., WRDC и др.) составлены на основе информации, полученной с метеостанций и как климатологические справочники и не обладают полнотой исходной информации для определения потенциала солнечной энергии для произвольно выбранной географической точки (региона).

Наиболее полной для использования на территории Украины является база данных, созданная Национальным агентством аэронавтики и исследования космического пространства США NASA. Она содержит интерполированный массив характеристик солнечной радиации, полученный в результате спутниковых измерений с верификацией его с наземными актинометрическими данными, то есть данные одинаковые для всей площади квадрата $1^\circ \times 1^\circ$ и равняются соответствующим величинам для точки с координатами центра этого квадрата. Поэтому использование таких усредненных данных при определении потенциала солнечной энергии не позволяет также учитывать климатологические особенности региона [3] и может приводить к существенной погрешности расчетов.

Методики, используемые при ограниченном объеме информации [4], требуют оценки достоверности полученных согласно им результатов, так как не позволяют адекватно учитывать атмосферные условия. Последнее возможно путем их корректировки на основе данных актинометрических измерений, которые, как было сказано выше, не всегда доступны для исследуемого района.

Кроме того, согласно действующим нормам проектирования гелиоустановок, расчет необходимо проводить по часовым суммам солнечной радиации для каждого дня года [5], при этом необходимо учитывать все ее составляющие: прямую, рассеянную и отраженную. Это связано с тем, что особенностью приходящего солнечного излучения на территории стран СНГ является достаточно высокая доля диффузной радиации в радиационном балансе: от 21 % летом до 60 % зимой [3]. Указанные ранее источники актинометрической информации содержат преимущественно годовые и месячные суммы потока солнечной радиации и только в местах установки актинометрических станций. То есть для исследования рабочих характеристик фотоэлектрических установок по часам для каждого дня года необходимо пересчитать интерполированные среднемесячные дневные суммы потока солнечной радиации, поступающей на горизонтальные поверхности, в их часовые значения.

Таким образом, существующие методики определения интенсивности солнечной радиации требуют большого массива исходной информации не всегда доступной для проектировщиков солнечных электростанций. В результате чего для рассматриваемого региона установки для одной группы методик могут отсутствовать полный объем данных про все составляющие солнечной радиации, а для другой – невозможно будет точно учесть реальные атмосферные условия.

Поэтому для проектирования солнечных электростанций актуальна разработка новой высокоэффективной инженерной методики определения интенсивности всех составляющих солнечной радиации, которая обладает алгоритмической простотой, не требует значительных вычислительных ресурсов, учитывает реальные атмосферные условия рассматриваемого региона, удовлетворяет требованиям точности, быстродействия и может быть адаптирована к особенностям различных регионов, для которых планируется использование электростанций.

Целью работы является разработка объективно-адаптированной методики определения интенсивности прямого, рассеянного и отраженного солнечного излучения для повышения точности и вычислительной эффективности инженерной методики расчета, учитывающей влияние реальных атмосферных условий на величину часовых сумм солнечной радиации и характер изменения инсоляции в течение суток и года, с целью оценки энергетического потенциала солнечной энергии района установки солнечной электростанции на начальном этапе ее проектирования.

Согласно [6], расчет интенсивности солнечного излучения производится на основе системы уравнений, включающей в себя уравнения для потока прямого R_{drH}

$$\begin{cases} R_{drH\,tn} = E_c \cdot \cos\theta_m \cdot \tau_{dr\,tn}, \text{ если } \cos\theta_m > 0, \\ R_{drH\,tn} = 0, \text{ если } \cos\theta_m < 0, \end{cases} \quad (1)$$

рассеянного R_{dfH}

$$R_{dfH\,tn} = E_c \cdot \cos\theta_m \cdot \tau_{df\,tn}, \quad (2)$$

и отраженного R_{rfH} солнечного излучения

$$R_{rfH\,tn} = (R_{drH\,tn} + R_{dfH\,tn}) \cdot r_3, \quad (3)$$

где $E_c = 1,367 \text{ кВт/м}^2$ – нормальная плотность потока солнечного излучения в космосе; θ_m – угол падения солнечных лучей на приемную поверхность горизонтальную к поверхности Земли (далее в тексте – горизонтальная приемная поверхность или площадка), который

зависит от широты местности φ , времени t и порядкового номера суток n ; $\tau_{dr\,tn}$ – коэффициент, учитывающий преломление и поглощение прямого солнечного излучения в атмосфере озоном, газовой смесью, водяным паром; а также релеевское и аэрозольное рассеяния солнечного излучения; $\tau_{df\,tn}$ – коэффициент, учитывающий преломление и поглощение солнечной радиации в атмосфере озоном, газовой смесью, водяным паром, частицами аэрозоля; релеевское и аэрозольное рассеяния солнечного излучения; r_3 – коэффициент отражения земной поверхности (альбедо).

Однако, система уравнений (1)–(3) не учитывает атмосферные условия, которые оказывают существенное влияние на характеристики солнечного излучения. Для учета влияния на характеристики инсоляции процессов, происходящих в атмосфере, предлагается в систему уравнений (1)–(3) ввести коэффициент адаптации к атмосферным условиям, значение которого будет определяться исходя из среднемесячных значений дневных сумм прямой и рассеянной солнечной радиации, приходящейся на 1 м^2 горизонтальной приемной площадки, полученных на основе актинометрических измерений, а также в результате расчетов по методу применения дневного профиля поступления солнечной радиации при абсолютно чистом небе:

$$R_{drH\,t,n}^r = R_{drH\,t,n} \cdot K_{dr\,i}^r, \quad (4)$$

$$R_{dfH\,t,n}^r = R_{dfH\,t,n} \cdot K_{df\,i}^r, \quad (5)$$

$$R_{rfH\,t,n}^r = (R_{drH\,t,n}^r + R_{dfH\,t,n}^r) \cdot r_3. \quad (6)$$

Коэффициенты учета реальных атмосферных условий для прямой и рассеянной солнечной радиации $K_{dr\,i}^r$ и для i -го месяца находятся из условия минимума относительной погрешности:

$$\min(\varepsilon_{dr\,i}) = \min \left\{ \frac{DRH_i \cdot (n_{2i} - n_{1i}) - \sum_{n=n_{1i}}^{n_{2i}} \sum_{t=1}^{24} R_{drH\,t,n}^r}{DRH_i \cdot (n_{2i} - n_{1i})} \right\}, \quad (7)$$

$$\min(\varepsilon_{df\,i}) = \min \left\{ \frac{DFH_i \cdot (n_{2i} - n_{1i}) - \sum_{n=n_{1i}}^{n_{2i}} \sum_{t=1}^{24} R_{dfH\,t,n}^r}{DFH_i \cdot (n_{2i} - n_{1i})} \right\}, \quad (8)$$

где DRH_i, DFH_i – среднемесячные значения дневных сумм, соответственно, прямой и рассеянной солнечной ра-

диации, приходящейся на 1 м^2 горизонтальной приемной площадки, полученных на основе актинометрических измерений для i -го месяца, $\text{кВт} \cdot \text{ч}/(\text{м}^2 \cdot \text{сутки})$; n_{1i}, n_{2i} – порядковый номер дня начала и конца месяца соответственно.

В качестве базы данных используется электронная база Национального агентства аэронавтики и исследования космического пространства США (NASA) [3].

Методом упорядоченного перебора установлена область проекций матрицы коэффициента адаптации к реальным атмосферным условиям: $0 \leq K_{dri}^r \leq 1$, $1 \leq K_{dfi}^r \leq 2$ для корректировки интенсивности суммарной солнечной радиации (4)–(6), размерность которой соответствует сетке географических координат базы NASA.

Однако, шаг варьирования среднемесячных значений дневных сумм прямой и рассеянной солнечной радиации, приходящейся на 1 м^2 горизонтальной приемной площадки, в базе NASA достаточно большой – 1° , в результате чего указанные величины одинаковые для всей площади участка величиной $111 \text{ км} \times 65,5 \text{ км}$ и равняются соответствующим величинам для точки с координатами центра этого участка, площадь которого значительно превышает размеры типовых проектов солнечных электростанций. Следовательно, необходимо расширить диапазон варьирования данных путем аппроксимации полученных значений коэффициентов адаптации к атмосферным условиям. Для расширения диапазона иден-

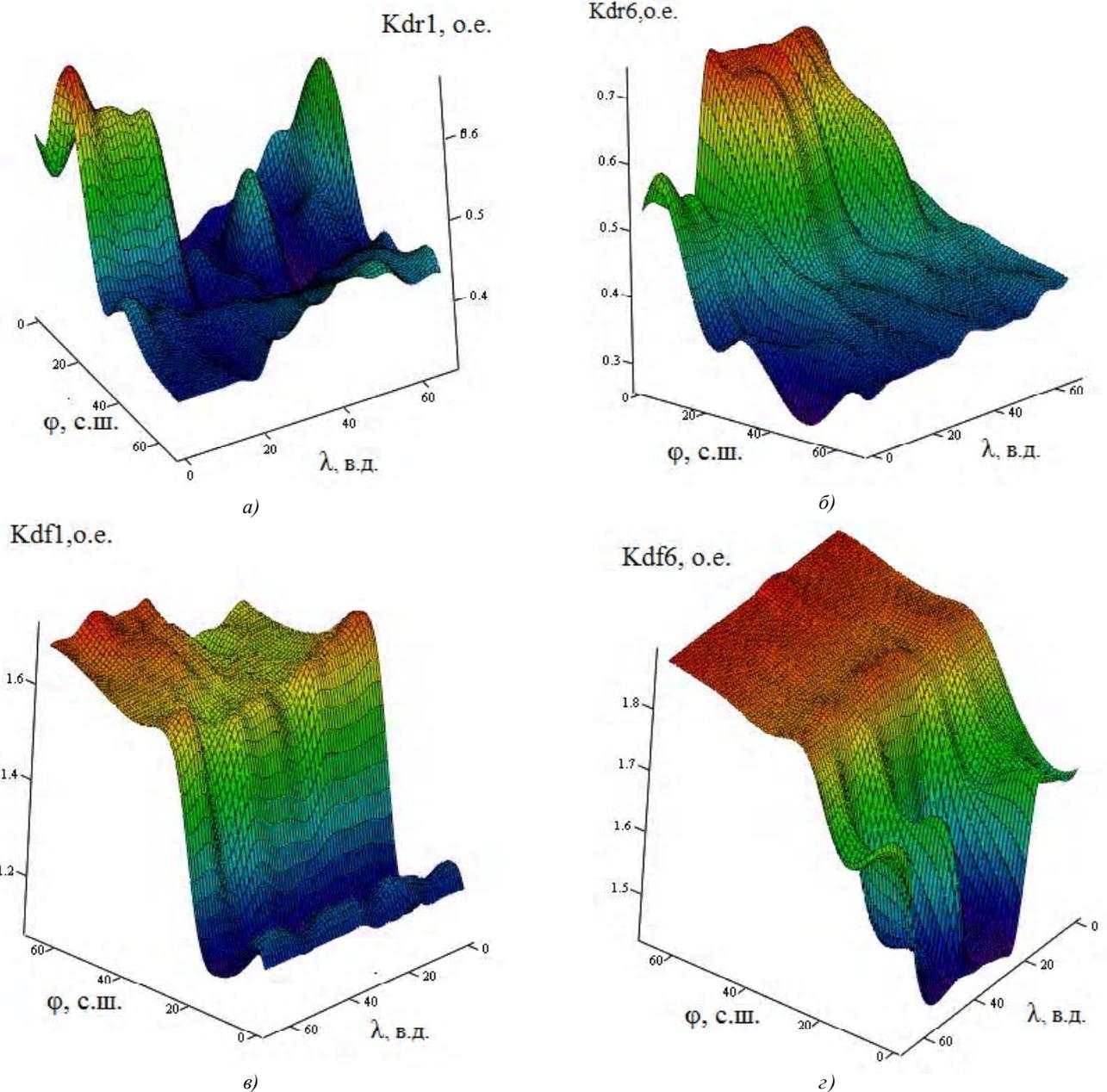


Рис. 1. Зависимости коэффициента адаптации прямой и рассеянной солнечной радиации к атмосферным условиям от географических координат для всей территории Украины: а, б – прямая солнечная радиация для января и июня соответственно; в, г – рассеянная солнечная радиация для января и июня соответственно

тификации коэффициентов адаптации (4), (5) от географических координат (широта и долгота) для каждого месяца применялись методы кубической сплайн-интерполяции и аппроксимации [7]:

$$\begin{cases} K_{dr_i}^r = K_{dr_i}^r(\varphi, \lambda) = \sum_{\xi} \left(\sum_{\vartheta} C_{Kdr_{\vartheta, \xi}} \cdot \lambda_{\vartheta}^{\vartheta} \right) \varphi_i^{\xi}, \\ K_{df_i}^r = K_{df_i}^r(\varphi, \lambda) = \sum_{\xi} \left(\sum_{\vartheta} C_{Kdf_{\vartheta, \xi}} \cdot \lambda_{\vartheta}^{\vartheta} \right) \varphi_i^{\xi} \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, 12\}, \end{cases} \quad (9)$$

где λ – долгота местности, °в.д.

Зависимости коэффициента адаптации прямой и рассеянной солнечной радиации к атмосферным условиям от географических координат места установки солнечной электростанции на основе кубической интерполяции сплайнами для января и июня для координат 50,5°...40,5° с.ш., 24,5°...40,5° в.д. представлены на рис. 1.

Для рассматриваемой области с координатами 50,5°...40,5° с.ш., 24,5°...40,5° в.д. погрешность расчета по методике (1)–(3) с использованием коэффициентов адаптации к атмосферным условиям (9) по сравнению с данными метеостанций [2], расположенных в контрольных

точках, не входящих в узлы сетки координат базы данных НАСА, не превышает 5 % что говорит о высокой точности и вычислительной эффективности предложенной методики (табл. 1).

ВЫВОДЫ

Выполнена идентификация зависимости коэффициента адаптации прямой и рассеянной солнечной радиации к атмосферным условиям от географических координат места установки солнечной электростанции на основе кубической интерполяции сплайнами с погрешностью не более 1 %.

Разработанная объективно-адаптивная методика инженерного расчета энергетического потока солнечной радиации, основанная на комбинации метода применения дневного профиля поступления солнечной радиации при абсолютно чистом небе и актинометрических данных электронной базы NASA, с последующей идентификацией характеристик энергетического потока методами разделения переменных и аппроксимации, позволяет учесть географические координаты, реальные атмосферные условия, обладает высокой точностью (относительная погрешность менее 5 %) и вычислительной эффективностью.

Таблица 1. Расчетные значения среднемесячных суточных сумм суммарной солнечной радиации, а также их отклонение от данных метеостанций для г. Киев, Полтава и Херсон

| Город, координаты | Значение | Единицы измерений | Месяц | | | | | |
|------------------------------------|------------|----------------------|-------|------|------|------|------|------|
| | | | I | II | III | IV | V | VI |
| Киев 50.27°с.ш. 30.31°в.д. | справочное | кВт·час/ м²·сутки | 1,58 | 2,95 | 4,21 | 6,33 | 7,74 | 8,31 |
| | расчетное | | 1,54 | 3,02 | 4,31 | 6,53 | 8,09 | 8,71 |
| | отклонение | | % | 2,4 | -2,2 | -2,4 | -3,2 | -4,5 |
| Полтава 46.34°с.ш 34.34°в.д. | справочное | кВт·час/ м²·сутки | 1,84 | 2,91 | 4,58 | 6,21 | 7,70 | 8,27 |
| | расчетное | | 1,78 | 2,79 | 4,38 | 6,38 | 8,01 | 8,66 |
| | отклонение | | % | 3,3 | 4,2 | 4,5 | -2,7 | -4,0 |
| Херсон 46.38°с.ш 32.36°в.д. | справочное | кВт·час/ м²·сутки | 2,25 | 2,83 | 4,70 | 6,29 | 7,63 | 8,23 |
| | расчетное | | 2,18 | 2,96 | 4,69 | 6,53 | 8,0 | 8,63 |
| | отклонение | | % | 3,3 | -4,8 | 0,2 | -3,8 | -4,9 |
| Город, координаты | Значение | Единицы измерений | Месяц | | | | | |
| | | | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
| Киев 50.27°с.ш. 30.31°в.д. | справочное | кВт·час/ м²·сутки | 7,97 | 6,61 | 5,05 | 3,42 | 1,90 | 1,24 |
| | расчетное | | 8,34 | 6,83 | 5,27 | 3,56 | 1,99 | 1,29 |
| | отклонение | | % | -4,7 | -3,3 | -4,4 | -4,1 | -4,6 |
| Полтава 46.34°с.ш 34.34°в.д. | справочное | кВт·час/ м²·сутки | 8,16 | 6,73 | 5,09 | 3,46 | 2,17 | 1,54 |
| | расчетное | | 8,41 | 7,04 | 5,08 | 3,53 | 2,06 | 1,53 |
| | отклонение | | % | -3,2 | -4,7 | 0,1 | -2,1 | 5,3 |
| Херсон 46.38°с.ш 32.36°в.д. | справочное | кВт·час/ м²·сутки | 7,93 | 6,80 | 5,40 | 3,83 | 2,52 | 1,77 |
| | расчетное | | 8,31 | 7,06 | 5,39 | 3,70 | 2,43 | 1,77 |
| | отклонение | | % | -4,8 | -3,8 | 0,1 | 3,5 | 3,7 |

Предложенная методика может быть использована для определения интенсивности суммарной солнечной радиации на начальном этапе проектирования солнечных электроустановок.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Методы расчета ресурсов возобновляемых источников энергии : учебное пособие / [А. А. Бурмистров, В. И. Виссарионов, Г. В. Дерюгина и др.]; под ред В.И. Виссарионова. – 2-е изд., стер. – М. : Издательский дом МЭИ, 2009. – 144 с. : ил.
2. Справочник по климату СССР [Текст]: справ.: в 29 вып. Вып. 10: Украинская ССР: в 3 частях: Часть 1: Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние / под ред. В. И. Гришко, Л. И. Мисюры. – Л. : Гидрометеиздат, 1966. – 125 с.
3. The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set center [Электронный ресурс] – 2009.– Режим доступа к базе: <http://easweb/larc.nasa.gov/sse/>.
4. Кондратьев К. Я. Лучистая энергия солнца. [Текст] / К. Я. Кондратьев. – Л. : Гидрометиздат, 1954. – 600 с.
5. ВСН 52-86 «Установки солнечного горячего водоснабжения. Нормы проектирования». – М. : Госгражданстрой, 1988. – 13 с.
6. Bird R. A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces. [Text] / R. Bird, R. L. Hulstrom // SERI/TR-642-761, Solar Energy Research Institute (SERI/NREL), 1981. – 42 p.
7. Математика и САПР. Кн. 2 Вычислительные методы. Геометрические методы / [под ред. Н. Г. Волкова]. – М. : Мир, 1989. – 260 с.

Стаття надійшла до редакції 19.06.2014.

Після доробки 23.06.2014.

Ярымбаш Д. С.¹, Даус Ю. В.²

¹Канд. техн. наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, Україна

²Асистент, Запорізький національний технічний університет, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕНСИВНОСТІ СОНЯЧНОЇ РАДІАЦІЇ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Для оцінки енергетичного потенціалу сонячної енергії району установки сонячної електростанції запропонована методика визначення енергетичного потоку сонячної радіації, заснована на комбінації методу застосування денного профілю надходження сонячної радіації при абсолютно чистому небі і актинометричних даних електронної бази NASA, з подальшою ідентифікацією характеристик енергетичного потоку методами розділення змінних та апроксимації. Методика враховує географічні координати, реальні атмосферні умови, володіє високою точністю і обчислювальною ефективністю.

Ключові слова: сонячна енергія, географічні координати, атмосферні умови, енергетичний потік, ідентифікація.

Yarymbash D. S.¹, Daus Y. V.²

¹Cand.Tech.Sci., Associate Professor, Zaporozhye National Technical University, Ukraine

²Assistant, Zaporozhye National Technical University, Ukraine

SOLAR RADIATION INTENSITY IDENTIFICATION FEATURES FOR SOLAR POWER STATIONS DESIGNING

For solar power stations designing it is proposed method of any point solar radiation energy flux calculation knowing only its geographical coordinates based on a combination of the perfectly clear sky solar radiation daily profile application model and NASA solar radiation data base with the subsequent energy flow characteristics identification by the method of variables separation and approximation, that takes into account the region real atmospheric conditions providing high calculation accuracy of the all solar radiation components and the numerical implementation efficiency.

The identification of the real atmospheric conditions adaption factor dependence on the solar power plants installation geographical coordinates is determined on the basis of cubic spline interpolation. Therefore, it can be used to determine the total solar radiation intensity at the designing solar installations initial stage.

Keywords: solar energy, geographical coordinates, real atmospheric conditions, energy flow, identification.

REFERENCES

1. Burmistrov A. A., Vissarionov V. I., Deriugina G. V. *Metody rascheta resursov vozobnovljaemyh istochnikov energii* [Renewable energy resources calculating methods]. Moscow: Izdatelskiy dom MEI, 2009, 144 p.
2. Grishko V. I., Misyura L. I. *Spravochnik po klimatu SSSR* [Climate USSR Handbook. Ussue 1: Ukrainian SSR. Part 1: Solar radiation, radiation balance and sunshine]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1966, 125 p.
3. The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set center: <http://easweb/larc.nasa.gov/sse/>.
4. Kondratev K. Ya. *Luchistaya energiya solntsa* [The sun radiant energy]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1954, 600 p.
5. *Ustanovki solnechnogo goryachego vodosnabzheniya. Normy proektirovaniya* [Solar hot water installation. Design standards]. Moscow, Gosgrazhdanstroy, 1988, 13 p.
6. Bird R., Hulstrom R. L. A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces. [Text], SERI/TR-642-761, Solar Energy Research Institute (SERI/NREL), 1981, 42 p.
7. Volkov N. G. *Matematika i SAPR. Kn. 2 Vyichislitelnyye metody. Geometricheskie metody* [Mathematics and CAD systems. Book 2 Numerical Methods. Geometric methods], Moscow, Mir, 1989, 260 p.